

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Sistema de control y monitorización para  
sistema de enfriamiento de compresores de aire**

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

**Fabián Enrique Vargas Delgado**

**Cartago, Setiembre 2008**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ingeniería Electrónica**  
**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 Evaluador**



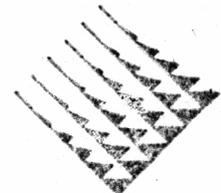
**Ing. Marvin Hernández  
Cisneros**  
*Profesor lector*



**Ing. Gabriela Ortiz León**  
*Profesor lector*



**Ing. Eduardo Interiano Salguero**  
*Profesor asesor*



**TEC**  
Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica

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; Setiembre 10, 2008**

## **Declaratoria de autenticidad**

Setiembre 10, 2008

San Antonio de Escazú, San José, Costa Rica

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.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'FABIÁN ENRIQUE VARGAS DELGADO'. The signature is stylized and somewhat cursive.

**Fabián Enrique Vargas Delgado**

*Cédula: 1-1137-0075*

## Resumen

El aire comprimido es de esencial importancia en los procesos productivos que se llevan a cabo en la planta de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L., en el Coyol de Alajuela.

Para asegurar el suministro aire comprimido se cuenta con una sala de compresores centrífugos. Al comprimirse, el aire se calienta y transfiere este calor a los compresores, lo que reduce la eficiencia. Se cuenta con un sistema de enfriamiento para mantener el proceso de compresión funcionando, pero no se tiene verdadero control y monitorización sobre él.

Con esta idea en mente; se diseña un sistema de control y monitorización, que permita controlar el proceso de enfriamiento de manera eficiente y monitorizar el comportamiento de manera remota. Para tal efecto, se hace uso de la red de control de la compañía y un sistema de control distribuido sobre el protocolo EtherNet/IP.

Estudiando el comportamiento del sistema de enfriamiento; se propone un sistema de control en lógica difusa, implementado en un controlador industrial, que ayude a mejorar el proceso de enfriamiento.

**Palabras clave:** *Transferencia de calor; Convección forzada; Intercambiador de calor; Control automático; Lógica difusa; Red de control; Ethernet (IEEE 802.3); EtherNet/IP; Automatización; Controlador programable de automatización (PAC); Sistema de control distribuido (DCS); Plataforma de control Logix (Allen–Bradley);*

## Abstract

Compressed air plays an essential role in the productive process on the main plant of the Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L., located at Coyol, Alajuela.

Dos Pinos's facilities have a centrifugal air compressors room to satisfy the air demands of the plant. The compression process increases the air temperature and transfers it to the compressors, reducing their efficiency.

The facility makes use of an industrial cooling system; with the objective to reduce the temperature of compressors, but does not have a real control and monitoring about them.

With that idea on mind, was designed a control and monitoring industrial system. This control helps the cooling system to work efficiently and increases its performance, using the company's control network and a distributed control system over EtherNet/IP communication protocol.

A behavior study of existent cooling system helps to propose a fuzzy logic control system, running over a programmable automation controller for improving the cooling process.

**Keywords:** *Heat transfer; Forced convection; Heat exchanger; Control engineering; Fuzzy logic; Control network; Ethernet (IEEE 802.3); EtherNet/IP; Automation; Programmable automation controller (PAC); Distributed control system (DCS); Logix Control Platform (Allen-Bradley);*

## **Dedicatoria**

*Finalizar mis estudios como ingeniero, hubiera sido totalmente imposible sin el amor y apoyo incondicional de mis padres y hermanos.*

*Por eso y muchas cosas más, les dedico este logro a mi padre José Calixto Vargas Marín, mi madre Paulina Delgado Jiménez y mis hermanos Ulises y Efrén.*

*Gracias por estar ahí para ayudarme en todo momento de mi vida.*

## **Agradecimiento**

A Yesenia Rodríguez Calvo, por todo su apoyo y amor brindado durante mis estudios y el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Eduardo Interiano Salguero; por la gran cantidad de aportes propuestos para mi proyecto y su excelente labor como profesor asesor.

Agradezco a todos los compañeros de la Unidad de Automatización de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L, por la oportunidad que me dieron para realizar este proyecto de graduación. Muy especialmente al ingeniero Verny Gutiérrez Leitón; ya que sin su ayuda realizar esta labor hubiera sido muy difícil.

A los ingenieros Juan Carlos Jiménez, Marvin Hernández Cisneros, Arys Carrasquilla Batista y demás profesores de la Escuela de Ingeniería Electrónica; por su manera particular de inspirarme deseos de seguir adelante y finalizar mi carrera.

## Tabla de contenidos

<i>Sección</i>	<i>Página</i>
<b>Declaratoria de autenticidad</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimiento</b>	<b>v</b>
<b>Tabla de contenidos</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de ilustraciones</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Problema existente	1
1.2. Solución propuesta	2
<b>2. Metas y objetivos</b>	<b>3</b>
2.1. Meta	3
2.2. Objetivo general	3
2.3. Objetivos específicos	3
<b>3. Marco teórico</b>	<b>4</b>
3.1. Sistema de enfriamiento	4
3.2. Transferencia de calor	10
3.2.1. Conducción	12
3.2.2. Convección	14
3.3. Lógica difusa	18
3.3.1. Fundamentos de lógica difusa	19
3.3.2. Estructura de un sistema de control difuso	25
3.4. Ethernet (IEEE 802.3)	30
3.4.1. Principio de operación	32
3.4.2. Formato de la trama Ethernet	33
3.4.3. Protocolo industrial EtherNet/IP	36
3.5. Automatización industrial	39
3.5.1. Controlador de automatización programable (PAC)	41
3.5.2. Sistema de control distribuido	43

<b>4. Solución implementada</b>	<b>45</b>
4.1. Modelado de la torre de enfriamiento	46
4.2. Controlador de lógica difusa	50
4.3. Implementación en el entorno industrial	56
4.3.1. Implementación en el controlador	62
4.3.2. Implementación en la interfaz humano/máquina	65
<b>5. Análisis de resultados</b>	<b>66</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>69</b>
6.1. Conclusiones	69
6.2. Recomendaciones	70
<b>7. Referencias</b>	<b>71</b>
<b>8. Apéndices</b>	<b>75</b>
8.1. Glosario	75
8.2. Uso de herramienta Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB	77
8.3. Manual de operación	82
8.4. Diagrama eléctrico	93
8.5. Distribución de entradas/salidas	95
<b>9. Anexos</b>	<b>96</b>
9.1. Datos de motores y protecciones	96
9.2. Hojas de datos	97

## Lista de ilustraciones

<i>Sección</i>	<i>Página</i>
Figura 3.1. Sala de compresores de aire	4
Figura 3.2. Enfriadores de aceite	5
Figura 3.3. Sistema de bombeo de agua de enfriamiento	6
Figura 3.4. Torre de enfriamiento de agua	7
Figura 3.5. Banco de tubos alternados del intercambiador de calor	8
Figura 3.6. Sistema auxiliar de enfriamiento de agua	9
Figura 3.7. Radiador automotriz	11
Figura 3.8. Flujo térmico por conducción en una tubería	12
Figura 3.9. Tipos de convección	14
Figura 3.10. Flujo de agua caliente enfriado por aire	16
Figura 3.11. Flujo turbulento en banco de tubos alternados	17
Figura 3.12. Conjuntos difusos definidos por la edad	20
Figura 3.13. Función de membresía para el valor lingüístico "Poco"	21
Figura 3.14. Intersección, unión y complemento para conjuntos difusos	24
Figura 3.15. Sistema de control en lógica difusa	25
Figura 3.16. Estructura de un controlador difuso	25
Figura 3.17. Elementos de red Ethernet	32
Figura 3.18. Codificación Manchester ( <i>Ethernet</i> )	34
Figura 3.19. Red de control industrial sobre EtherNet/IP	36
Figura 3.20. Necesidades actuales de automatización en la industria	39
Figura 3.21. Características de un PAC	41
Figura 3.22. Estructura de un sistema de control distribuido Logix	43
Figura 4.1. Implementación del sistema de control y monitorización	45
Figura 4.2. Comportamiento experimental del sistema de enfriamiento	47
Figura 4.3. Datos de temperatura normalizados	47
Figura 4.4. Respuesta del sistema ante un escalón de temperatura	49
Figura 4.5. Controlador difuso implementado	51
Figura 4.6. Funciones de membresía del error $e(t)$	51
Figura 4.7. Funciones de membresía del enfriamiento	52
Figura 4.8. Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB	53
Figura 4.9. Comportamiento del controlador difuso en MATLAB	54
Figura 4.10. Implementación del sistema sobre EtherNet/IP	56

Figura 4.11.	Computador portátil para programación y monitorización	57
Figura 4.12.	Controlador, etapa de visualización y red Ethernet	58
Figura 4.13.	Módulos de control distribuido	59
Figura 4.14.	Lazo de corriente de 4 ~ 20 mA	60
Figura 4.15.	Comprobación de linealidad de convertidores PT100/RTD	61
Figura 4.16.	Arquitectura de un controlador FlexLogix	62
Figura 4.17.	Diagrama de flujo de la solución	63
Figura 4.18.	Diagrama de flujo de pantallas de visualización	65
Figura 8.1.	Interfaz del editor para controlador difuso	77
Figura 8.2.	Funciones de membresía de la variable de entrada	78
Figura 8.3.	Funciones de membresía de la variable de salida	78
Figura 8.4.	Reglas de comportamiento del control difuso	79
Figura 8.5.	Respuesta ante un error bajo	79
Figura 8.6.	Comportamiento ante un error medio	80
Figura 8.7.	Respuesta ante un error alto	80
Figura 8.8.	Comportamiento completo del controlador difuso	81
Figura 8.9.	Ventana inicial ( <i>bienvenida</i> )	82
Figura 8.10.	Créditos del diseño	83
Figura 8.11.	Advertencia sobre configuración	83
Figura 8.12.	Ingreso a modo automático	84
Figura 8.13.	Ingreso a modo manual	85
Figura 8.14.	Torre de enfriamiento apagada	85
Figura 8.15.	Ventilador de baja velocidad encendido	86
Figura 8.16.	Ventilador de alta velocidad encendido	86
Figura 8.17.	Bomba de agua fría activada	87
Figura 8.18.	Conjunto bomba y ventilador baja encendido	87
Figura 8.19.	Conjunto bomba y ventilador alta activado	88
Figura 8.20.	Comportamiento de las temperaturas del sistema	88
Figura 8.21.	Fallo de funcionamiento de la bomba de agua	89
Figura 8.22.	Fallo de funcionamiento del ventilador	89
Figura 8.23.	Ventana desplegada con información del error	90
Figura 8.24.	Historial de alarmas del sistema	90
Figura 8.25.	Atención de parada de emergencia ( <i>principal</i> )	91
Figura 8.26.	Atención de parada de emergencia ( <i>operación</i> )	91
Figura 8.27.	Ventana de atención de parada de emergencia	92
Figura 8.28.	Diagrama eléctrico	93
Figura 8.29.	Diagrama de módulos remotos	94

## Lista de tablas

<i>Sección</i>	<i>Página</i>
Tabla 3.1. Modelo OSI	31
Tabla 3.2. Trama IEEE 802.3 ( <i>Ethernet</i> )	34
Tabla 3.3. Comparación entre tecnologías	42
Tabla 4.1. Conjunto de reglas de control	52
Tabla 8.1. Distribución de entradas digitales ( <i>1794-IB8</i> )	95
Tabla 8.2. Distribución de entradas analógicas ( <i>1794-IE8</i> )	95
Tabla 8.3. Distribución de salidas de relé ( <i>1794-OW8</i> )	95
Tabla 9.1. Datos de placa de los motores	96
Tabla 9.2. Protecciones seleccionadas	96

# 1. Introducción

## 1.1. Problema existente

La planta de producción de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos, R.L.; localizada en el Coyol de Alajuela cuenta con una serie de procesos productivos, en los cuales el uso del aire comprimido se hace indispensable.

Esto debido a las propiedades que han contribuido a su popularidad, como la disponibilidad y abundancia del aire, su limpieza (*hecho de suma importancia en la industria alimenticia*), es almacenable y fácilmente transportable por tuberías, no presenta riesgo de explosión e incendio, entre otras que lo hacen idóneo para el trabajo en la planta.

Para tal efecto, en Dos Pinos se cuenta con una sala de compresores centrífugos con capacidad suficiente para satisfacer las necesidades de la red neumática de la planta. El proceso propio de comprimir el aire genera un calentamiento del equipo, que debe ser controlado para mantenerlo funcionando en su punto de operación óptimo.

El calentamiento de los compresores se está regulando mediante una torre de enfriamiento, situada en la azotea de la planta. Ésta cuenta con un sistema manual de contactores (*controlador*) que lo mantiene funcionando siempre al máximo de su capacidad.

Además este controlador, no cuenta con la posibilidad de indicar de manera remota si está funcionando correctamente o si ha sucedido algún problema en el proceso de enfriamiento, de modo que si ocurre un desperfecto sólo es posible detectarlo si alguien se encuentra cerca del enfriador ó en el peor de los casos mediante las consecuencias que este desperfecto pueda tener en el sistema.

Es por este motivo; que se necesita de la optimización del comportamiento del sistema de enfriamiento para los compresores aire existente; para aumentar la eficiencia energética de éste (*reducir costos económicos y hacer un uso eficiente de la energía aplicada en el proceso*), de manera que se observe una mejoría en el proceso.

## **1.2. Solución propuesta**

A la hora de proponer una solución; que permitiera solventar este problema, se tomaron en cuenta los aspectos que en principio establecen dicha necesidad. De modo que al realizar el diseño la solución fuera acorde con los estándares utilizados por la compañía.

También se pone atención al hecho que se va trabajar en un ambiente industrial; donde los dispositivos a utilizar tienen que soportar condiciones de trabajo extremas (*polvo, agua, vapores, vibración, altas temperaturas*), de modo que se debe trabajar con dispositivos aplicación industrial, estos deben contar con cierto nivel de inmunidad a estas condiciones.

Dado que ya se cuenta con una red industrial, destinada al control y monitorización de los procesos internos de la producción de la empresa. Se implementa la solución del proyecto haciendo uso de esta red, valiéndose dispositivos de control automático compatibles con Ethernet (*IEEE 802.3*).

En un controlador industrial *PAC*, se programa el algoritmo de control automático en lógica difusa. Además de regir el comportamiento de la torre de enfriamiento con el algoritmo implementado, el *PAC* realiza tareas de comunicación con los demás dispositivos dentro del sistema de control distribuido implementado.

## **2. Metas y objetivos**

### **2.1. Meta**

Optimizar el comportamiento del sistema de enfriamiento de los compresores de aire, de manera que se permita aumentar la eficiencia energética de éste.

### **2.2. Objetivo general**

Diseñar e implementar un sistema de control y monitorización del comportamiento del sistema de enfriamiento de compresores de aire; tomando en cuenta los factores que afectan su funcionamiento actual, de modo que su operación sea tanto eficiente como segura.

### **2.3. Objetivos específicos**

- Realizar un estudio minucioso del sistema de enfriamiento existente, con la finalidad de determinar el o los factores más importantes que influyen en el proceso.
- Implementar un algoritmo de control automático, que tome en cuenta las variables significativas del sistema de enfriamiento para mejorar su desempeño.
- Realizar un análisis comparativo entre el rendimiento del sistema existente y el proyectado, de modo que sirva para hacer las mejoras y actualizaciones que se consideren necesarias.
- Implementar en el sistema una interfaz humano/máquina, que permita realizar una monitorización del funcionamiento de forma remota.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. Sistema de enfriamiento

La gran mayoría de las máquinas de empaque y procesos de producción de Dos Pinos necesitan del aire comprimido para funcionar y así mantener la cadena de producción operando.

Para mantener la presión de aire constante en 7 bar (105 psi); dentro de la planta del Coyoil de Alajuela, los ingenieros de Dos Pinos diseñaron una red neumática con tres compresores centrífugos.

En éstos, una capa de aceite lubrica las partes móviles y además realiza un sello para mantener el aire de entrada dentro de la cámara de compresión y generar la compresión de este gas.



Figura 3.1. Sala de compresores de aire

En el proceso de compresión; el aire alcanza temperaturas muy elevadas (*mayores a 100° C*). Mantener el aceite en una temperatura baja (*entre 20 y 30° C*); ayuda a evitar las pérdidas de eficiencia del compresor, pues a mayor temperatura de trabajo la eficiencia disminuye. [\[21, 22, 25\]](#)

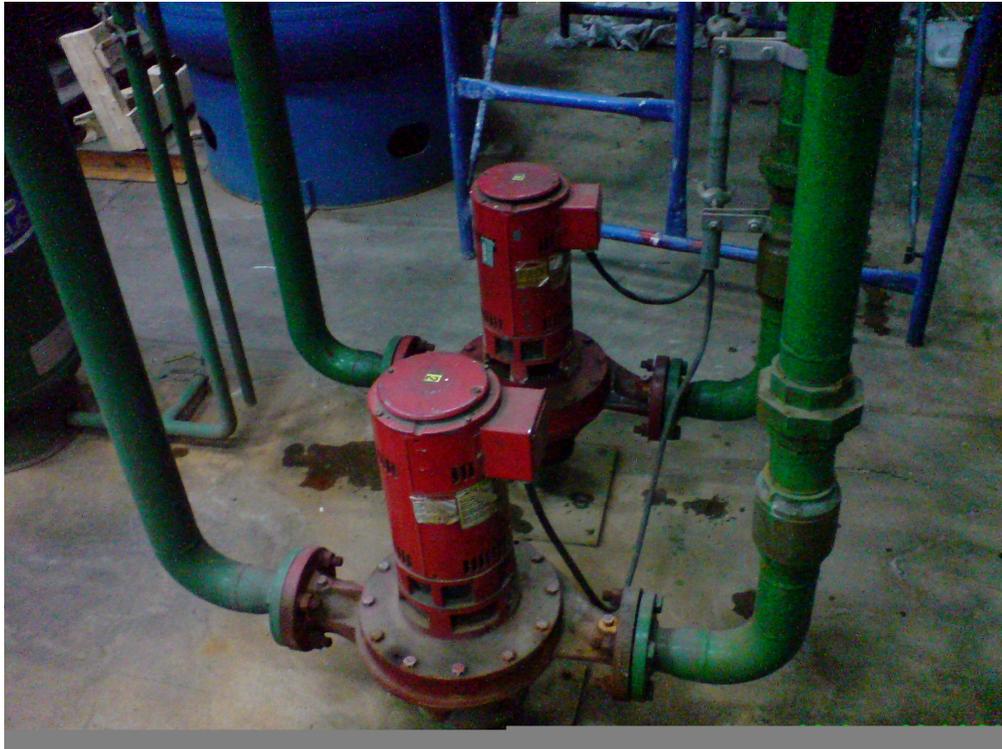
Al transferir energía térmica del aire comprimido al aceite, se mantiene en un rango de operación estable que permite al compresor operar por largos periodos de tiempo. Pero el aceite debe estar siendo enfriado constantemente para evitar un fallo mayor en la red neumática.



**Figura 3.2.** Enfriadores de aceite

Durante el desarrollo del proyecto; la red neumática fue optimizada de modo que se pudiera reducir el tiempo de operación de los compresores y así reducir la temperatura de éstos y ayudar al mejor comportamiento del sistema de enfriamiento.

Se agregaron un par de tanques con una capacidad de 1500 galones cada uno y se conectaron los extremos de la red para formar un anillo a presión constante, ya que anteriormente éstos presentaban variaciones en la presión a lo largo de la red.



**Figura 3.3.** Sistema de bombeo de agua de enfriamiento

Un sistema de bombeo permite que el agua de enfriamiento esté circulando constantemente por los enfriadores de aceite y la torre de enfriamiento; tal como se realiza en el sistema de enfriamiento de un automóvil (*bomba de agua, radiador, motor de combustión interna*).

La sala de compresores se encuentra en el sótano de la planta de producción y la torre de enfriamiento en la azotea (2 pisos arriba), así que este sistema de bombeo está calculado para propulsar el agua hasta el techo y de ahí ésta baja por gravedad.



**Figura 3.4.** Torre de enfriamiento de agua

Dentro de la torre de enfriamiento se encuentran una serie de tuberías que conforman un intercambiador de calor, que permite transferir la mayor cantidad de calor del agua que circula por dentro de la tubería.

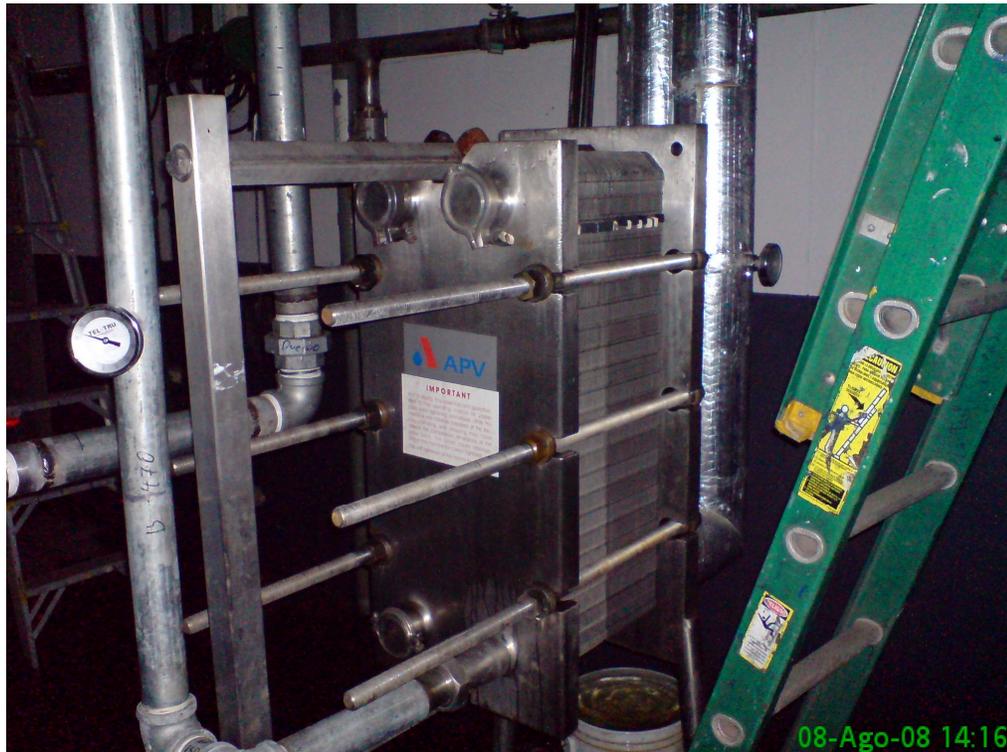
Este proceso de transferencia de calor se lleva a cabo por conducción (*paredes de las tuberías y el agua circulante*) y por convección (*flujo de aire cruzado sobre la tubería*).



**Figura 3.5.** Banco de tubos alternados del intercambiador de calor

Una bomba de agua rocía el exterior las tuberías del intercambiador con agua fría; con el objetivo de aumentar la velocidad de transferencia de calor entre el agua caliente que circula dentro de la torre y las paredes de las tuberías de ésta (*cambio de capacidad térmica*).

Dos ventiladores centrífugos generan un flujo de aire; el cual ingresa al interior del intercambiador de calor y choca con la tubería formando un ángulo de  $90^\circ$  (*flujo cruzado*), con lo que se transfiere el calor de la superficie caliente de las tuberías al aire circundante.



**Figura 3.6.** Sistema auxiliar de enfriamiento de agua

Un sistema auxiliar de enfriamiento se encuentra conectado a la línea de agua; para reducir la temperatura un tanto más, antes de ingresar a los enfriadores de aceite de los compresores.

### 3.2. Transferencia de calor

La transferencia de calor, es el fenómeno físico que se ocurre cuando la energía térmica fluye de un cuerpo caliente a uno con menor temperatura. Cuando un objeto o fluido, se encuentra a una temperatura diferente a la temperatura del cuerpo que lo rodea; éste transfiere su energía térmica, intenta mantener un equilibrio entre ambos cuerpos. [40]

Según la segunda ley de la termodinámica, la transferencia de calor siempre va a ocurrir desde un cuerpo caliente hacia uno más frío. [15] Mientras que exista esa diferencia de temperaturas entre ambos objetos, la transferencia de calor entre ellos no se va detener, sólo se puede dar en menor rango.

La cantidad de calor que se transfiera por unidad de tiempo; corresponde al rango de transferencia de calor, representado por

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad ; \dot{m} = \rho V A_c \quad (3.1)$$

donde  $\dot{Q}$  corresponde a velocidad de transferencia de calor,  $\dot{m}$  el flujo másico, el calor específico  $C_p$  (a presión constante), el cambio de temperatura  $\Delta T$ ,  $\rho$  la densidad, la velocidad del fluido  $V$  y el área  $A_c$  transversal.

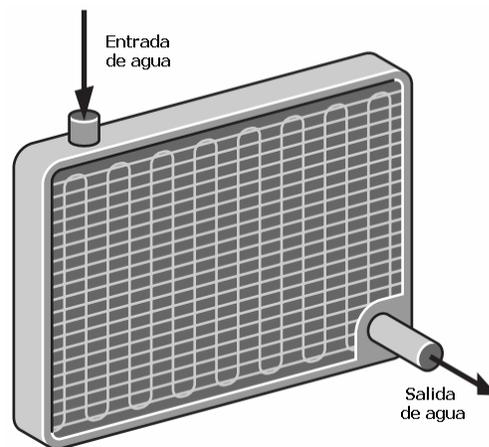
En la vida cotidiana, el concepto de transferencia de calor es muy utilizado sin tomar particular interés a lo que se hace. Por ejemplo, si la temperatura ambiente baja rápidamente, la mayoría de las personas se abriga para reducir la tasa de transferencia de calor entre el cuerpo y el medio ambiente, con lo se mantiene un cierto confort térmico.

La transferencia de calor, es de particular interés cuando se intenta entender y controlar el flujo de calor en un intercambiador de calor u otro dispositivo similar.

En el estudio de la transferencia de calor, se ha definido que el cambio energético ocurre mediante conducción, convección, radiación y las posibles combinaciones de éstas.

En el sistema de enfriamiento del agua de los compresores de aire; el estudio de la transferencia de calor del sistema es de vital importancia para optimizar el uso de los recursos disponibles para controlar la tasa de cambio de temperatura.

La torre de enfriamiento, corresponde entonces a un intercambiador de calor; el cual es un dispositivo diseñado con el fin de transferir el calor del fluido interno (*agua*) al fluido externo (*aire*). Estos dos fluidos están separados por una pared sólida que impide que se mezclen o estén en contacto directo. [\[15, 16, 17, 19\]](#)



**Figura 3.7.** Radiador automotriz [\[15\]](#)

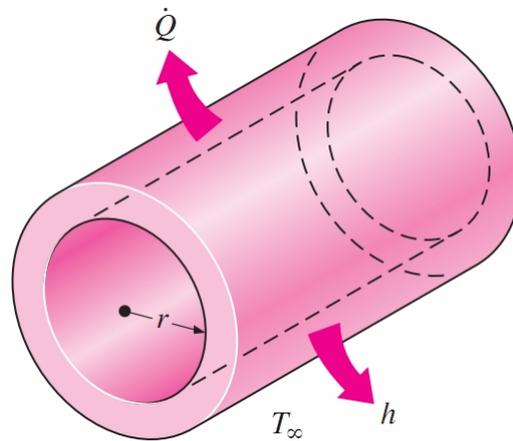
Este tipo de intercambiador; sigue el mismo principio que el utilizado en el radiador de un automóvil, donde el refrigerante caliente del radiador es enfriado por el flujo de aire que circula la superficie de las rejillas del radiador. El flujo de aire fluye en ángulo recto con respecto al intercambiador; lo que le da el nombre de intercambiador de flujo cruzado. La conducción y convección de calor juegan un papel importante en el entendimiento del funcionamiento. [\[31, 33, 35, 38\]](#)

### 3.2.1. Conducción

El proceso de conducción del enfriador; se refiere como la transferencia de energía térmica desde una región con alta temperatura a otra con menor temperatura.

Estas regiones están en comunicación molecular directa; mediante los impactos elásticos de los átomos que vibran contra otros o de un electrón que se mueve entre átomos. [15, 16]

Este fenómeno se da en mayor medida en los sólidos; ya que el sus átomos se encuentran mucho más juntos, lo que permite se presente una mayor transferencia de energía térmica que en los líquidos o gases.



**Figura 3.8.** Flujo térmico por conducción en una tubería [15]

Entre el agua utilizada como refrigerante y la superficie interior del banco de tubos alternados; se da un contacto que permite el paso de la energía térmica transportada por el agua hacia las paredes de los tubos.

La diferencia térmica existente permite que el calor fluya hacia la superficie exterior de los tubos que se encuentra a menor temperatura.

La ley física que rige la conducción de calor; es conocida como ley de Fourier. Establece que la tasa de transferencia es proporcional al inverso del gradiente de temperatura a lo largo del material. [\[15, 16\]](#)

$$\dot{Q}_{Cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

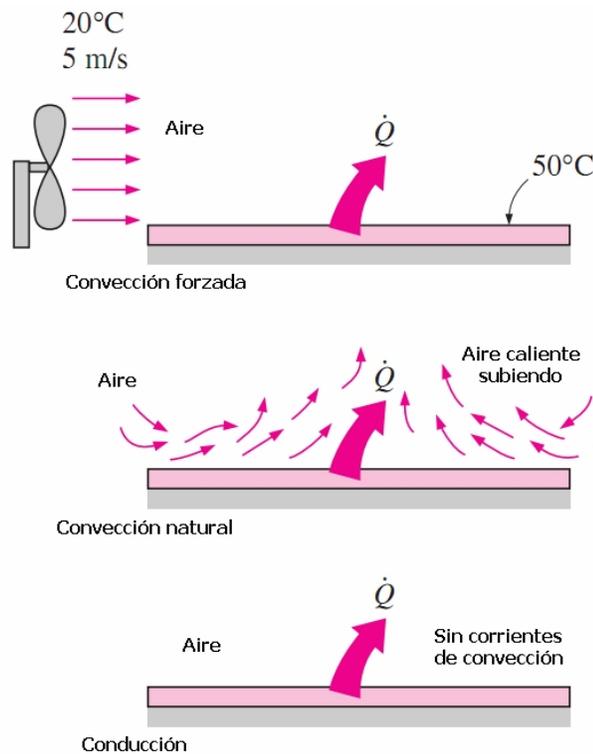
donde  $k$  es la conductividad térmica del material, el área normal a la dirección de la transferencia de calor  $A$  y  $\frac{dT}{dx}$  el gradiente de temperatura respecto a la distancia.

### 3.2.2. Convección

Es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido adyacente (*líquido o gas*) en movimiento. Éste combina los efectos de la conducción y el movimiento del fluido.

Entre más rápido se mueva el fluido adyacente; mayor será la transferencia por convección. Si por algún motivo, el fluido dejara de moverse, la transferencia se daría por pura conducción. [15, 16]

El movimiento del fluido permite mejorar la transferencia entre la superficie sólida y el fluido pero también complica la determinación de la tasa de transferencia por convección.



**Figura 3.9.** Tipos de convección [15]

Debido a la complejidad que presenta el cálculo de transferencia de calor por convección; la tasa de transferencia es aproximada a una proporción de la diferencia de temperatura. A ésta se le conoce como la ley del enfriamiento de Newton [\[15\]](#)

$$\dot{Q}_{Conv} = hA_S (T_S - T_\infty) \quad (3.3)$$

donde  $h$  corresponde al coeficiente de transferencia de calor por convección, el área de la superficie sobre la cual se da la convección  $A_S$ , la temperatura de la superficie  $T_S$  y  $T_\infty$  la temperatura del fluido en contacto con la superficie.

El coeficiente de convección; es un parámetro calculado experimentalmente, que depende de todas las variables que influyen en el proceso de convección (*geometría de la superficie, naturaleza del movimiento del fluido y sus propiedades, velocidad del fluido*). Comúnmente se divide en dos categorías: convección natural y convección forzada. [\[15\]](#)

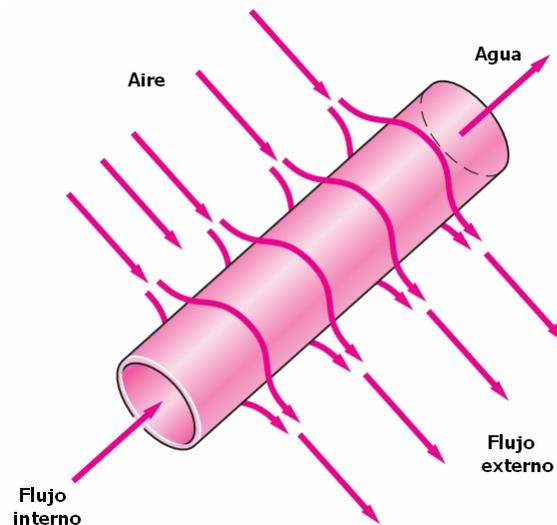
### **Convección natural**

En la convección natural; el mecanismo de conducción ocurre por diferencias en la densidad del fluido circundante debido a los gradientes de temperatura. El fluido adyacente a la superficie caliente recibe calor; éste se vuelve menos denso por lo que se eleva y un nuevo fluido de los alrededores (*más frío*) toma su lugar.

Éste nuevo fluido es calentado y el proceso continúa, formando entonces las llamadas corrientes de convección. En este proceso toma parte la fuerza boyante, como resultado de la diferencia de densidad del fluido. [15] Cuando el fluido que subió al ser calentado, se enfría y recupera su densidad original baja para seguir el proceso.

### Convección forzada

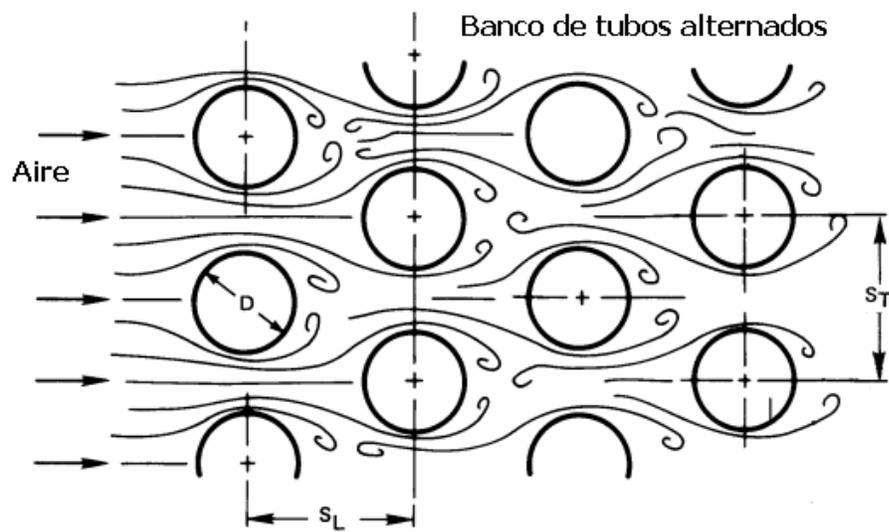
En este mecanismo de convección, una fuente externa (*bomba, ventilador*) pone en movimiento el fluido y se acelera el proceso de convección. La velocidad de movimiento del fluido circundante es proporcional a la cantidad de calor extraído de la superficie en contacto. [15, 16]



**Figura 3.10.** Flujo de agua caliente enfriado por aire [15]

El cambio en la velocidad del fluido adyacente, cambia el valor del coeficiente de convección  $h$ ; hecho importante a la hora de modificar la tasa de transferencia de calor del intercambiador a controlar.

La variación en la velocidad del fluido externo (*aire*), genera turbulencia pues aumenta la presión interna en la cara frontal del haz de tubos y se disminuye la presión en la cara posterior. Esta turbulencia ayuda a mejorar el índice de transferencia de calor por convección. [\[15, 16, 17, 19\]](#)



**Figura 3.11.** Flujo turbulento en banco de tubos alternados [\[16\]](#)

### 3.3. Lógica difusa

El ingeniero iraní (*radicado en Estados Unidos*) Lotfali Askar Zadeh; fue el primero en proponer la lógica difusa, introduciendo los conceptos de variables lingüísticas, conjuntos difusos y grado de membresía en sus publicaciones entre 1965 y 1975 en la Universidad de California, Berkeley. Este trabajo le valió ser conocido como el padre de la lógica difusa. [\[26\]](#)

Basándose en el trabajo realizado por Zadeh; el ingeniero inglés Ebrahim Mamdani, diseñó el primer sistema de control difuso para un motor de vapor en 1974. Mamdani diseñó un controlador basado en reglas; tomando como referencia, la experiencia de un operador humano para mantener el motor de vapor a velocidad y presión constante. Este sería el primer sistema de control difuso implementado.

Posteriormente los ingenieros japoneses Seiji Yasunobu y Soji Miyamoto trabajando para Hitachi, diseñaron un sistema de control difuso para el tren de la ciudad de Sendai, Japón. Éste controlaba la aceleración y frenado en 1987.

Actualmente los sistemas de lógica difusa, son utilizados ampliamente en múltiples campos de la ingeniería, como sistemas de control automático, la industria automotriz, identificación de sistemas, reconocimiento de patrones, motores de búsqueda (*Internet*) y muchas otras aplicaciones. [\[41, 42\]](#)

La lógica difusa proporciona una manera simple y elegante de obtener una conclusión a partir de información de entrada, ambigua, imprecisa o incompleta. A diferencia de la lógica convencional; donde se cuenta con información bien definida y precisa para tomar la conclusión.

Una lógica basada en sólo dos valores reales (*verdadero o falso*) resulta bastante inadecuada, cuando de describir el razonamiento humano se trata. En general; para el ser humano no existen sólo blanco o negro, sino una infinita gama de grises, como lo expresaría Platón siglos antes que Zadeh.

### **3.3.1. Fundamentos de lógica difusa**

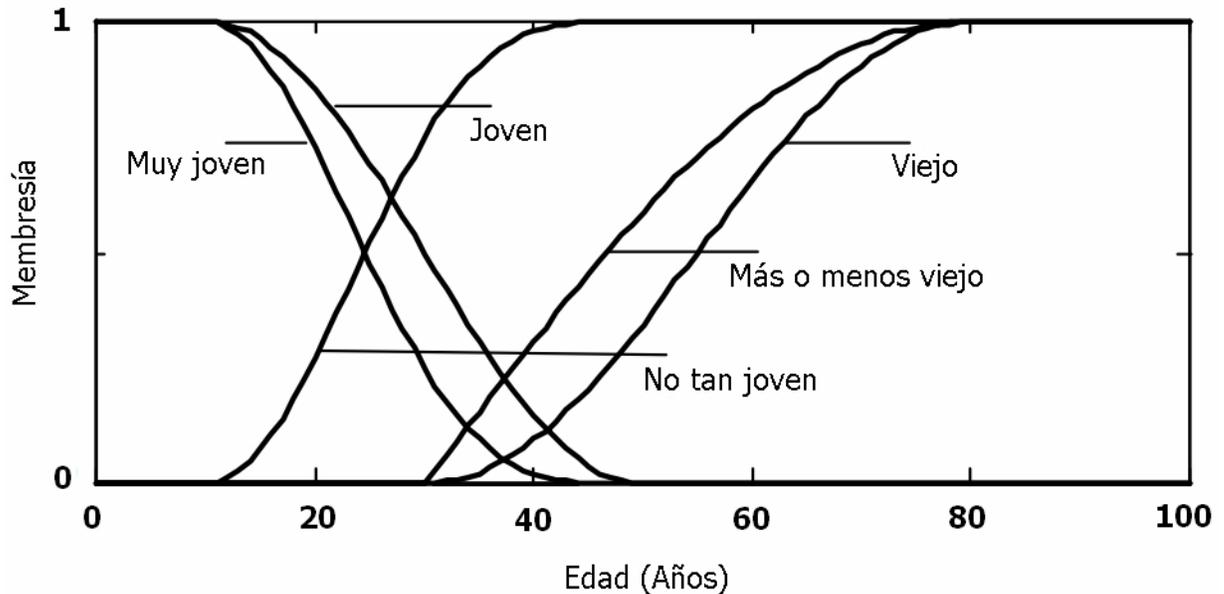
Con frecuencia, las diferentes clases de objetos encontrados en la vida real no tienen un criterio preciso de pertenencia (*membresía*). Por ejemplo; la clase de animales incluye a los animales domésticos y de granja, pero no a plantas o árboles, pero otros animales como los peces o anfibios presentan una ambigua pertenencia a la clase de los animales. [\[8, 9, 10, 11\]](#)

Estas clases juegan un papel importante en la forma de pensar del humano promedio (*reconocimiento de patrones, comunicación de información y abstracción*); puesto que la lógica difusa se basa en variables lingüísticas y la forma de utilizarlas como lo haría un ser humano, se hace necesario definir los conceptos básicos que la gobiernan.

### **Conjuntos difusos**

El concepto de conjunto difuso, dista del concepto matemático de conjunto. La teoría de conjuntos fue estudiada en principio por el matemático alemán Georg Ferdinand Ludwig Philipp Cantor (1845 ~ 1918). En la actualidad, muchos matemáticos piensan que es posible expresar mucha (*si no toda*) la matemática en términos de la teoría de conjuntos. [\[28\]](#)

Según L. Zadeh, los criterios para definir un conjunto pueden ser muchos y muy variados. Por ejemplo el conjunto de las personas jóvenes; un bebé de un año encaja perfectamente en este conjunto, así como un anciano de 100 años no pertenece a este conjunto. De igual manera se puede encontrar un conjunto para cada edad. [8, 9]



**Figura 3.12.** Conjuntos difusos definidos por la edad

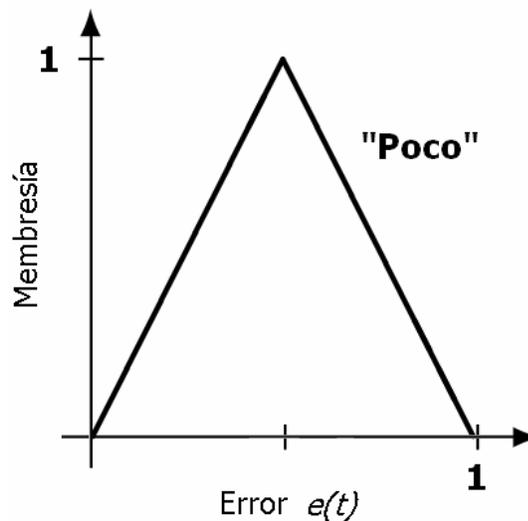
De igual manera el reporte del tiempo es difuso (*altas temperaturas, vientos fuertes o días soleados*). Zadeh propuso un grado de membresía, mismo que permite un cambio gradual (*en lugar de abrupto*) entre la pertenencia o no a un conjunto. Este grado de membresía se representa con números reales entre 0 y 1, denotados por la letra griega  $\mu$ . Entre mayor sea el valor numérico, mayor será el grado de membresía. Si  $\mu = 1$ , se dice que el elemento tiene una membresía total al conjunto difuso.

Este grado de membresía se convierte entonces en una precisa, pero subjetiva medida que depende del contexto en que se encuentre.

### Funciones de membresía

En lógica difusa, una función de membresía corresponde a la generalización del indicador de una función en conjuntos clásicos. Esta representa el grado de verdad que cierto valor presenta dentro de una variable lingüística definida.

Este grado de verdad no debe confundirse con una probabilidad, ya que son conceptualmente diferentes, pues en lógica difusa el grado de verdad representa membresía a conjuntos difusos, no la probabilidad de que se de un evento o una condición. Las funciones de membresía son presentadas por primera vez en 1965, por L. Zadeh en su documento sobre conjuntos difusos. [\[10, 11\]](#)



**Figura 3.13.** Función de membresía para el valor lingüístico "Poco"

Para entender mejor el modo en que funciona una función de membresía, se analiza como se interpretan los diferentes valores de error  $e(t)$ .

- Si  $e(t) \leq 0$  entonces  $\mu(e(t)) = 0$ ; indicando que este valor no corresponde a "Poco", pero puede pertenecer a otro conjunto difuso.
- Si  $e(t) = 0.25$  entonces  $\mu(0.25) = 0.5$ ; este valor corresponde a la mitad de "Poco".

- Si  $e(t) = 0.5$  entonces  $\mu(0.25) = 1$ ; este valor corresponde por completo al conjunto "Poco".
- Si  $e(t) \geq 1$  entonces  $\mu(e(t)) = 0$ ; indicando que este valor no corresponde a "Poco", pero puede pertenecer a otro conjunto difuso.

La función de membresía cuantifica; de manera continua, cuales valores de  $e(t)$  pertenecen (*son miembros de*) al conjunto de valores que corresponden a "Poco".

La función presentada en el ejemplo; no es la única forma que pueden tomar las funciones de membresía, éstas pueden ser una campana de Gauss, un trapecoide y muchas otras.

### Operaciones con conjuntos difusos

Teniendo en cuenta como se pueden modelar conceptos difusos usando los conjuntos difusos y como representarlos; se puede deducir un mecanismo que permita realizar trabajo matemático con éstos (*como se haría con conjuntos reales clásicos*). Operaciones como intersección, unión y complemento; bien conocidos de la teoría clásica, pueden utilizarse también con lógica difusa. [\[8, 9, 10, 11\]](#)

#### 1. Intersección

Si se tienen dos conjuntos ordinarios  $M_1$  y  $M_2$ , un elemento  $x$  pertenecerá a la intersección de estos conjuntos, si y solo si  $x$  pertenece a ambos conjuntos  $M_1$  y  $M_2$ . Si  $x$  pertenece a la intersección depende solo del grado de membresía de  $x$  dentro de los conjuntos

$$x \in M_1 \cap M_2 \quad \Leftrightarrow \quad x \in M_1 \wedge x \in M_2 \quad (3.4)$$

Para dos conjuntos difusos  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , se asume que la pertenencia del elemento  $x$  a la intersección de éstos depende del grado de membresía de  $x$  a ambos conjuntos. El grado de membresía  $\mu(x)$  corresponde al grado verdad que dicho elemento tenga dentro de ambos conjuntos. Se puede decir que la intersección corresponde a la función lógica AND, tomando como válido el mínimo grado de membresía.

$$(\mu_1 \cap_t \mu_2)(x) = t(\mu_1(x), \mu_2(x)) \quad (3.5)$$

## 2. Unión

De igual manera que se define la intersección, se puede llegar al concepto de unión en conjuntos difusos

$$x \in M_1 \cup M_2 \quad \Leftrightarrow \quad x \in M_1 \vee x \in M_2 \quad (3.6)$$

Para dos conjuntos difusos  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , se asume que la pertenencia del elemento  $x$  a la unión de éstos depende del grado de membresía de  $x$  a cada uno de los conjuntos. El grado de membresía  $\mu(x)$  corresponde al grado verdad que dicho elemento tenga dentro cada conjunto. Se puede decir que la intersección corresponde a la función lógica OR, tomando como válido el máximo grado de membresía.

$$(\mu_1 \cup_s \mu_2)(x) = s(\mu_1(x), \mu_2(x)) \quad (3.7)$$

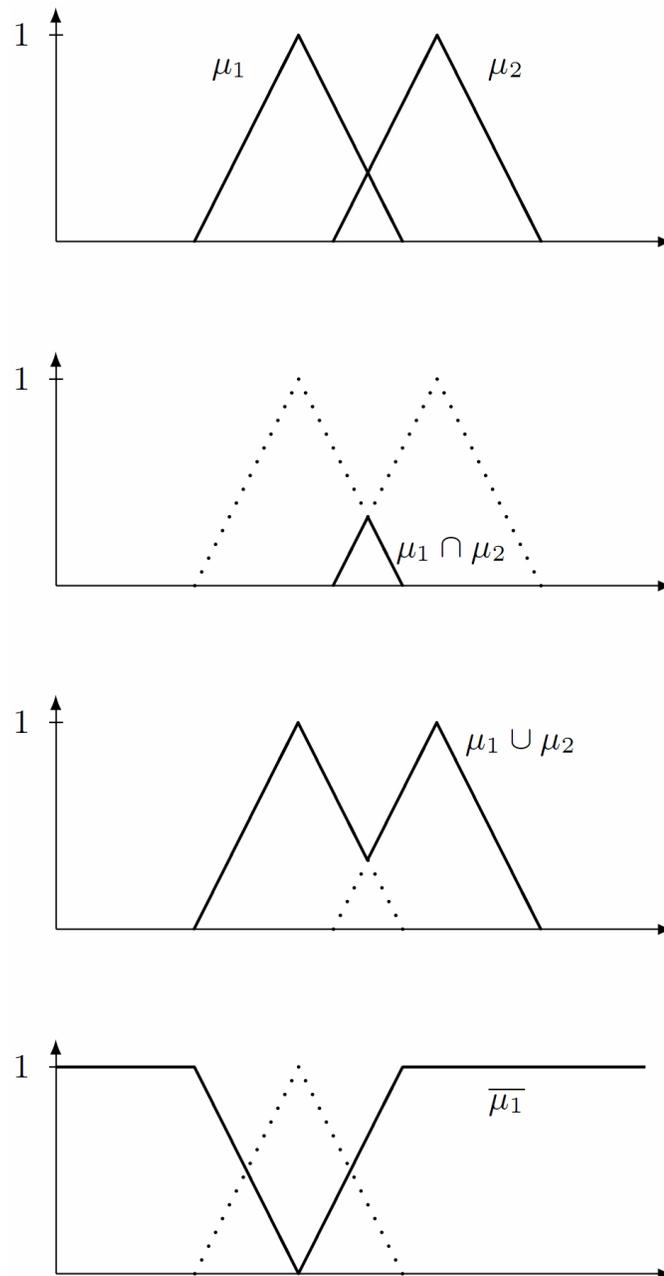
## 3. Complemento

El complemento se deriva de la fórmula

$$x \in \bar{M} \quad \Leftrightarrow \quad \neg(x \in M) \quad (3.8)$$

Agregando la función de verdad  $\omega_{\neg}(a) = 1 - a$  a la negación, se obtiene el conjunto difuso resultante como complemento de conjunto  $\mu$

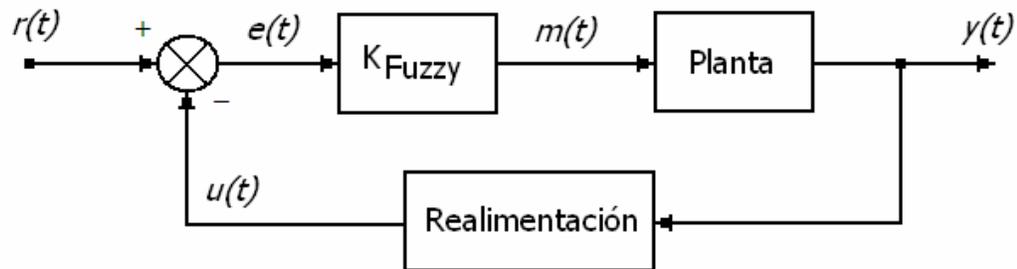
$$\overline{\mu_1(x)} = 1 - \mu_1(x) \quad (3.9)$$



**Figura 3.14.** Intersección, unión y complemento para conjuntos difusos [11]

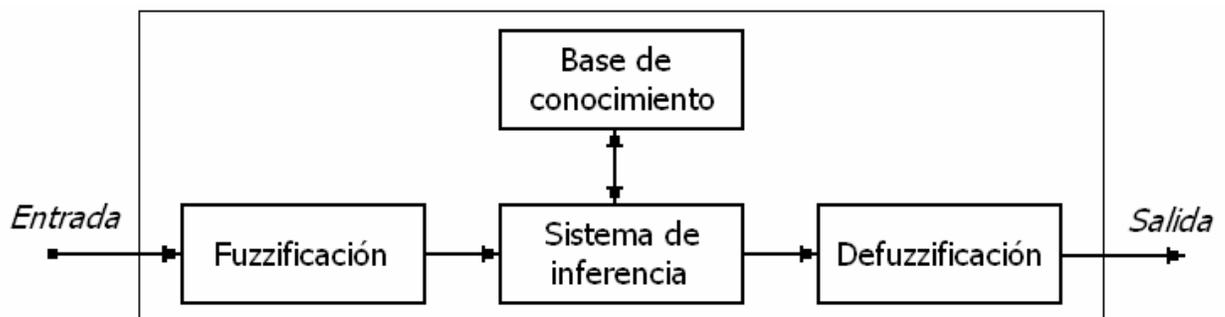
### 3.3.2. Estructura de un sistema de control difuso

Igual como se utiliza en un sistema de control automático clásico, la realimentación permite calcular el error del sistema ante el valor de referencia establecido y de esta manera el controlador difuso calcula la acción de control para corregir dicho error. [\[1, 2, 3, 37, 39\]](#)



**Figura 3.15.** Sistema de control en lógica difusa

De igual manera como un controlador PID; puede trabajarse en partes (*proporcional P, integral I, diferencial D*) para facilitar el diseño y ajuste de su comportamiento, un controlador difuso puede definirse en cuatro etapas para su mejor comprensión.



**Figura 3.16.** Estructura de un controlador difuso

En el proceso de calcular el razonamiento que establezca la relación de la entrada con la salida de un sistema de control difuso basado en reglas de control, seis pasos son esenciales para obtener dicho comportamiento.

1. Identificar las entradas, sus rangos y asignarles un nombre
2. Identificar las salidas, sus rangos y asignarles un nombre
3. Crear una función y grado de membresía para cada entrada y salida
4. Construir las reglas de control con que se va a trabajar
5. Decidir cual acción va ser ejecutada, modificando las reglas
6. Combinar las reglas y defuzzificar la salida

### **Fuzzificación**

Es el proceso de descomponer los valores de entrada y salida, en uno o varios conjuntos difusos. Se pueden aplicar varios tipos de funciones de membresía, las formas triangular o trapezoidal son las más comunes, por su facilidad para representarlas.

Cada conjunto difuso asignado va representar una región del valor de entrada o salida graficado con la membresía. Cada valor de entrada (*salida*) se compara con los conjuntos difusos y su grado de membresía para ser interpretado. Las funciones de membresía se entrelazan para permitir un mapeo suavizado del sistema.

Este proceso de fuzzificación (*codificación*) permite expresar las variables de entrada y salida del sistema en variables lingüísticas, de modo que las reglas pueden ser aplicadas en una manera más simple para expresar sistemas complejos. Lo más simple es utilizar conjuntos difusos *singleton*, ya que un solo valor se asigna al conjunto difuso. [\[28, 29\]](#)

Permite minimizar posibles cambios en las variables de entrada, suavizando el comportamiento del sistema, agregando inmunidad ante las perturbaciones.

## **Base de conocimiento**

Consiste en el modelado y entendimiento de un sistema basándose en la experiencia previa, reglas empíricas de control (*tanteo*) y estrategias utilizadas con frecuencia. Se basa en reglas heurísticas.

Una regla heurística es una implicación lógica del tipo

*if <condición> then <consecuencia>*

o en una situación de control

*if <condición> then <acción>*

Estas reglas asocian conclusiones con condiciones. Por lo tanto; la creación de la base de conocimiento consiste en la construcción de una tabla de valores de entrada y su consecuente valor de salida, utilizando valores difusos en lugar de valores numéricos. Estas no requieren asumir linealidad y pueden incorporar estrategias de control basadas en operadores humanos. [\[9, 11\]](#)

Como la base de conocimiento está basada en implementaciones lingüísticas. Una estrategia de control difusa basada en éstas realiza el control más rápido que uno basado en un modelo matemático; ya que las reglas sólo funcionan, cuando las condiciones relacionadas la activan. De igual manera agregar una mayor cantidad de reglas de control no requiere mucho esfuerzo computacional.

## **Sistema de inferencia**

Una conexión entre causa y efecto o una condición y una consecuencia se hace utilizando el razonamiento lógico. Este razonamiento puede expresarse por una inferencia lógica o por la evaluación de las entradas para llegar a una conclusión lógica.

El razonamiento humano usualmente utiliza las reglas de inferencia del tipo  
 $if \langle condición\_A = R \rangle \text{ and } \langle condición\_B = S \rangle \text{ then } \langle consecuencia\_C = T \rangle$   
 donde R, S y T son variables lingüísticas. [10]

Por ejemplo  $if \langle Temperatura = Medio \rangle \text{ then } \langle Ventilador = Rápido \rangle$ , en este caso *Medio* es una función definiendo el grado de temperatura, mientras *Rápido* es una función definiendo grados de velocidad.

Ante la sentencia  $if \langle Temperatura = Medio \rangle$  el razonamiento humano indica que se está realizando una pregunta ¿La temperatura es media? La lógica booleana tradicional tendría dos posibles respuestas sí o no. La inferencia basada en el grado de membresía  $\mu A(x)$ , indicaría cuanto pertenece un valor al conjunto en estudio. Luego tomando en cuenta las reglas, se puede inferir la respuesta.

## **Defuzzificación**

Luego de realizar el razonamiento difuso, la variable lingüística se debe pasar a un valor real. El objetivo es derivar un valor real que represente de la mejor manera el valor inferido por la variable de salida lingüística difusa. Entonces el proceso de defuzzificación (*decodificación*), es la transformación de la salida del dominio difuso al dominio real. [8, 9, 11]

Algunos métodos de defuzzificación, tienden a producir una salida integral considerando todos elementos del conjunto difuso correspondiente. Otros solo toman en cuenta los elementos que corresponden al valor máximo de las funciones de membresía resultantes.

Los siguientes métodos de defuzzificación, son de importancia práctica:

- Centro de área (*COA*), también conocido como centro de gravedad (*COG*). Este método calcula el centroide del área que representa el término difuso de salida.
- Centro del máximo (*COM*), donde sólo los picos máximos de las funciones de membresía son utilizados. El valor real decodificado se determina encontrando el lugar donde los pesos se balancean; aquí el área no tiene importancia, sólo los máximos (*singleton*) son significativos. El resultado real de salida corresponde al máximo del resultado de la inferencia en uso.
- Medio del máximo (*MOM*), se utiliza solo en algunos casos donde la aproximación *COM* no da buenos resultados. Esto ocurre cuando no se tiene un único valor máximo en la función de membresía y se debe preguntar cual de todos estos valores idénticos utilizar. [\[29\]](#)

### **3.4. Ethernet (*IEEE 802.3*)**

Ethernet es un estándar diseñado para redes de dispositivos de área local (*computadores, estaciones de trabajo, controladores industriales de automatización*); convirtiéndose en una tecnología de redes ampliamente utilizada alrededor del mundo. [\[13, 46\]](#)

Esta tecnología fue estandarizada por la comisión de redes de área local (*LAN*) del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*IEEE*), bajo el nombre de IEEE 802.3 y luego adoptada por la Organización Internacional de Estandarización (*ISO*) como ISO 8802-3, con lo cual IEEE 802.3 (*Ethernet*) es un estándar internacional de redes.

Una red diseñada bajo el estándar Ethernet debe cumplir ciertos requerimientos indispensables para asegurar su óptimo funcionamiento y desempeño.

Entre estas características se tienen: simplicidad, bajo costo de dispositivos, compatibilidad, direccionamiento flexible, equidad de acceso a la red, alta velocidad de comunicación, bajos tiempos de retardo, estabilidad de operación, fácil mantenimiento y una arquitectura en capas de operación.

El estándar Ethernet, define las características del cableado y codificación del nivel físico y los formatos de las tramas de datos del nivel de enlace de datos según lo define el modelo OSI (*Open Systems Interconnection*).

**Tabla 3.1.** Modelo OSI

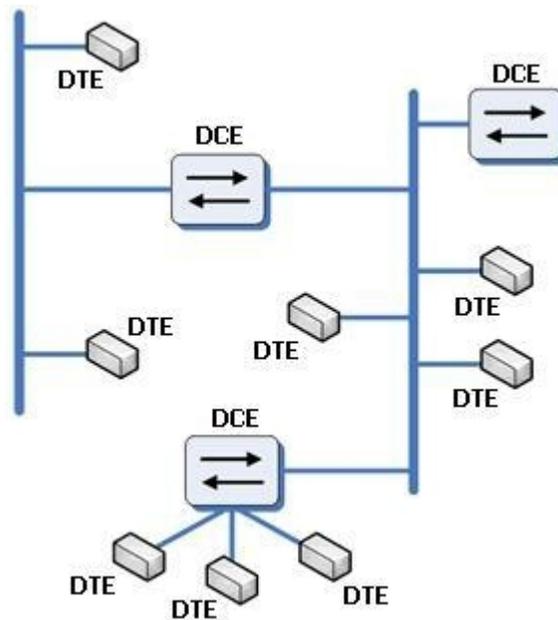
<b>Nivel</b>	<b>Función</b>
Aplicación	Servicios de red a aplicaciones
Presentación	Representación de datos
Sesión	Comunicación entre dispositivos de la red
Transporte	Conexión extremo a extremo y fiabilidad de datos
Red	Determinación de ruta e IP ( <i>Direccionamiento lógico</i> )
Enlace de datos	Direccionamiento físico ( <i>MAC y LLC</i> )
Físico	Señal y transmisión binaria

Una arquitectura de red sobre Ethernet, cuenta con elementos como las tarjetas de red, los repetidores, los puentes, los conmutadores (*switches*), los nodos de red y el medio de interconexión.

Los nodos de red se pueden clasificar como dispositivos de red DTE (*Data Terminal Equipment*) y dispositivos de red DCE (*Data Circuit-terminating Equipment*).

Los dispositivos DTE generan o son el destino de los datos transmitidos en la red; como los computadores, estaciones de trabajo, servidores de datos o controladores industriales de automatización.

Los dispositivos DCE son los intermediarios que reciben y retransmiten las tramas dentro de la red; como conmutadores (*switches*), concentradores (*hubs*), enrutadores (*routers*), repetidores o interfaces de comunicación.



**Figura 3.17.** Elementos de red Ethernet [\[13\]](#)

### 3.4.1. Principio de operación

Dentro de una arquitectura Ethernet, cada dispositivo trabaja de manera independiente del resto de dispositivos de la red. Todos los dispositivos están conectados a un canal de comunicación de señales compartido; con lo que no se necesita de dispositivo central de control de transmisión, con lo que todos los dispositivos pueden recibir la transmisión enviada por un dispositivo específico pero sólo el dispositivo de destino establecido tiene permiso de acceso a los datos transmitidos.

Ethernet presenta un algoritmo de detección de errores pero no de corrección de los mismos. Cada dispositivo se asegura su acceso al canal de comunicación utilizando un método de acceso probabilístico conocido como disputa. [\[13, 46\]](#)

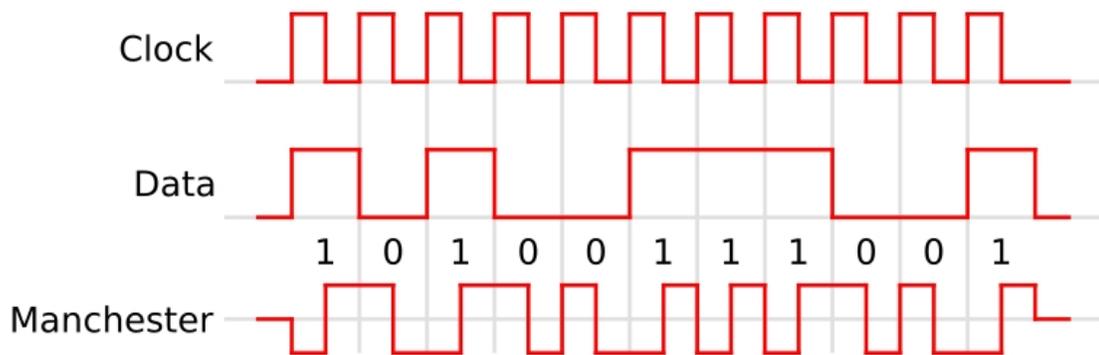
Ethernet utiliza un método de acceso al medio de transmisión por contención, donde un solo dispositivo puede transmitir a la vez. Una vez terminada esta transmisión el canal queda libre para volver a transmitir; el dispositivo se asegura que esté libre y si lo está puede iniciar la transmisión de datos como una trama Ethernet.

Después que es transmitida una trama, todos los dispositivos conectados a la red compiten por el acceso al canal; esta disputa es lo más equitativa posible y asegurar el acceso para todos, así que ningún dispositivo puede bloquear a otros dispositivos. Este sistema se conoce como CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*). [\[46, 47\]](#)

### **3.4.2. Formato de la trama Ethernet**

La trama de datos de una transmisión estándar Ethernet, corresponde a una serie de bytes organizados en 8 segmentos de datos. Estos se envían sobre el canal de comunicación en orden; de izquierda a derecha, bit a bit. Para transmitir la trama se utiliza código Manchester; donde se combinan la señal del reloj y los datos transmitidos, para auto sincronizar el flujo de datos.

La codificación Manchester utilizada permite que esta transmisión represente una forma de onda periódica, además el uso de niveles positivos y negativos en la transmisión reduce la componente de corriente directa en el medio de interconexión; ayudando a la regeneración de la señal y reduciendo pérdidas de potencia de la señal.



**Figura 3.18.** Codificación Manchester (*Ethernet*) [46]

**Tabla 3.2** Trama IEEE 802.3 (*Ethernet*)

Preámbulo	SOF	MAC Destino	MAC Origen	Tipo	Datos	Relleno	FCS
7 bytes	1 byte	6 bytes	6 bytes	2 bytes	0 ~1500 bytes	0 ~ 46 bytes	4 bytes

El segmento *Preámbulo* corresponde a 7 bytes (*56 bits*); se utiliza para sincronizar y estabilizar el medio físico antes de iniciar la transmisión de datos. El patrón del preámbulo es 10101010 (*7 veces*)

El segmento *SOF (Start Of Frame)* corresponde a 1 byte (*8 bits*) con un patrón alternado de 1 y 0; termina con dos unos consecutivos. El patrón del SOF es 10101011. Indica que el siguiente bit, es el bit más significativo de la dirección MAC de destino.

Aunque se detecte una colisión durante la emisión del preámbulo o del SOF, el emisor debe continuar enviando todos los bits de ambos hasta el fin del SOF.

El segmento *Destino*, consta de 6 bytes (*48 bits*). Indica la dirección MAC hacia la que se envía la trama. Cada dispositivo examina este campo para determinar si debe aceptar el paquete o desecharlo.

El segmento *Origen*, son 6 bytes (*48 bits*) que especifica la dirección MAC desde la cual se ha envía la trama. El dispositivo que acepta el paquete, utiliza este segmento para conocer la dirección de origen con la cual intercambiará datos.

El segmento *Tipo* es de 2 bytes (*16 bits*), identifica el protocolo de red de alto nivel asociado con el paquete o en su defecto la longitud del segmento de datos. La capa de enlace de datos interpreta este segmento.

El segmento *Datos* varía de 0 a 1500 bytes de longitud. Cada byte contiene una secuencia arbitraria de valores. Corresponde a la información recibida del nivel de red.

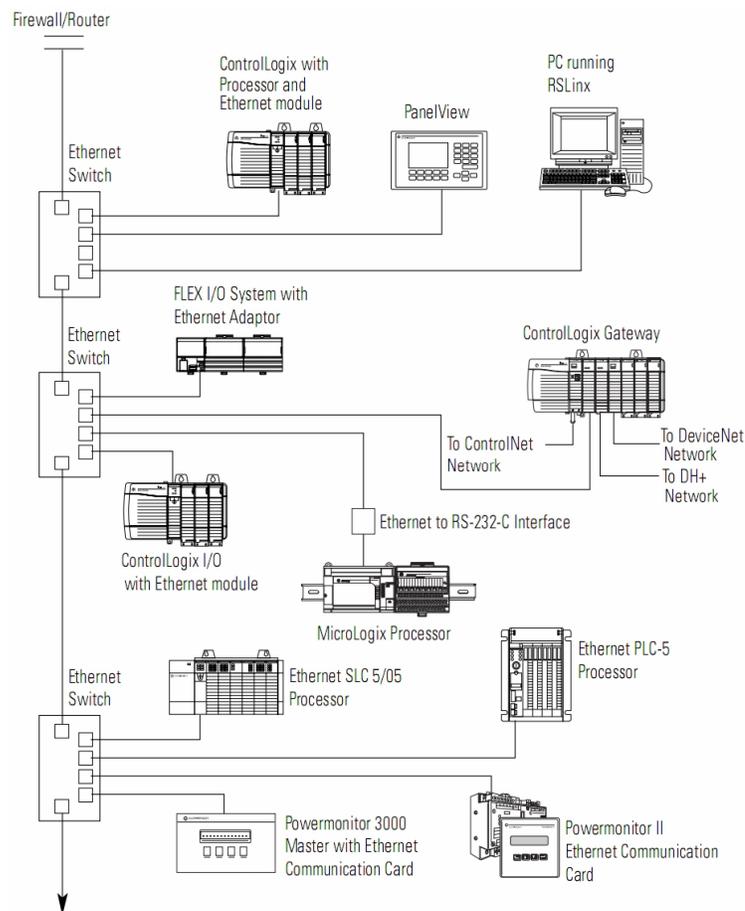
El segmento *Relleno* varía entre 0 y 46 bytes; se utiliza cuando la trama Ethernet no alcanza los 64 bytes mínimos, con el fin que no se presenten problemas de detección de colisiones si la trama es muy corta.

El segmento *FCS (Frame Check Sequence)* de 4 bytes (*32 bits*), contiene un valor de verificación CRC (*Cyclic Redundancy Check*). El emisor calcula el CRC de toda la trama; desde el segmento destino hasta el segmento FCS, suponiendo que vale 0. El receptor lo recalcula, si el valor resultante es 0, corresponde a una trama válida.

### 3.4.3. Protocolo industrial EtherNet/IP

EtherNet/IP (*Ethernet Industrial Protocol*) se le llama al protocolo de comunicación en la capa de aplicación del modelo OSI, diseñado por ODVA (*Open DeviceNet Vendors Association*). Este protocolo tiene la finalidad de trabajar directamente con dispositivos de automatización industrial.

Utiliza todos los elementos físicos y programas establecidos por Ethernet y el protocolo estándar TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*); para definir un protocolo en el nivel de aplicación de la red que permita realizar la configuración, acceso y control de dispositivos industriales destinados a la automatización de procesos. [48]



**Figura 3.19.** Red de control industrial sobre EtherNet/IP [53]

El protocolo EtherNet/IP clasifica los nodos de red con tipos predefinidos según su función específica.

1. Transferencia de datos de entrada/salida vía UDP (*User Datagram Protocol*), como mensajería implícita.
2. Carga y descarga de parámetros, puntos de operación y programas vía TCP, como mensajería explícita.
3. Por petición, cíclico y cambio de estado vía UDP.
4. Uno a uno (*Unicast*), uno a muchos (*Multicast*) y uno a todos (*Broadcast*) vía UDP.

La capa de aplicación de EtherNet/IP, se basa el protocolo CIP (*Common Industrial Protocol*), el mismo utilizado en otras redes industriales como DeviceNet o ControlNet. Puesto que EtherNet/IP, soporta tanto mensajes donde el tiempo es una variable crítica (*implícitos*) como donde el tiempo no lo es (*explícitos*); este medio puede utilizarse para aplicaciones de control como de información (*monitorización*). [\[48, 49\]](#)

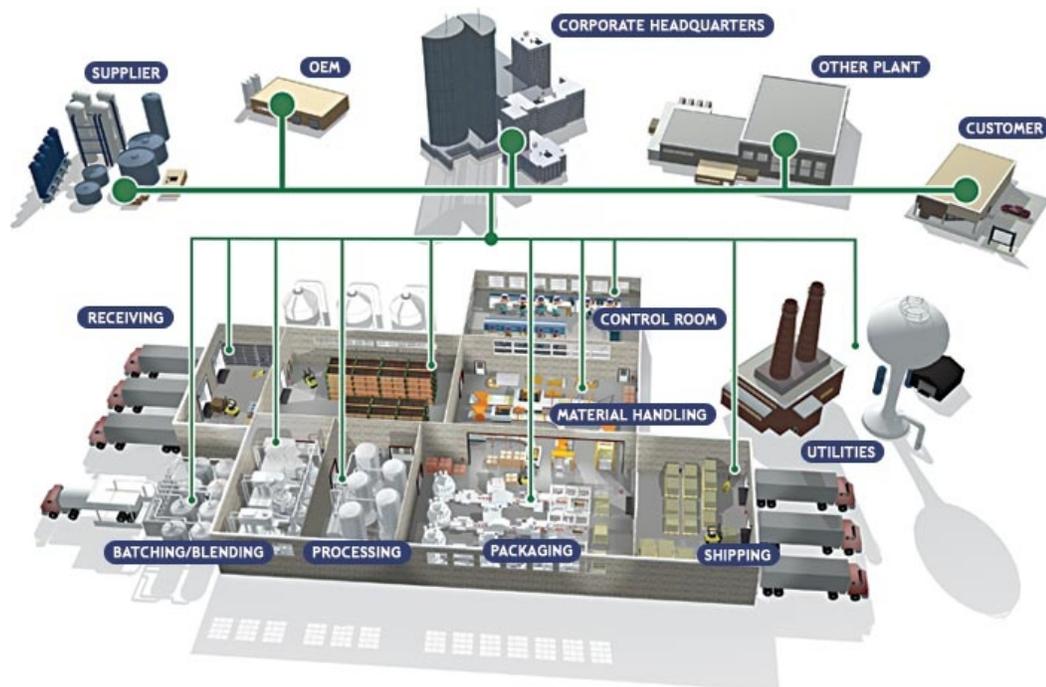
El protocolo CIP, encapsula mensajes en los protocolos TCP/UDP/IP. Esto permite a los dispositivos de la red industrial crear una ruta de datos, por donde se envía un mensaje del modulo productor al módulo consumidor. Como el módulo que produce el mensaje lo tiene almacenado, los demás módulos en la ruta de datos no necesitan almacenarlo.

EtherNet/IP utiliza este modelo productor/consumidor, con la finalidad de reducir el tráfico en la red y aumentar la velocidad de transmisión de la información. Por ejemplo en sistemas tradicionales de entrada/salida; el controlador interroga los módulos de entrada para obtener su información, al contrario en el modelo CIP el módulo de entrada produce un mensaje cuando hay un cambio de estado con lo que éste se convierte en el productor y el controlador en el consumidor. [\[52, 53\]](#)

Este conjunto de mensajes y servicios dedicados a aplicaciones de automatización (*control, sincronización, seguridad, movimiento, configuración e información*), permite a los usuarios integrar la red de control con la red corporativa e incluso con Internet. Para esto se necesitan paquetes computacionales especializados como *Wonderware* de *Invensys* o *LabVIEW* de *National Instruments*.

### 3.5. Automatización industrial

En la actualidad; una gran mayoría de las empresas de producción tienen en mayor o menor medida, procesos automatizados dentro de sus plantas. Esto les permite realizar un sin número de funciones de la empresa, lo que permite incrementar el control de calidad, la eficiencia del proceso y la productividad. [54]



**Figura 3.20.** Necesidades actuales de automatización en la industria [57]

La automatización es más que un sistema de control, comprende instrumentación industrial, sistemas de control y supervisión, sistemas de transmisión y recolección de datos y aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar las operaciones de uno o varios procesos industriales a la vez y en ciertos casos hasta el control completo de las operaciones de una planta.

Actualmente los sistemas de automatización; cuentan con la posibilidad de comunicarse, tanto con otros procesos dentro de la misma planta como con otras plantas y sus respectivas redes administrativas. Para esto se hace uso de redes basadas en Ethernet y diferentes tipos de enlaces (*cobre, fibra óptica, espectro electromagnético*).

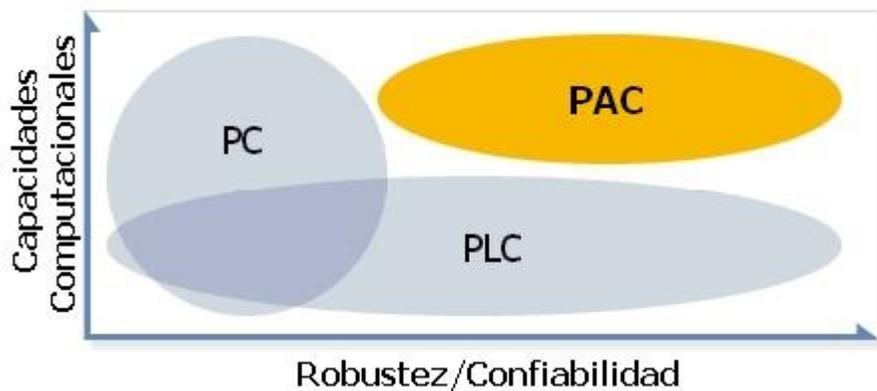
El buen desempeño de ésta red de control; debe asegurarse para evitar problemas de pérdidas de datos y sus posibles consecuencias dentro del proceso.

Una red de control industrial se ve expuesta a un ambiente extremo de trabajo; de modo que los elementos de la red deben asegurar un buen desempeño y confiabilidad del enlace, en presencia de

- Químicos peligrosos
- Altos niveles de humedad y temperatura
- Ruido electromagnético (*motores, alta tensión*)
- Vibración y golpes

### 3.5.1. Controlador de automatización programable (PAC)

Los ingenieros han estado buscando la manera de resolver el dilema entre contar con la robustez y confiabilidad de un PLC (*Programmable Logic Controller*) o con las capacidades computacionales que ofrece un computador de uso general (PC).



**Figura 3.21.** Características de un PAC [57]

Para solventar este dilema, los fabricantes de dispositivos para automatización industrial diseñaron los PAC (*Programmable Automation Controller*). Éstos combinan la robustez y confiabilidad del PLC con la funcionalidad de la PC, para realizar tareas de control. [56, 57]

Esta fusión de las mejores características de ambas tecnologías, convierten a este tipo de controlador en una solución ideal para control sofisticado y registro de datos en ambientes industriales.

**Tabla 3.3.** Comparación entre tecnologías

<b>Característica</b>	<b>PLC</b>	<b>PAC</b>	<b>PC</b>
Resistente a golpes y vibraciones	√	√	
Seguridad y locación en áreas peligrosas	√	√	
Rango industrial de temperaturas	√	√	
Sistema operativo en tiempo real	√	√	
Fuente de alimentación redundante	√	√	
<i>Drivers</i> para Windows			√
Almacenamiento no volátil		√	√
Procesador con punto flotante		√	√
<i>Software</i> de programación		√	√
Conectividad con Ethernet y la red		√	√

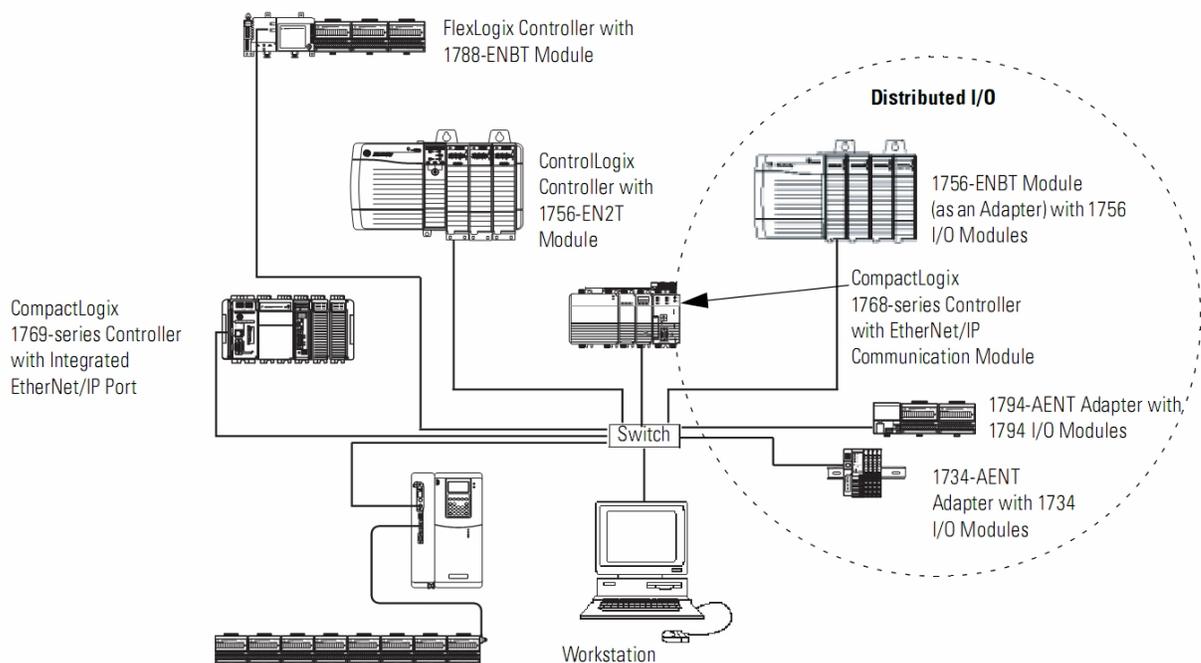
A razón de esto; los procesos de automatización pueden integrar más fácilmente dispositivos de interfaz humano/máquina (*HMI*) para realizar la visualización e interacción con un proceso en tiempo real o un sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) para la monitorización del proceso desde una sala de control.

Adicionalmente, las características de comunicación sobre los protocolos de redes como TCP/IP o SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*), permiten que los PAC transmitan datos entre el proceso de control y bases de datos que pueden ser consultados desde la red empresarial de la compañía o incluso a través de Internet. [57]

### 3.5.2. Sistema de control distribuido

Un sistema de control distribuido DCS (*Distributed Control System*), se refiere a un sistema de control; donde los elementos de control no se encuentran localizados en un solo lugar, sino que forman parte de una red. [52, 53]

Estos elementos conectados a la red permiten entonces realizar tareas de comunicación entre equipos y monitorización remota de procesos.



**Figura 3.22.** Estructura de un sistema de control distribuido Logix [54]

En un sistema distribuido; como la plataforma de control *Logix* de *Allen-Bradley*, el controlador utiliza un protocolo propietario de comunicación (*en este caso el protocolo CIP*). Los módulos de entradas/salidas forman parte del DCS. El controlador recibe la información de los módulos de entrada y envía información a los módulos de salida.

En un sistema de control distribuido, se emplea una o varias estaciones de trabajo. El sistema puede configurarse desde la estación de trabajo o directamente mediante un computador portátil conectado a cada nodo de la red de control. Un servidor puede incluirse en la red de control distribuido, para agregar características extra de registro y reporte de datos al sistema. [\[53\]](#)

## 4. Solución implementada

El sistema de control y monitorización; diseñado para la torre de enfriamiento de los compresores de aire, cuenta con las etapas necesarias para realizar esta tarea cumpliendo las exigencias de seguridad, desempeño y confiabilidad impuestas.



**Figura 4.1.** Implementación del sistema de control y monitorización

El sistema implementado utiliza la red industrial (*protocolo EtherNet/IP*) para realizar la comunicación entre los módulos de control distribuido. La etapa de control se encuentra almacenada en un controlador y la monitorización se realiza mediante una pantalla de visualización.

Se ha dotado al controlador con los algoritmos suficientes para realizar el control de forma autónoma tomando en cuenta el comportamiento del sistema de enfriamiento y la pantalla de visualización está programada de tal manera que funcione como una interfaz humano/máquina.

#### **4.1. Modelado de la torre de enfriamiento**

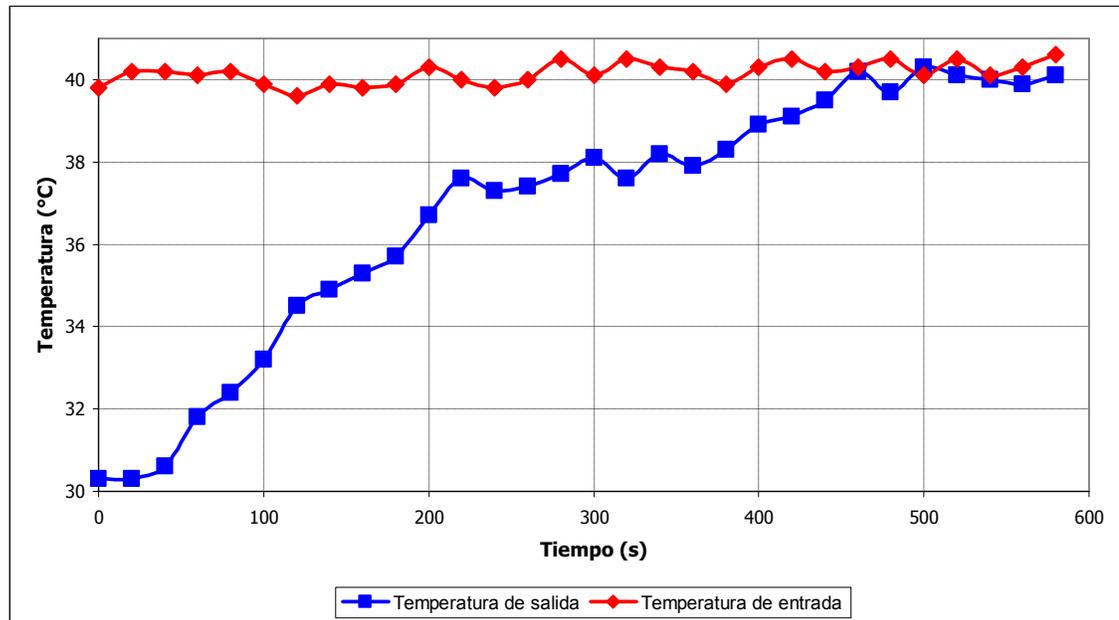
Dado que el proceso de enfriamiento del agua de enfriamiento; depende en gran medida del comportamiento que el intercambiador de calor, se procedió a realizar una investigación bibliográfica que permitiera orientar el diseño de un modelo con el cual trabajar para el proceso de diseño del sistema de control automático.

Esta revisión bibliográfica; entrega a la conclusión que el comportamiento de un intercambiador de calor es un sistema de parámetros distribuidos. Lo que hace que obtener un modelado analítico del sistema no sea una tarea sencilla; ya que se trata de un sistema no lineal variante en el tiempo.

Se procede entonces a realizar un modelo experimental, que permitiera aproximar el comportamiento del sistema a un sistema lineal y poder trabajar el sistema con las técnicas clásicas de control.

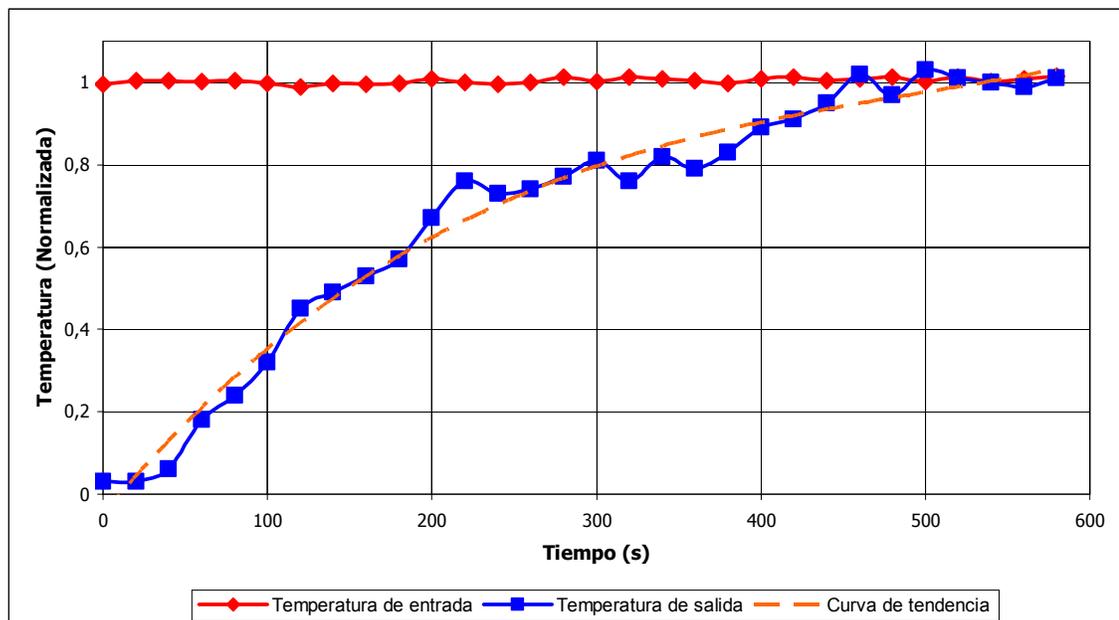
Para esto se tomaron una serie de datos de las temperaturas del agua de entrada y salida; valiéndose del sistema auxiliar de enfriamiento para simular una entrada escalón constante de 40° C, la cual es una temperatura promedio de operación del sistema. Los datos se muestrearon cada 10 segundos hasta que la tasa de transferencia de calor se normalizara en un valor cercano a los 40° C.

La toma de datos se realizó sobre la superficie de las tuberías utilizando un termómetro infrarrojo Fluke 576. Tomando en cuenta que el acero tiene un índice alto de transferencia de calor por conducción, las mediciones corresponden a la temperatura del agua que circula por dentro de la tubería.



**Figura 4.2.** Comportamiento experimental del sistema de enfriamiento

Normalizando estos datos se obtiene una curva de comportamiento experimental con la cual trabajar para crear el modelo aproximado del sistema.



**Figura 4.3.** Datos de temperatura normalizados

Como se puede notar en la figura 4.3, el sistema de enfriamiento, presenta una respuesta estable ante el escalón y un comportamiento en "S". Estas características permiten derivar un modelo de primer orden y tiempo muerto con el cual simular el comportamiento del sistema. [37]

$$G_p(s) = \frac{k \cdot e^{-s \cdot t_d}}{(s + a)} \quad (4.1)$$

Utilizando el tiempo que dura el sistema en alcanzar el 63 y 39%, se puede definir la constante de tiempo del sistema y el valor del tiempo muerto. Los datos obtenidos son  $t_{63\%} = 110$  segundos y  $t_{39\%} = 190$  segundos.

$$\begin{aligned} \tau &= 2 \cdot (t_{63\%} - t_{39\%}) \\ \tau &= 2 \cdot (190 - 110) = 160 \end{aligned} \quad (4.2)$$

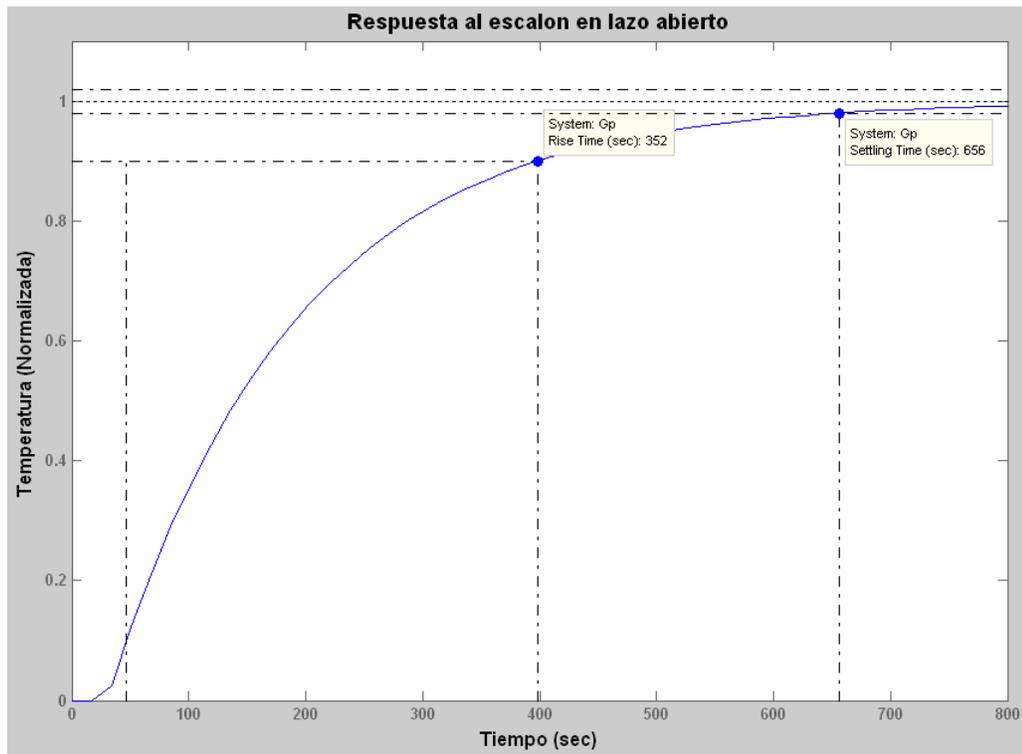
$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{\tau} \\ a &= \frac{1}{160} = 0.00625 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} k &= a \cdot \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t)) - t_i}{A} \\ k &= 0.00625 \cdot \frac{1 - 0}{1} = 0.00625 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} t_d &= t_{63\%} - (t_i + \tau) \\ t_d &= 190 - (0 + 160) = 30 \end{aligned} \quad (4.5)$$

De modo que el modelo aproximado del sistema, se representa como

$$G_P(s) \cong \frac{0.00625 \cdot e^{-30s}}{(s + 0.00625)} \quad (4.6)$$



**Figura 4.4.** Respuesta del sistema ante un escalón de temperatura

Puesto que el comportamiento de la simulación en *MATLAB* es similar al obtenido experimentalmente; lo que indica que si se trata de un sistema estable y controlable por lo que se puede proseguir con el proceso de diseño del algoritmo de control a utilizar.

## 4.2. Controlador de lógica difusa

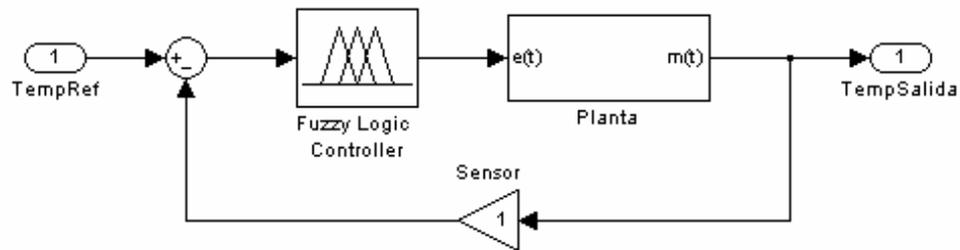
Como se observa en la aproximación de la figura 4.4; el intercambiador de calor se puede controlar con las técnicas clásicas de control. Esto en la práctica no sería del todo cierto; puesto que implementar un controlador basado en el modelo obtenido no sería adecuado.

El modelo obtenido no toma en cuenta las variables que afectan el proceso de transferencia de calor del sistema; además que la aproximación obtenida sólo corresponde al resultado de un momento del tiempo en la operación del sistema de enfriamiento y haría falta conocer un comportamiento más exacto del sistema en todo momento de su operación.

Si se implementaba un controlador clásico (*PID*), se corría el riesgo que no funcionara de manera tan adecuada como se deseaba, ya que no toma en el efecto del uso de los compresores de aire y la perturbación que esto pudiera significar en el proceso de control de la temperatura del agua de enfriamiento.

Para poder utilizar un controlador clásico hace falta un modelo analítico más cercano al real que incluye las no linealidades presentes en el proceso y las perturbaciones que el proceso de enfriamiento presenta. [\[15\]](#)

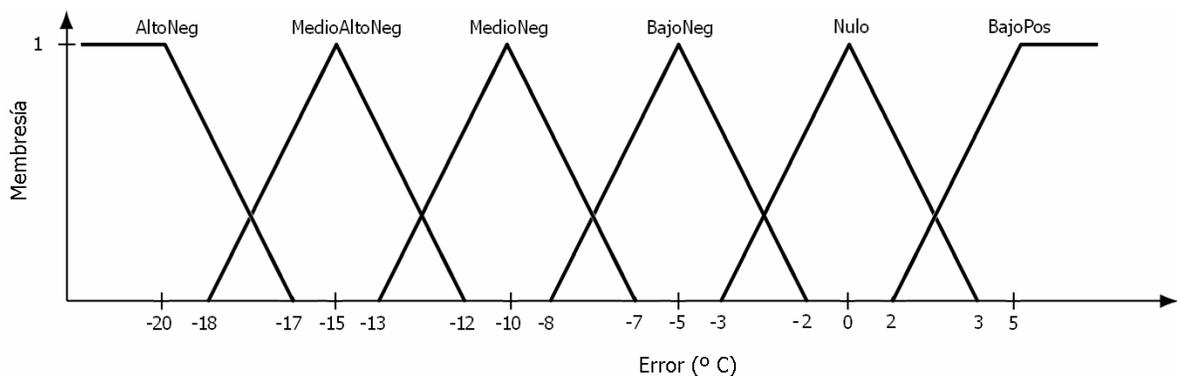
Se opta entonces por utilizar la técnica del control difuso que ha demostrado inmunidad a las perturbaciones que puedan afectar el proceso. [\[10\]](#) Un controlador difuso permite actuar de manera adecuada sobre sistemas que presentan fuertes no linealidades o que su modelo es difícil de obtener, condiciones que cumple el sistema de enfriamiento a controlar.



**Figura 4.5.** Controlador difuso implementado

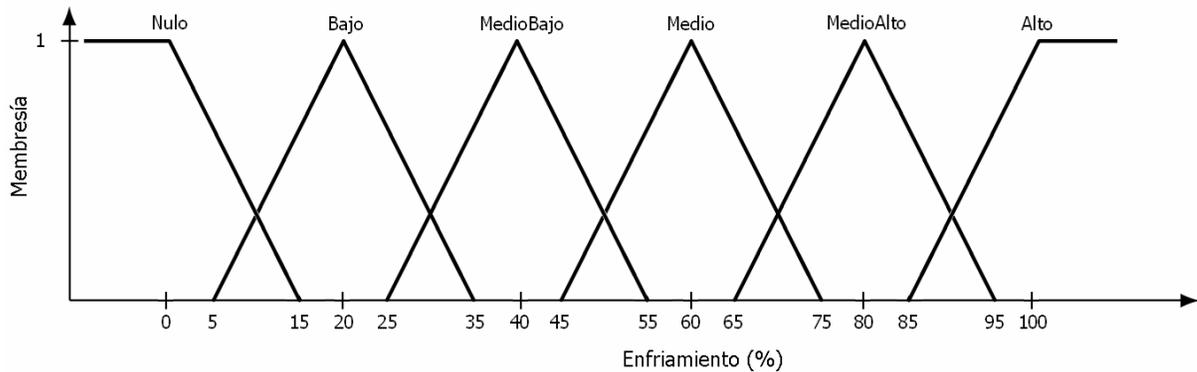
Para calcular el controlador difuso; se necesitó primero establecer los rangos de trabajo, de tal manera que se realiza un estudio del comportamiento del sistema de enfriamiento para establecer los valores y funciones de membresía tanto de entrada como de salida.

Como entrada del controlador se tiene el error del sistema, que permite cerrar el lazo de control y con éste calcular la acción de control necesaria para mantener la temperatura lo más cerca posible del valor de referencia ( $25^{\circ}\text{C}$ ).



**Figura 4.6.** Funciones de membresía del error  $e(t)$

A la salida del controlador se tiene el porcentaje de enfriamiento (*transferencia de calor*) necesario para mantener el comportamiento de la planta en la consigna.



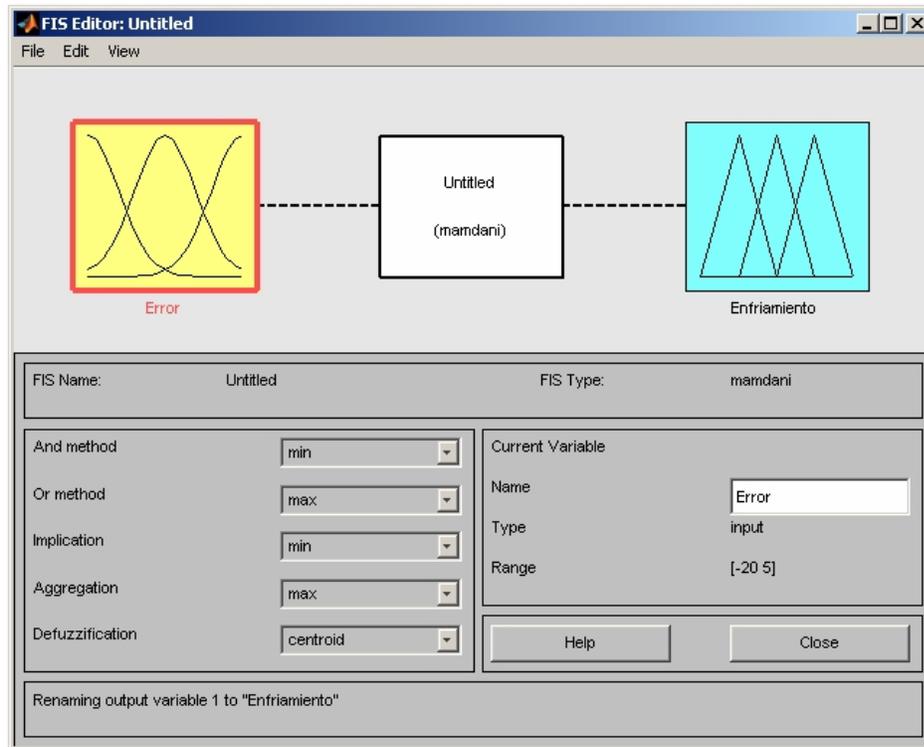
**Figura 4.7.** Funciones de membresía del enfriamiento

Con estos rangos de operación definidos, se procede a establecer las reglas de control y con esto dotar al controlador con la base de conocimiento.

**Tabla 4.1.** Conjunto de reglas de control

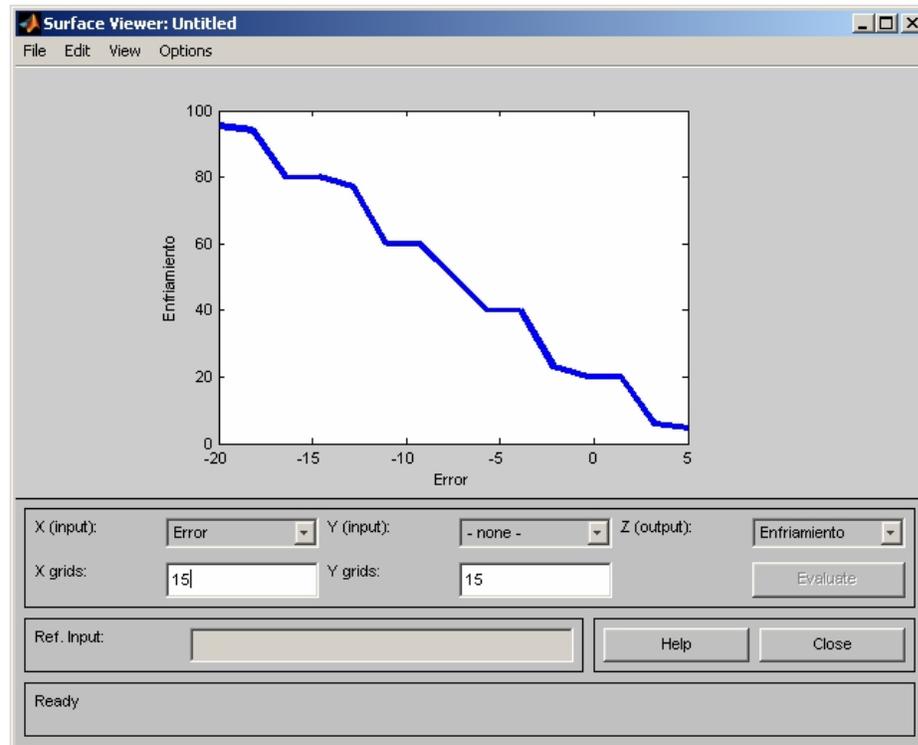
Nivel	Regla de control
1	<i>if</i> (Error = BajoPos) <i>then</i> (Enfriamiento = Nulo)
2	<i>if</i> (Error = Nulo) <i>then</i> (Enfriamiento = Bajo)
3	<i>if</i> (Error = BajoNeg) <i>then</i> (Enfriamiento = MedioBajo)
4	<i>if</i> (Error = MedioNeg) <i>then</i> (Enfriamiento = Medio)
5	<i>if</i> (Error = MedioAltoNeg) <i>then</i> (Enfriamiento = MedioAlto)
6	<i>if</i> (Error = AltoNeg) <i>then</i> (Enfriamiento = Alto)

Valiéndose de la herramienta para control en lógica difusa *Fuzzy Logic Toolbox* de *MATLAB*; se sintetiza el controlador difuso en el computador, para luego implementarlo en el controlador industrial. [43]



**Figura 4.8.** Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB

En éste se programan las reglas de control, las funciones de membresía y el método de defuzzificación. Se obtiene un modelo del controlador y una visualización del comportamiento del sistema.



**Figura 4.9.** Comportamiento del controlador difuso en MATLAB

Observando la figura 4.9, se puede observar la respuesta del controlador sobre su rango de operación. Éste presenta un comportamiento cercano a uno lineal; pero se puede modificar para hacerlo no lineal, modificando las funciones de membresía o agregando más variables a la lógica de control. Por ejemplo si se agregara la temperatura de referencia como variable y sus respectivas funciones de membresía; el comportamiento del controlador sería una gráfica en tres dimensiones y no en dos dimensiones como se implementó.

El controlador obtenido en MATLAB se toma como base para programar el comportamiento deseado en el controlador PAC, siguiendo las reglas de control y funciones de membresía.

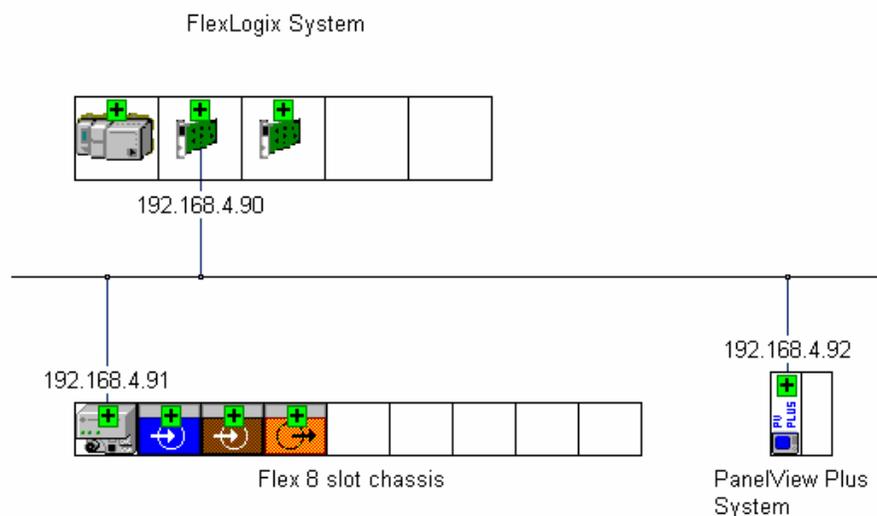
Es posible realizar un vínculo directo entre el controlador difuso diseñado en MATLAB y el controlador industrial; con la ayuda del paquete *FuzzyDesigner* de *Rockwell Automation*, pero no se pudo contar con éste para desarrollar el programa del controlador industrial.

### 4.3. Implementación en el entorno industrial

El sistema de control actual se encuentra en su fase de simulación; de modo que se puedan realizar programación y pruebas de funcionamiento, en un ambiente controlado donde un posible error o mal funcionamiento del sistema de control no vayan a afectar la operación normal del sistema de enfriamiento. En una etapa posterior; los dispositivos del sistema de control distribuido serán localizados en los puntos de la planta, que el personal de la Unidad de Automatización de Dos Pinos considere más conveniente para este fin.

Para realizar el sistema de control y monitorización se utilizan dispositivos *Allen-Bradley* de *Rockwell Automation*; debido a que la compañía los utiliza ampliamente y ya se tenían a disposición los programas de desarrollo necesarios (*RSLogix 5000*, *RSView Studio ME*).

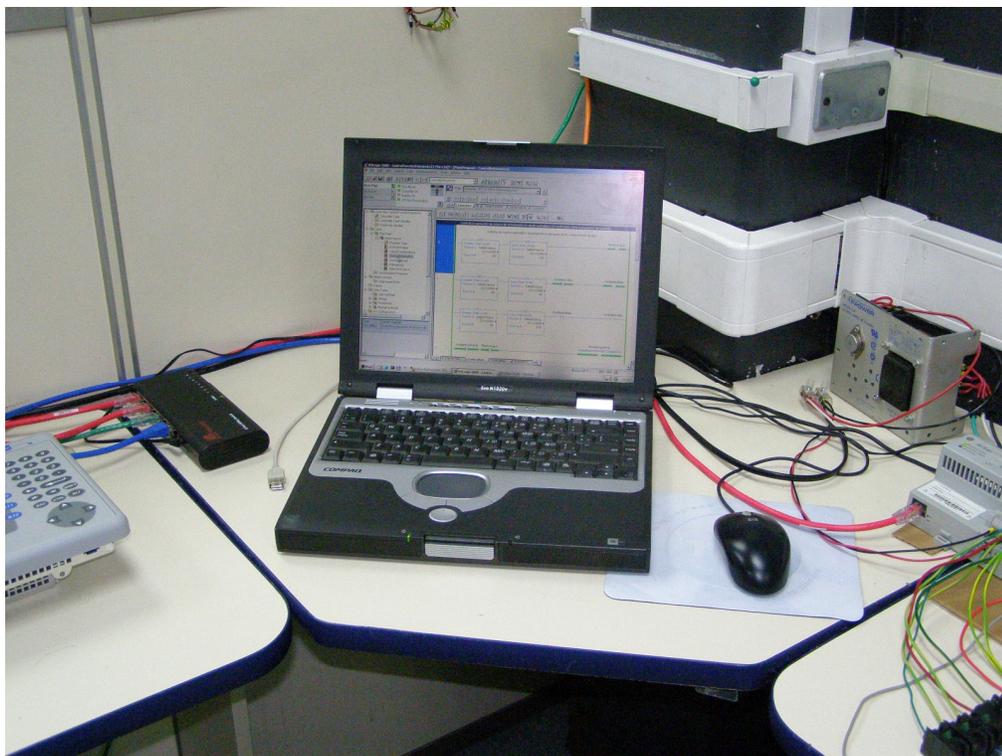
Se utiliza el protocolo EtherNet/IP, pues permite desarrollar una arquitectura flexible y fácilmente ampliable; esto pensando que en el sistema puede llegar a expandirse en un futuro.



**Figura 4.10.** Implementación del sistema sobre EtherNet/IP

Además la implementación mediante Ethernet/IP; facilita la futura inclusión de las variables de operación al sistema SCADA de la planta y así poder realizar un control y monitorización remoto desde un computador dedicado a este fin, por ejemplo un cuarto de control de procesos. También permite crear una plataforma de control *Logix*; donde el sistema de control distribuido controla la operación del sistema implementado, utilizando la red industrial disponible.

A todos los dispositivos de sistema de control y monitorización; se les asigna una dirección IP estática. Lo que permite que los programas de desarrollo los localicen más rápidamente y la comunicación del sistema de control distribuido sea eficiente. Además que se evita el inconveniente de que la dirección IP se pierda ante una falla del fluido eléctrico o el dispositivo se desconecte para darle mantenimiento.



**Figura 4.11.** Computador portátil para programación y monitorización

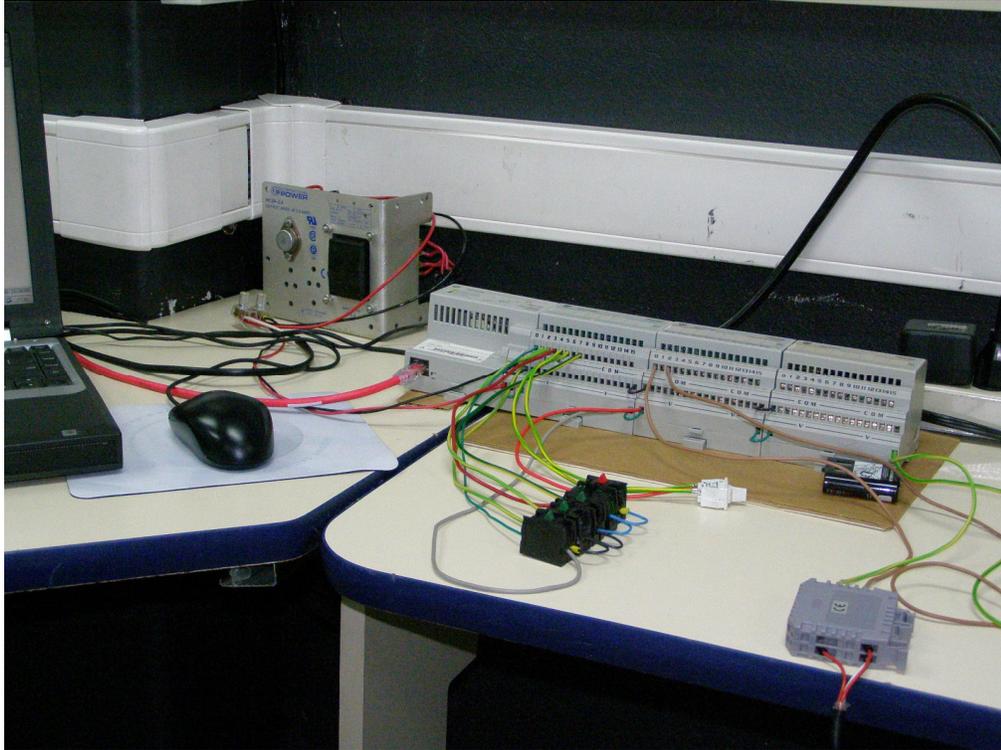
Se utiliza el controlador *FlexLogix 5434*; que además de estar diseñado para trabajar en ambientes industriales extremos (*temperatura, polvo, ruido electromagnético*), cuenta con un amplio conjunto de instrucciones que permiten implementar el sistema de control, realizar las rutinas y algoritmos programados necesarios para dicho fin y establecer la comunicación con los módulos de control distribuido.



**Figura 4.12.** Controlador, etapa de visualización y red Ethernet

En esta etapa del diseño; la etapa de visualización está dirigida al personal que da servicio preventivo y correctivo al sistema de enfriamiento de los compresores.

Esta etapa se implementa en una pantalla *PanelView Plus 700*; esta interfaz humano/máquina cuenta con un sistema operativo que permite programar una aplicación específica donde el usuario puede interactuar con el sistema de enfriamiento, observar las variables de operación y posibles errores que necesiten ser atendidos.



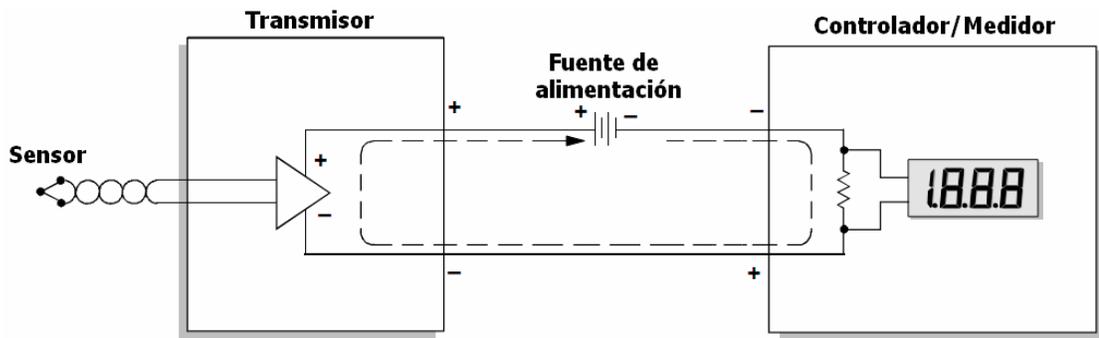
**Figura 4.13.** Módulos de control distribuido

El sistema de control distribuido utiliza módulos *Flex I/O* (*entradas analógicas/digitales y salidas de relevadores*); estos establecen comunicación con el controlador para capturar los datos de temperatura, botones de paro de emergencia, reinicio del sistema, posibles fallos de funcionamiento del equipo y la visualización de operación con que se dotó al sistema de enfriamiento.

En la etapa final de implementación, el sistema de control distribuido hará uso de los nodos de conexión más cercanos al punto donde se encuentre cada uno de los dispositivos en la planta. El controlador en la Sala de Calderas, la pantalla de visualización en el Taller Eléctrico o de Mantenimiento y los módulos de control en el panel de control de la torre de enfriamiento.

Para medir la temperatura del agua proveniente de los compresores y de salida de la torre de enfriamiento; se utilizan sensores de temperatura PT100 / RTD (*Resistance Temperature Detector*), los cuales aumentan su valor resistivo con el aumento de temperatura. [45] PT100 indica que el valor resistivo del sensor a 0° C es de 100  $\Omega$ ; este dispositivo puede medir temperaturas por debajo y sobre los 0° C.

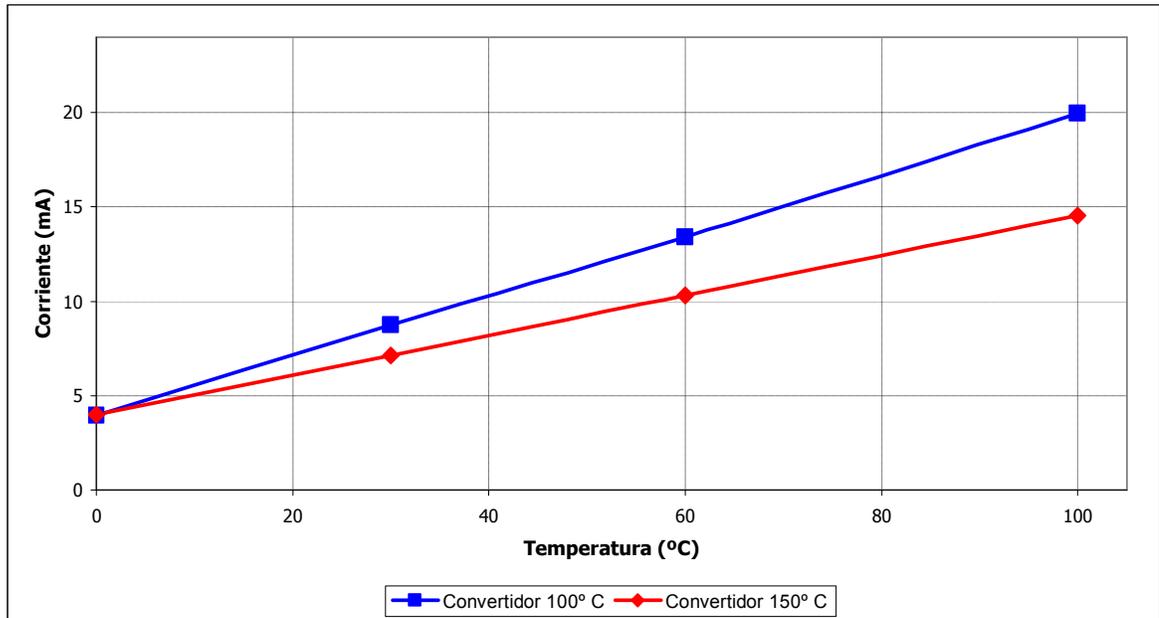
El valor resistivo equivalente a la temperatura medida, se transmite a las entradas del control distribuido mediante un convertidor que pasa de resistencia a una corriente de 4 a 20 mA (*0 ~ 100 % del valor medido*). Se utilizan módulos de conversión de resistencia a corriente con capacidad de medición entre 0 y 150° C.



**Figura 4.14.** Lazo de corriente de 4 ~ 20 mA [58]

El lazo de corriente es muy utilizado en la industria, pues la corriente en este circuito serie es la misma para todos los elementos y presenta inmunidad ante el ruido electromagnético existente en el entorno industrial. [58]

Estos módulos de conversión se conectan a las entradas analógicas del sistema de control distribuido. Una entrada analógica en el controlador corresponde a un convertidor analógico/digital de 16 bits; que pasa el valor de la corriente a un valor binario ( $4 \text{ mA} = 0 / 20 \text{ mA} = 30840$ ) con el cual se puede establecer la temperatura que mide el sensor.

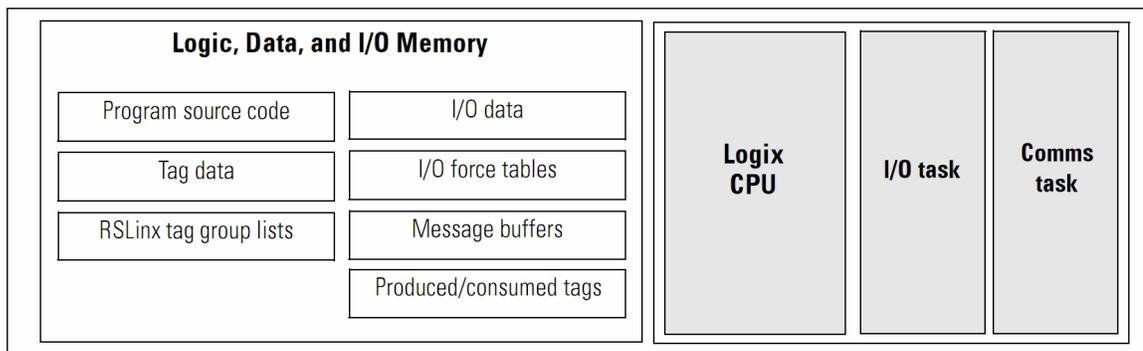


**Figura 4.15.** Comprobación de linealidad de convertidores PT100/RTD

Para comprobar la linealidad de la corriente de salida del convertidor PT100/RTD se realizaron mediciones en el Laboratorio de Calibración de la compañía utilizando una celda de Peltier para simular las posibles variaciones de temperatura que el sistema pueda experimentar. Las RTD se insertan en etilenglicol, para estabilizar la medición de temperatura.

### 4.3.1. Implementación en el controlador

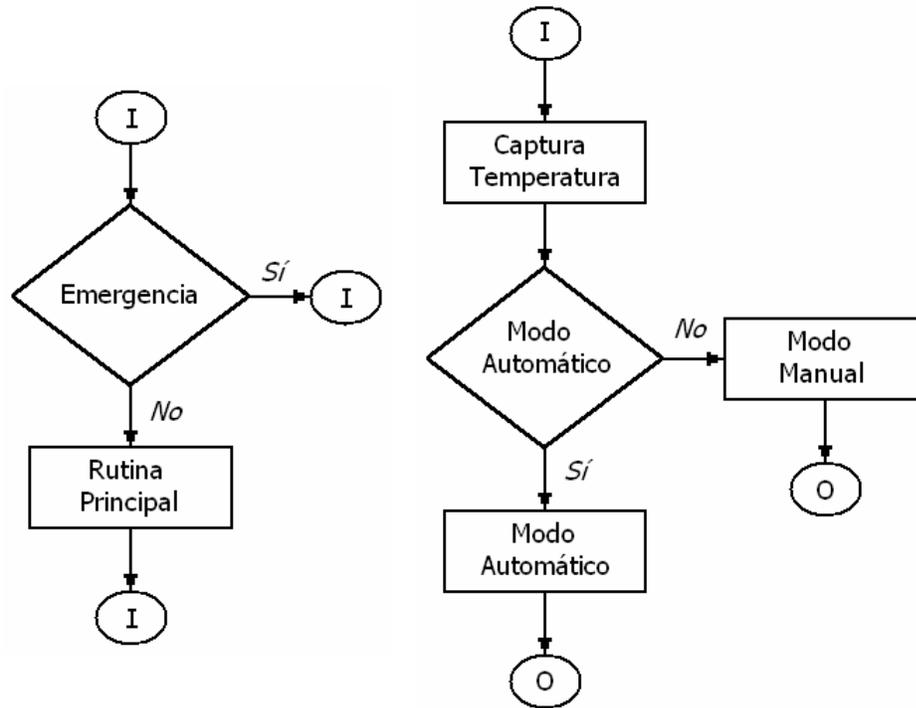
El controlador industrial *FlexLogix 5434*; corresponde una arquitectura compuesta por una memoria de 512 kBytes (*programas, variables (tags), mensajería, datos de entrada/salida*), un procesador de 32 bits con un conjunto amplio de instrucciones y unidades periféricas de comunicación (*RS-232, DH-485, Ethernet*).



**Figura 4.16.** Arquitectura de un controlador FlexLogix [53]

Tomando en cuenta que posee todos los elementos de un computador; diseñar un programa específico que ejecute una rutina de control, se convierte en una tarea de programación de alto nivel. Tomando en cuenta que el controlador utiliza su propio lenguaje de programación, *Rockwell Automation* vende un compilador especializado en este tipo de dispositivos (*RSLogix 5000*).

El desarrollo e implementación del algoritmo de control fue concebido a partir de un diagrama de flujo (*figura 4.16*) con las características más importantes para la correcta operación del sistema de control. Como se haría en cualquier lenguaje de programación de alto nivel, se programaron funciones específicas para cada modo de operación con el que cuenta la solución.



**Figura 4.17.** Diagrama de flujo de la solución

Se tienen programados dos modos de operación: manual y automático. El modo manual se programa con la finalidad de dar al usuario interacción con el sistema y pueda realizar pruebas, en caso que se necesite hacer una reparación o comprobar la correcta operación de la bomba de agua o los ventiladores de la torre de enfriamiento.

Mientras el sistema de control esté en condiciones normales de operación, el controlador selecciona el modo automático; donde el controlador realiza un estudio de la realimentación de la temperatura del agua de enfriamiento de los compresores y dependiendo de este valor se toma la acción de control necesaria para mantener la temperatura dentro del rango de operación deseado (25 °C).

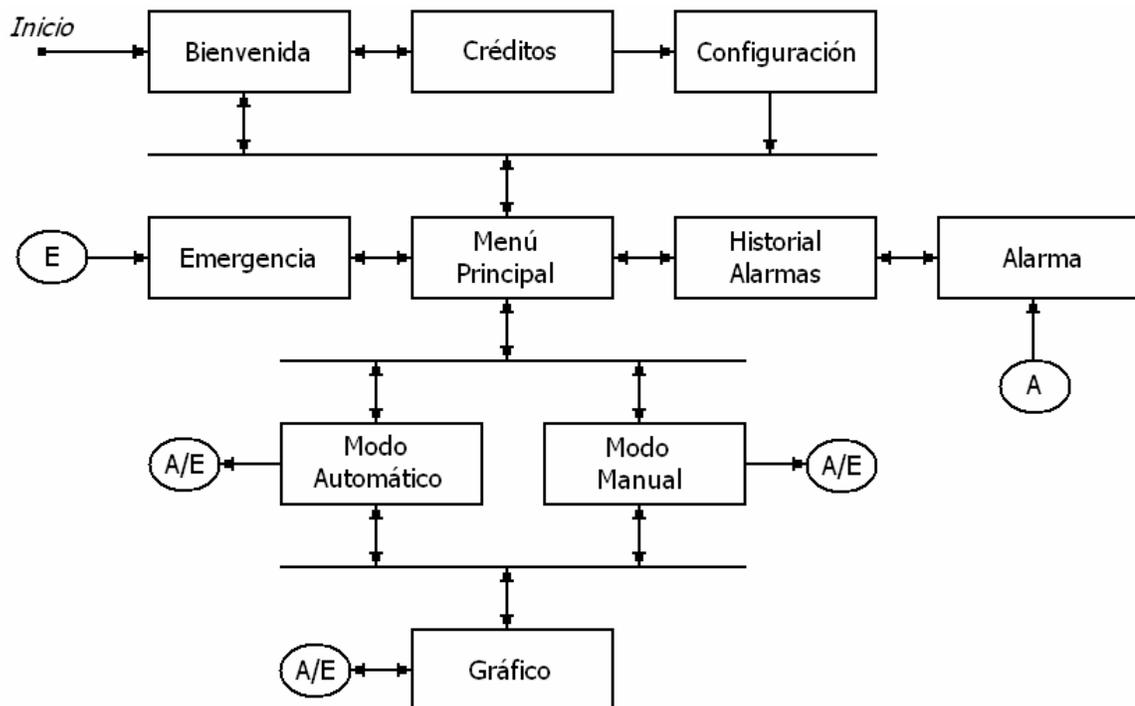
Si se presiona el botón de parada de emergencia la operación del sistema se detiene por completo como medida de seguridad. El botón de reinicio que se adicionó, restablece los parámetros originales del programa y el controlador regresa al modo de control automático.

Los datos analógicos que representaban la temperatura; se pasan por un algoritmo de media móvil, con el fin de filtrar posibles mediciones ruidosas que afecten el comportamiento del sistema. Este algoritmo se adicionó en la rutina de captura de temperatura.

### 4.3.2. Implementación en la interfaz humano/máquina

La pantalla *PanelView Plus 700*; se programa como la unidad de visualización de la operación de la torre de enfriamiento, utilizando el programa *RSView Studio*, de igual manera como se realiza en un lenguaje de alto nivel orientado aplicaciones gráficas (*Visual Basic, Visual C#*). Utilizando la mensajería establecida en el protocolo EtherNet/IP, se comunican las variables almacenadas en el programa del controlador, con el programa de la interfaz gráfica establecida en la pantalla.

Utilizando el sistema de etiquetas (*tags*) plataforma Logix, se puede modificar los valores de operación del proceso desde este módulo remoto de visualización; mientras que estén dentro de la misma red y los dispositivos conectados correspondan a la configuración almacenada en el dispositivo.



**Figura 4.18.** Diagrama de flujo de pantallas de visualización

## 5. Análisis de resultados

Si bien es cierto, al inicio del proyecto se tenía como idea una aplicación práctica, fue necesario realizar una ardua labor de investigación, por la falta de conocimientos y conceptos en varios de los campos que se abarcaron durante el desarrollo del proyecto. Por ejemplo, la transferencia de calor y sus fenómenos, intercambiadores de calor y sus no linealidades, el protocolo Ethernet y por supuesto la lógica difusa.

En este proceso de diseño, se obvia el efecto que la radiación de calor pudiera tener en el sistema de enfriamiento, pues tienen un mayor peso la conducción y convección. Entre más rápido circule al aire por el interior de la torre, más rápido se libera el calor del agua de enfriamiento. La aspersion de agua, permite reducir el tiempo que tarda el sistema transfiriendo el calor.

Los ventiladores tienen gran influencia sobre el proceso, ya que la presión y resistencia del aire a ingresar a la torre se duplica con la velocidad, pero se aumenta la turbulencia, lo que beneficia el proceso al aumentar el movimiento de flujo de aire. Procesos como la corrosión y sedimentación, cambian la tasa de transferencia de calor del sistema, reduciendo el desempeño, de modo que se les debe poner atención.

Si bien es cierto, el diseño todavía no está funcionando como parte integral del proceso de enfriamiento. El estudio realizado del comportamiento de este sistema tiene previsto que sirva de la mejor manera posible, o en su defecto que los cambios a realizar sean mínimos, cambiando un par de reglas de control o las funciones de membresía. Aún no se puede realizar un análisis comparativo del funcionamiento del sistema, pues no está instalado.

Otros procesos en la compañía como la pasteurización de la leche y otros productos, presentan no linealidades en el proceso de operación. Las técnicas de control implementadas para estos procesos por los ingenieros suecos de TetraPak no están del todo mal, pero se podrían mejorar con un estudio como el realizado en este proyecto.

MATLAB y Simulink fueron de gran ayuda para guiar la solución este problema, pues permitió diseñar un controlador difuso en base a las funciones de membresía y las reglas de control establecidas para este fin. Con base en el controlador de MATLAB se diseñó un algoritmo que emulara el comportamiento deseado en el controlador industrial.

Trabajar con dispositivos PAC, permite implementar algoritmos complejos, tanto como lo desee el diseñador. Ver la solución como un programa estructurado, permitió reducir el espacio que éste ocupaba en la memoria del controlador. Dejar de lado el lenguaje escalera y enfocarse en texto estructurado, bloques de funciones o diagramas de bloques permitiría una mayor soltura a la hora de diseñar una solución; ya que el compilador acepta estos otros lenguajes compatibles con el estándar IEC 61311-3.

En el sistema de enfriamiento se nota una constante de tiempo de 160 segundos, comparándolo con los tiempos de propagación de datos por la red (*menores que 100 ms*); indica que el sistema de control no se ve afectado por el tiempo de propagación. El retardo de propagación de los datos no se toma en cuenta para el diseño del control distribuido, éste se asume despreciable.

Según mediciones realizadas con una celda de Peltier, las RTD son bastante precisas y lineales. Los módulos de corriente no afectan la linealidad característica de estos sensores.

Puesto que la interfaz de visualización trabaja con una versión portátil de Windows; programarla y realizar las pantallas de control, es bastante similar a programar en Visual Basic o Visual C#. De hecho que se pueden implementar soluciones de este tipo con una computadora portátil y estos lenguajes visuales, descargando un par de DLL (*Dynamic Linking Library*) de Internet.

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1. Conclusiones**

- Con base en mediciones de temperatura se obtiene un modelo experimental aproximado del comportamiento del sistema de enfriamiento, que se utilizó como base para el diseño del sistema de control automático.
- El estudio realizado del intercambiador de calor del sistema de enfriamiento, reveló que utilizar una técnica clásica de control para este proceso no era adecuado por sus fuertes no linealidades.
- El uso de las herramientas disponibles en MATLAB para diseñar un sistema de control difuso permitió reducir el tiempo de implementación de la solución en el controlador industrial, tomando en cuenta el comportamiento deseado del sistema.
- El sistema diseñado necesita dispositivos especialmente diseñados para operar en condiciones extremas sin afectar el desempeño de éstos; su utilización en este proyecto permitió dedicar más tiempo al estudio y diseño de la solución.
- Utilizar Ethernet permitió realizar el control y monitorización remota de este proceso mediante un sistema de control distribuido.
- Las características computacionales del controlador industrial son adecuadas para la implementación de un controlador difuso y rutinas auxiliares para mantener la temperatura del sistema en el valor de referencia deseado.
- La monitorización realizada del proceso adiciona interacción con el usuario y permite al personal a cargo conocer las condiciones actuales del proceso de enfriamiento de agua para los compresores de aire.

## 6.2. Recomendaciones

- Teniendo en cuenta que la transferencia de calor por convección forzada, depende de la velocidad del aire que circula por el banco de tubos del intercambiador de calor de la torre de enfriamiento. Incorporar un variador de frecuencia al diseño, permitiría un mayor rango de control sobre la velocidad de los motores trifásicos que controlan los ventiladores centrífugos.
- La calidad del enlace juega un papel importante para el buen funcionamiento de la red de control, se recomienda utilizar cable de red STP (*Shielded Twisted Pair*) en lugar de UTP (*Unshielded Twisted Pair*); ya que el blindaje que éste posee, ayuda a reducir el riesgo de pérdida de datos por interferencia electromagnética (*motores, alta tensión*). También se pueden utilizar conectores 8P8C (*RJ45*) para aplicación industrial (*IP67*); para evitar que el polvo o el agua presentes en el ambiente industrial dañen la conexión.
- Dado que la eficiencia del sistema de control basado en una red Ethernet; depende en gran medida de la calidad del enlace y la velocidad de transmisión de los datos, asegurar esta calidad utilizando un *switch* con capacidad *full duplex* y de auto negociación pueden ayudar a evitar colisiones que generen la pérdida de datos. Además se recomienda el uso del estándar ANSI/TAI/EIA-568B al realizar los cables de red, pues satisface los requerimientos de cableado en redes de alto tráfico de información.
- Se podría agregar el programa *FuzzyDesigner* de *Rockwell Automation* a la colección de programas de desarrollo de la compañía. Pues se podrían diseñar controladores difusos más sofisticados; y aplicarlos a éste y otros procesos existentes en la planta.

## 7. Referencias

- [1] Ogata K., **Ingeniería de Control Moderna**, Prentice Hall, México, 2001.
- [2] Paraskevopoulos P., **Modern Control Engineering**, Dekker, USA, 2002.
- [3] Ellis G., **Control System Design Guide**, Elsevier, USA, 2004.
- [4] Ogata K., **Dinámica de Sistemas**, Prentice Hall, México, 1987.
- [5] Franklin G., Powell D., Emami-Naeni A., **Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación**, Adison – Wesley, USA, 1991.8,
- [7] Karris S. T., **Introduction to Simulink with Engineering Applications**, Orchard Publications, USA, 2006.
- [8] Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N., **Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB**, Springer, USA, 2007.
- [9] Passino K. M., Yurkovich S., **Fuzzy Control**, Adison – Wesley, USA, 1997.
- [10] Reznik L., **Fuzzy Controllers**, Newnes, Australia, 1997.
- [11] Michels K., Klawonn F., Kruse R., Nürnberger A., **Fuzzy Control – Fundamentals, Stability, and Design of Fuzzy Controllers**, Springer, USA, 2006.
- [12] Cirstea M. N., Dinu A., Khor J. G., McCormick M., **Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power**, Newnes, Great Britain, 2002.
- [13] Reynders D., Wright E., **Practical TCP/IP and Ethernet Networking**, Newnes, Great Britain, 2003.
- [14] Petruzella F., **Programmable Logic Controllers**, McGraw – Hill, USA, 1996.
- [15] Çengel Y., **Heat Transfer – A Practical Approach**, McGraw – Hill, USA, 2003.
- [16] Lienhard J., Lienhard J., **A Heat Transfer Textbook**, Phlogiston Press, USA, 2008.
- [17] Mills A., **Transferencia de Calor**, McGraw – Hill, España, 1994.
- [18] Faires V., **Termodinámica**, Limusa, México, 1996.
- [19] Threlkeld J., **Ingeniería del Ámbito Térmico**, Prentice Hall, España, 1973.
- [20] Kutz M., **Temperature Control**, John Wiley & Sons, USA, 1968.
- [21] Guillén A., **Introducción a la Neumática**, Marcombo, España, 1988.

- [22] Institution of Mechanical Engineers, **Energy Savings in the Design and Operation of Compressors**, IMechE Seminar, United Kingdom, 1996.
- [23] Deppert W., Stoll K., **Aplicaciones de la Neumática**, Marcombo, España, 1991.
- [24] Deppert W., Stoll K., **Dispositivos Neumáticos**, Marcombo, España, 1974.
- [25] Choné G., Feigenspan H., **Manual de las Técnicas del Aire Comprimido**, FMA Pokorny, Alemania, 1968.
- [26] Zadeh L.A., **Fuzzy Sets**, University of California, Berkeley, 1965.
- [27] Blanc D., **Fuzzy Logic Application for Optimization of the Cooling Towers System**, European Organization for Nuclear Research, *Super Proton Synchrotron*, 2001.
- [28] Jatzen J., **Tutorial on Fuzzy Logic**, Technical University of Denmark, 1998.
- [29] Jatzen J., **Design of Fuzzy Controllers**, Technical University of Denmark, 1998.
- [30] Ballé P., Fischer M., Füssel D., Nelles O., Isermann R., **Integrated Control, Diagnosis and Reconfiguration of Heat Exchanger**, Darmstadt University of Technology, 1997.
- [31] Abe N., Seki K., Kanoh H., **Internal Model Control for Single Tubular Heat Exchanger System**, Meiji University, 1994.
- [32] Abe N., Seki K., Kanoh H., **Two Degree of Freedom Internal Model Control for Single Tubular Heat Exchanger System**, Meiji University, 1996.
- [33] Xia L., Abreu-Garcia J. A., Harley T., **Modelling and Simulation of a Heat Exchanger**, University of Akron, 1991.
- [34] Wellenreuther A., Gambier A., Badreddin E., **Multi-loop Controller Design for a Heat Exchanger**, University of Mannheim, 2006.
- [35] Zandi B., Lewis J., Lewis H., Severson M., **Simplified Modeling of Complex Compact Heat Exchanger Svstems**, Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2004.
- [36] Liu G., Tang T., Liu L., **Study on the Web Based Remote Monitoring and Controlling System for Heat Exchanger**, Ocean University of China, 2005.
- [37] Interiano E., **Control Automático**, Escuela de Ingeniería Electrónica ITCR, Visitada el 04/08/2008. Disponible en:  
<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/clases>
- [38] Spakovszky Z., **Thermodynamics and Propulsion**, Massachusetts Institute of Technology, Visitada el 20/08/2008. Disponible en:  
<http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/notes.html>
- [39] The MathWorks, **Temperature Control in a Heat Exchanger**, Visitada el 31/07/2008. Disponible en:  
<http://www.mathworks.com/products/control/demos.html>

- [40] Wikipedia, **Heat Transfer**,  
Visitada el 10/08/2008. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_transfer](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer)
- [41] Wikipedia, **Fuzzy Logic**,  
Visitada el 10/08/2008. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy\\_logic](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_logic)
- [42] Wikipedia, **Fuzzy Control System**,  
Visitada el 30/04/2008. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy\\_control\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system)
- [43] The MathWorks, **Fuzzy Logic Toolbox – User’s Guide**,  
Visitada el 25/06/2008. Disponible en:  
[http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/fuzzy/fuzzy.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf)
- [44] Rockwell Automation, **RSLogix 5000 FuzzyDesigner – User Manual**,  
Visitada el 15/07/2008. Disponible en:  
[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/logix-um004\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/logix-um004_-en-p.pdf)
- [45] Honeywell, **Platinum RTDs Reference Data**,  
Visitada el 15/07/2008. Disponible en:  
[http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/temperature/technical/c15\\_136.pdf](http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/temperature/technical/c15_136.pdf)
- [46] Wikipedia, **Ethernet**,  
Visitada el 17/04/2008. Disponible en:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet>
- [47] Wikipedia, **Internet Protocol Suite**,  
Visitada el 20/04/2008. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_Protocol\\_Suite](http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_Protocol_Suite)
- [48] Wikipedia, **EtherNet / IP**,  
Visitada el 15/07/2008. Disponible en:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/EtherNet/IP>
- [49] Wikipedia, **Common Industrial Protocol**,  
Visitada el 17/04/2008. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Common\\_Industrial\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Common_Industrial_Protocol)
- [50] Wikipedia, **TIA/EIA-568-B**,  
Visitada el 07/06/2008. Disponible en:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/TIA/EIA-568-B>
- [51] Wikipedia, **International Protection Rating**,  
Visitada el 08/06/2008. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/IP\\_Code](http://en.wikipedia.org/wiki/IP_Code)
- [52] Rockwell Automation, **The Ten Commandments of Making EtherNet/IP Applications Successful**,  
Visitada el 09/08/2008. Disponible en:  
[http://www.ab.com/networks/get/EIP\\_10\\_Commandments.ppt](http://www.ab.com/networks/get/EIP_10_Commandments.ppt)

- [53] Rockwell Automation, **EtherNet/IP – Industrial Protocol**,  
Visitada el 10/08/2008. Disponible en:  
[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/enet-wp001\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/enet-wp001_-en-p.pdf)
- [54] Wikipedia, **Automation**,  
Visitada el 10/04/2008. Disponible en:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Automation>
- [55] Wikipedia, **SCADA**,  
Visitada el 05/05/2008. Disponible en:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/SCADA>
- [56] Wikipedia, **Programmable Automation Controller**,  
Visitada el 15/05/2008. Disponible en:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable\\_automation\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_automation_controller)
- [57] National Instruments, **PACs for Industrial Control – The Future of Control**,  
Visitada el 05/08/2008. Disponible en:  
[ftp://ftp.ni.com/pub/devzone/pdf/tut\\_3755.pdf](ftp://ftp.ni.com/pub/devzone/pdf/tut_3755.pdf)
- [58] DATEL, **4 – 20mA Current Loop Primer**,  
Visitada el 15/08/2008. Disponible en:  
<http://www.datel.com/data/meters/dms-an20.pdf>

## 8. Apéndices

### 8.1. Glosario

**Automatización:** Uso de sistemas o elementos computarizados con el fin de controlar un proceso o equipo industrial, reduciendo la intervención humana en éste.

**Control automático:** Disciplina de la ingeniería que se enfoca en el modelo de sistemas, analizando sus comportamiento dinámico y utilizando la teoría de control (*realimentación*) para diseñar un controlador que cause en el sistema el comportamiento.

**Controlador programable de automatización (PAC):** Dispositivo de automatización industrial; que combina las características computacionales de un computador (*PC*) con las ventajas de un controlador industrial (*PLC*).

**Convección forzada:** Modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido adyacente (*líquido o gas*) en movimiento; producido por un agente externo. Entre más rápido se mueva el fluido adyacente; mayor será la transferencia por convección forzada.

**Ethernet (IEEE 802.3):** Estándar internacional para redes de computadores de área local. Define las características del cableado y codificación del nivel físico y los formatos de las tramas de datos del nivel de enlace de datos según lo define el modelo OSI.

**EtherNet/IP:** Protocolo de comunicación en la capa de aplicación del modelo OSI, tiene la finalidad de trabajar directamente con dispositivos de automatización industrial. Comparte el protocolo CIP con DeviceNet y ControlNet.

**Intercambiador de calor:** Dispositivo diseñado para transferir el calor de manera eficiente entre un medio a otro; donde ambos medios están separados por una pared sólida que impide que se mezclen o estos medios se encuentren en contacto directo.

**Lógica difusa:** Una forma de lógica derivada en los conjuntos difusos. No se tienen dos valores (*falso – verdadero*) para definir la pertenencia a un conjunto, sino que una función de membresía indica que tanto se pertenece o no a un conjunto.

**Plataforma de control Logix (Allen–Bradley):** Arquitectura de control, basada en dispositivos de automatización Logix. Diseñada por Rockwell Automation con la idea de reducir costos de mantenimiento, fácil acceso a la información y reducción de tiempo y costo de desarrollo. Utiliza el protocolo de comunicación CIP.

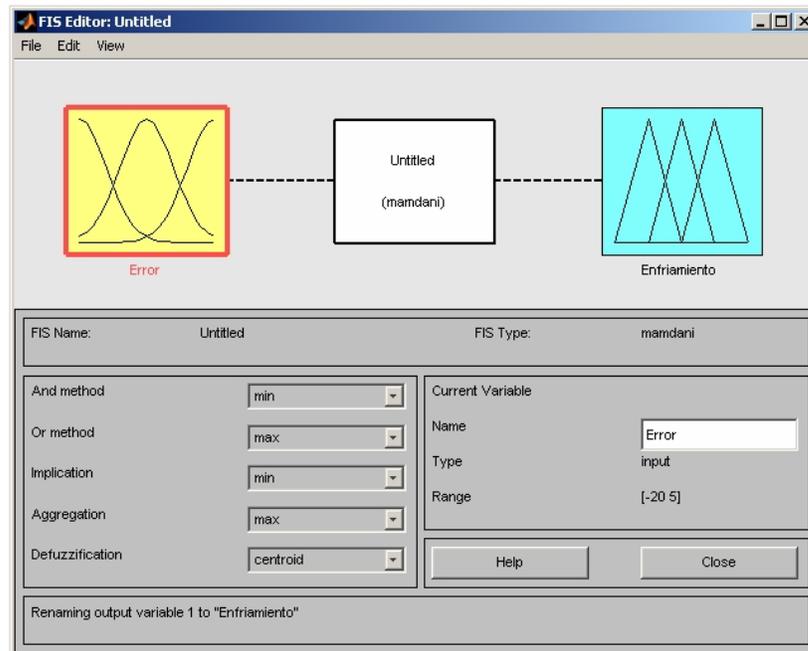
**Red de control:** Red de comunicaciones destinada a transmitir instrucciones e información entre los dispositivos de control y medición de un sistema de automatización industrial.

**Sistema de control distribuido:** Sistema de control industrial; en el cual los elementos de control no se encuentran centralizados en un puntos específico sino distribuidos a lo largo de una red de control.

**Transferencia de calor:** En el ambiente térmico, es el estudio del paso de energía térmica desde un cuerpo caliente a uno más frío, como resultado de la segunda ley de la termodinámica; con el fin de alcanzar un equilibrio térmico entre ambos cuerpos.

## 8.2. Uso de herramienta Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB

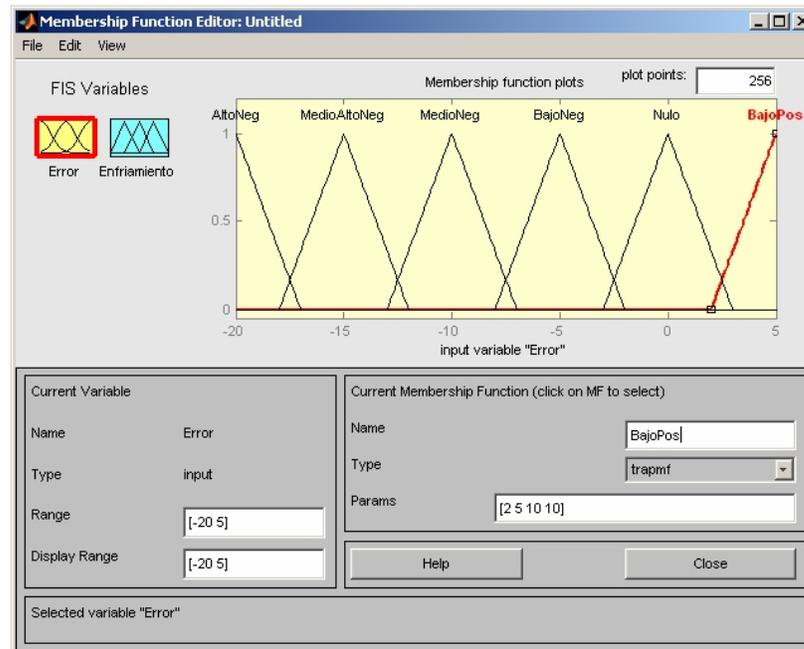
Como parte de la implementación, se utiliza la herramienta de diseño difuso disponible en *MATLAB*. Esta herramienta permite realizar un controlador difuso a partir del conjunto de restricciones de entrada y salida definidas por el usuario.



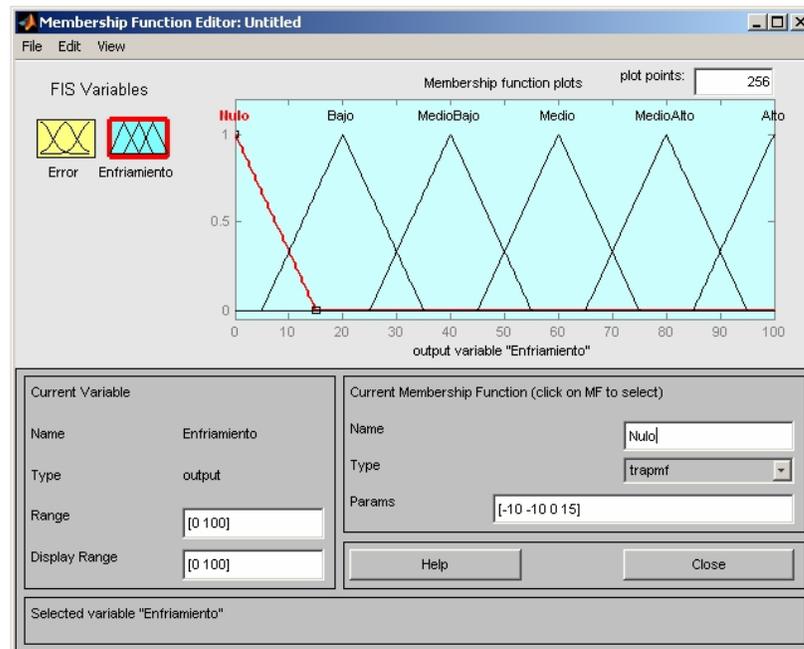
**Figura 8.1.** Interfaz del editor para controlador difuso

Con el estudio de comportamiento realizado en la planta; es posible definir las funciones de membresía de entrada ó salida y sus respectivos rangos de operación, los cuales se pasan al programa *FIS Editor* de *MATLAB*.

La interfaz de trabajo es bastante intuitiva lo que facilita el uso de la aplicación, con lo que se pueden realizar modificaciones de manera simple y rápida sobre el controlador en esta etapa de diseño.

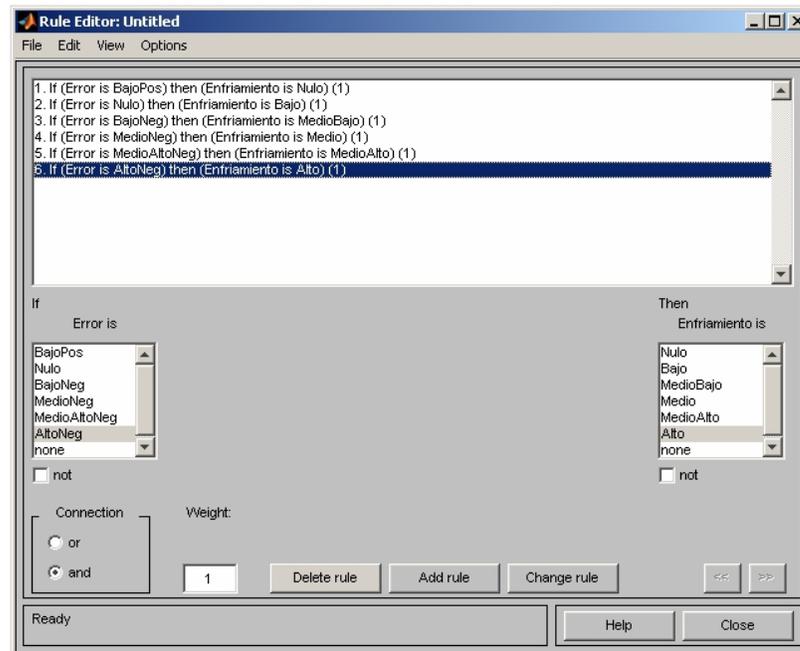


**Figura 8.2.** Funciones de membresía de la variable de entrada



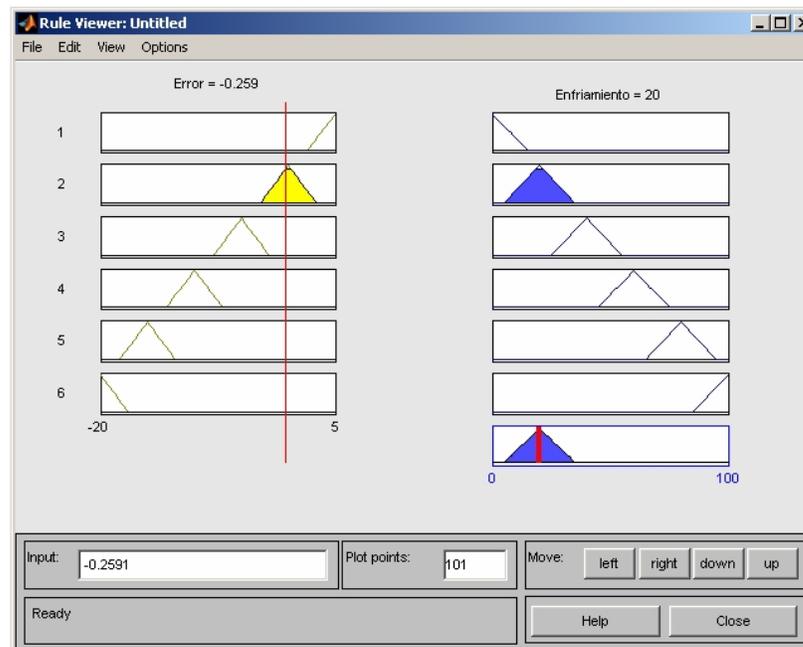
**Figura 8.3.** Funciones de membresía de la variable de salida

Las reglas de comportamiento de la base de conocimiento se programan de modo que el controlador las tome en cuenta en su operación normal, como a la hora de realizar un estudio de respuesta del controlador.

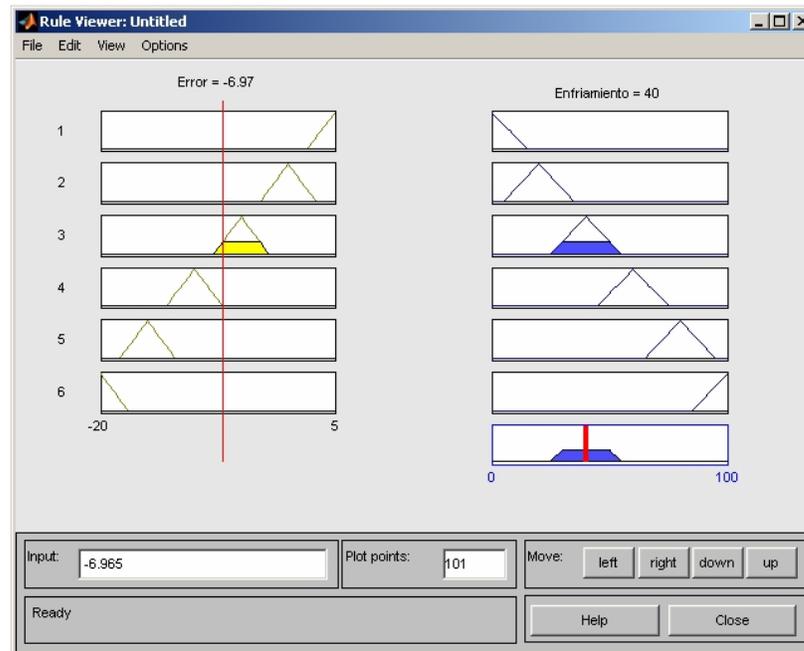


**Figura 8.4.** Reglas de comportamiento del control difuso

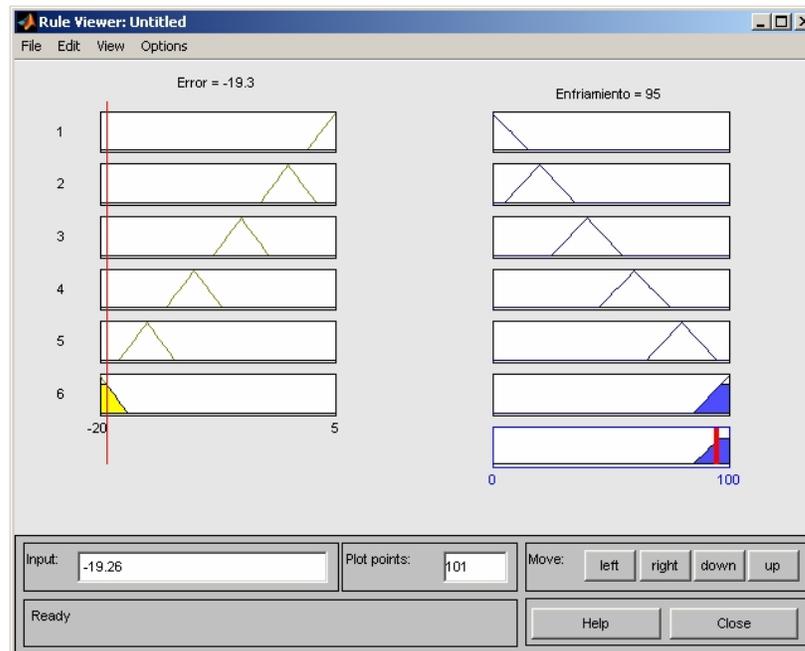
Con las funciones de membresía y reglas de control definidas se puede realizar un estudio de comportamiento y con esto observar la respuesta de salida del controlador ante diferentes valores en la entrada.



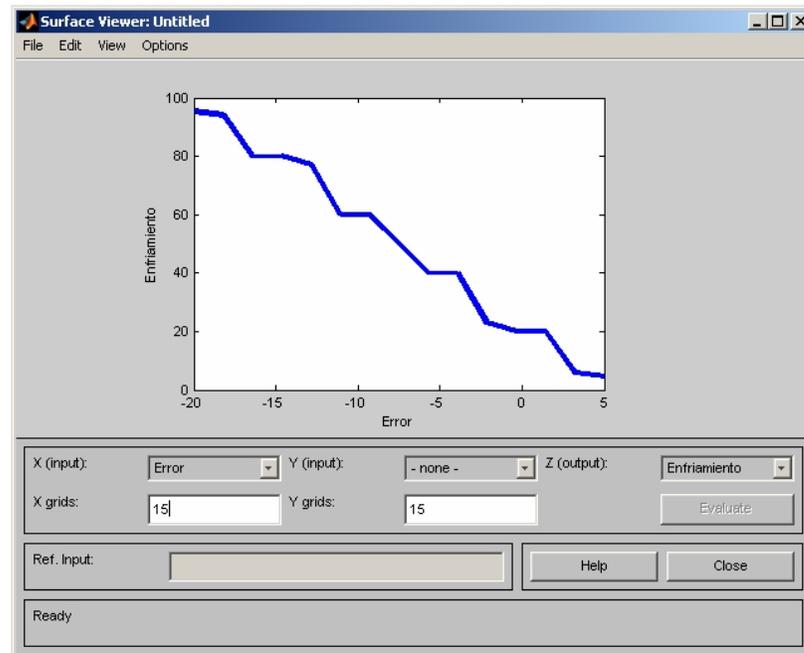
**Figura 8.5.** Respuesta ante un error bajo



**Figura 8.6.** Comportamiento ante un error medio



**Figura 8.7.** Respuesta ante un error alto



**Figura 8.8.** Comportamiento completo del controlador difuso

La respuesta del controlador difuso; corresponde entonces a una superficie de control la cual puede ser fácilmente modificada con solo cambiar las funciones de membresía y sus rangos de operación, y conseguir el comportamiento idóneo del sistema ante las diferentes variantes en la operación del proceso a controlar.

### 8.3. Manual de operación

Con el fin de guiar al usuario; cada una de las ventanas que se implementan en la unidad de visualización, cuentan con suficiente información con la finalidad que sea más sencillo seguir la secuencia programada.

Cada botón presente en la ventana se encuentra programado para realizar una tarea específica, según lo indique la leyenda que éste tenga presente. Basta con presionar el respectivo botón en la pantalla, para que la unidad de visualización interactúe con el controlador y se realice la acción deseada por el usuario.

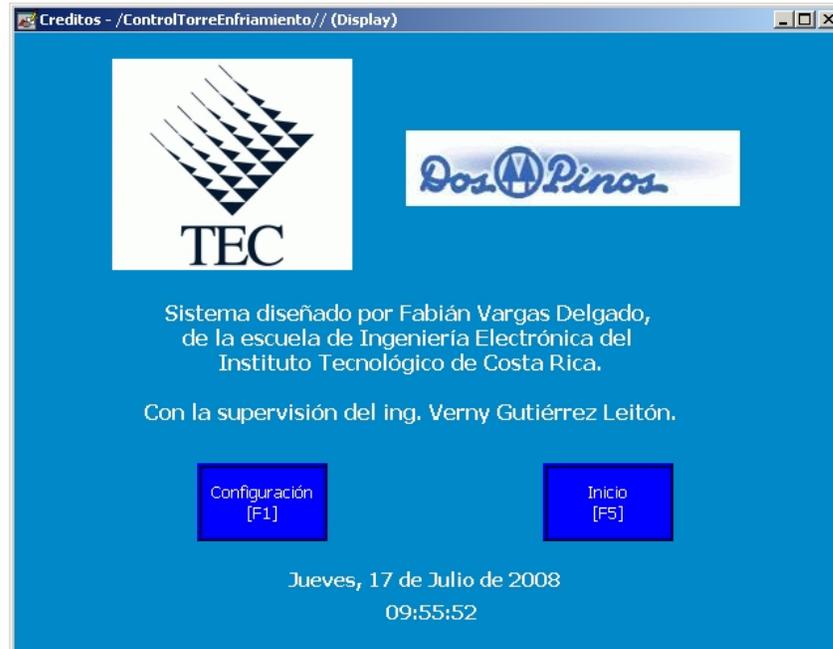
#### Bienvenida



**Figura 8.9.** Ventana inicial (*bienvenida*)

Diseñada con la finalidad de indicar al usuario, a que corresponde esta unidad de visualización. Presionando F5 se ingresa al menú principal del sistema.

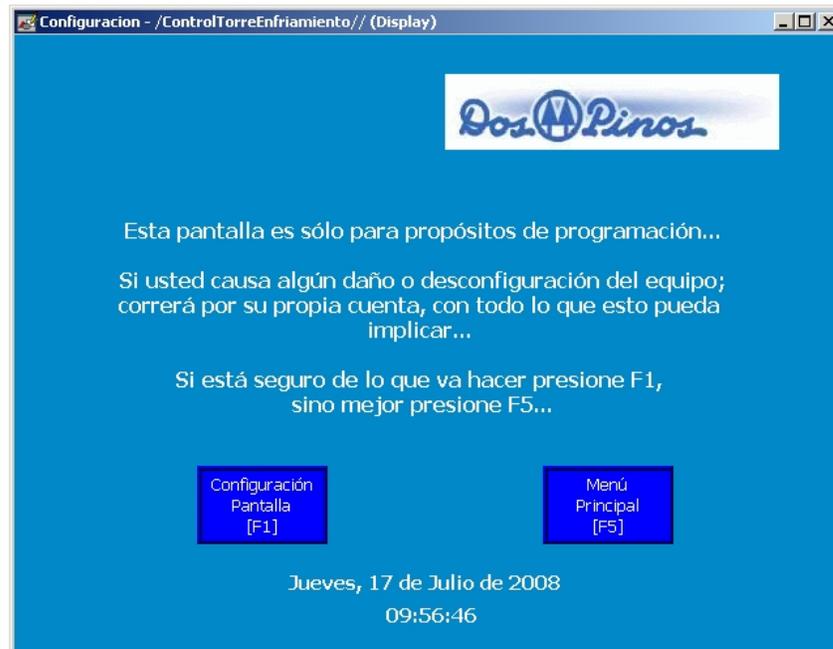
## Créditos



**Figura 8.10.** Créditos del diseño

Información general del diseñador y asesor del proyecto.

## Configuración

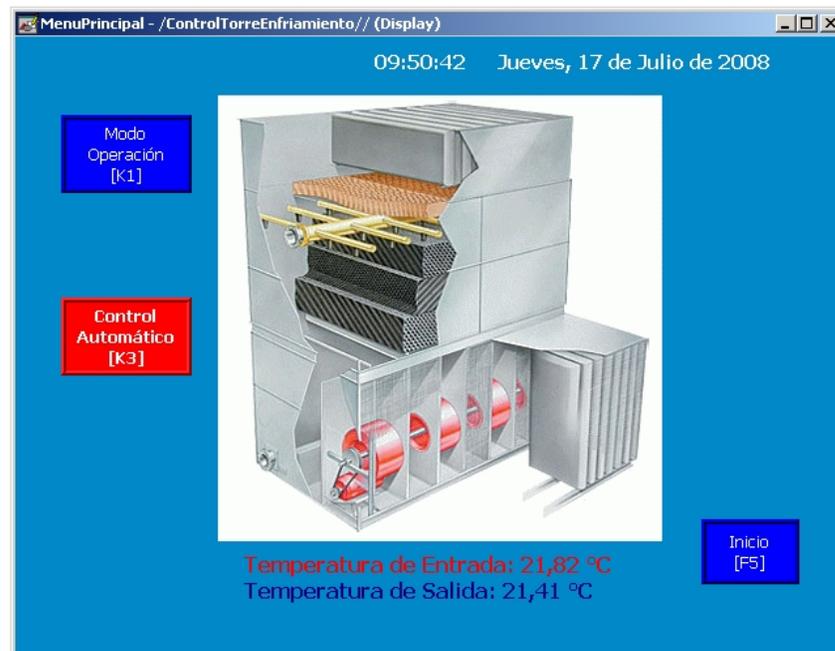


**Figura 8.11.** Advertencia sobre configuración

Esta ventana permite ingresar al modo de configuración de la pantalla; de modo que se agrega una advertencia para disuadir al usuario de seguir adelante.

### Menú principal

En el menú principal, el usuario puede seleccionar según su necesidad entre operación manual o automática del sistema con solo presionar K1.



**Figura 8.12.** Ingreso a modo automático

Una vez seleccionado el modo deseado el usuario puede dirigirse al modo automático presionando K3. Si por el contrario lo que desea es utilizar el modo manual, debe presionar nuevamente K1 y luego la tecla K2 para dirigirse al modo manual.

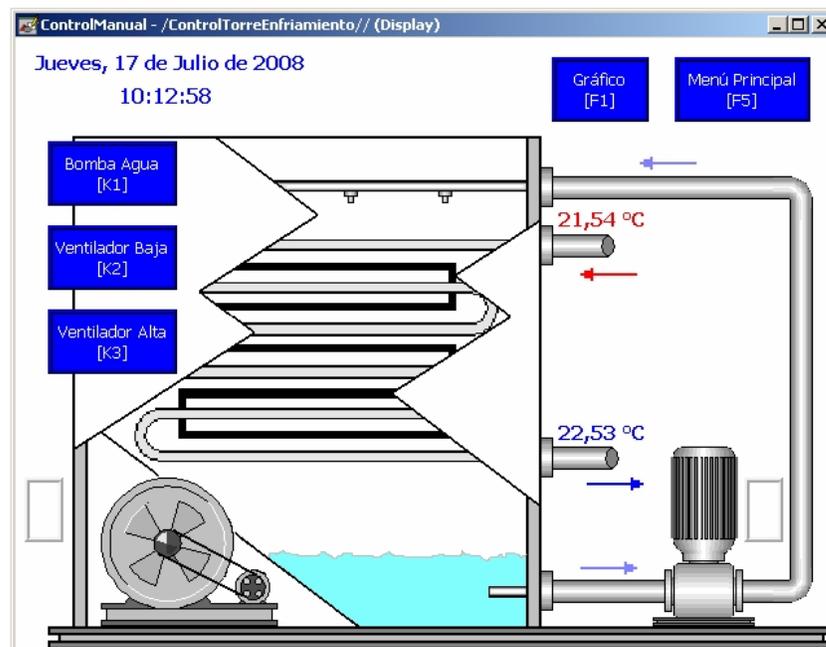
También puede regresar a la ventana inicial presionando F1 y revisar el historial de alarmas con la tecla F5.



**Figura 8.13.** Ingreso a modo manual

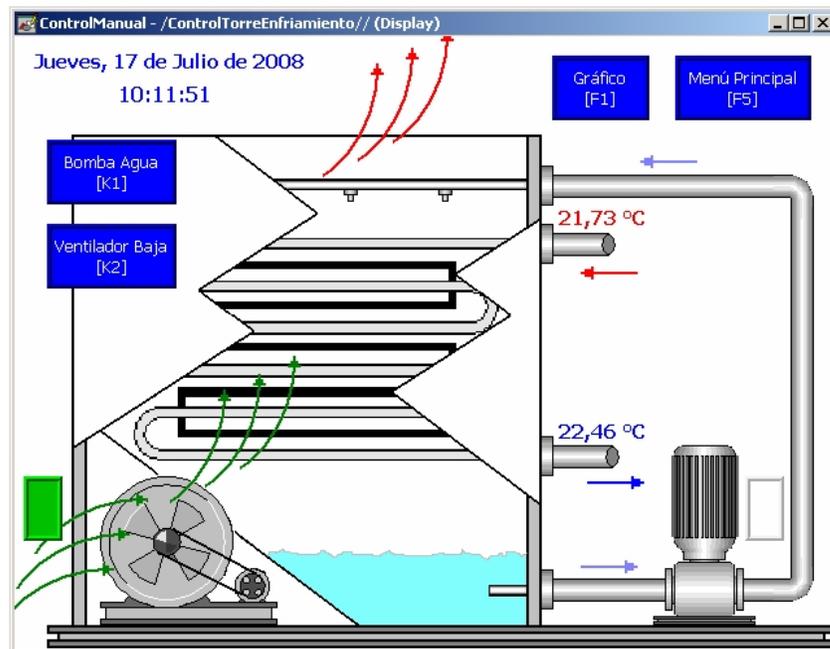
### Control manual y automático

Una vez ingresado el modo de operación, el usuario cuenta con ciertas ayudas visuales que le indican que el sistema se encuentra sus diferentes fases de funcionamiento. En modo manual, se necesita presionar la tecla respectiva a cada elemento de la torre de enfriamiento, para que el controlador lo encienda.

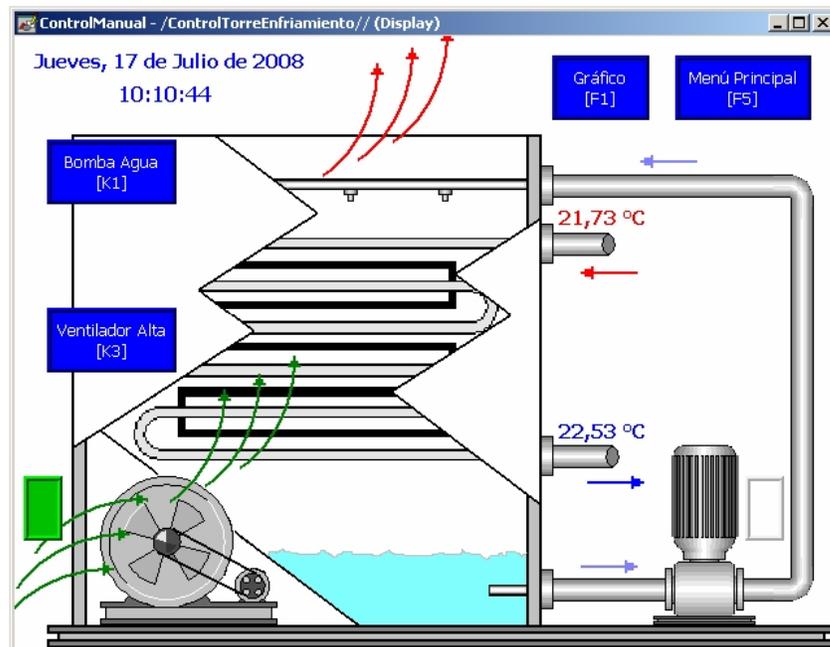


**Figura 8.14.** Torre de enfriamiento apagada

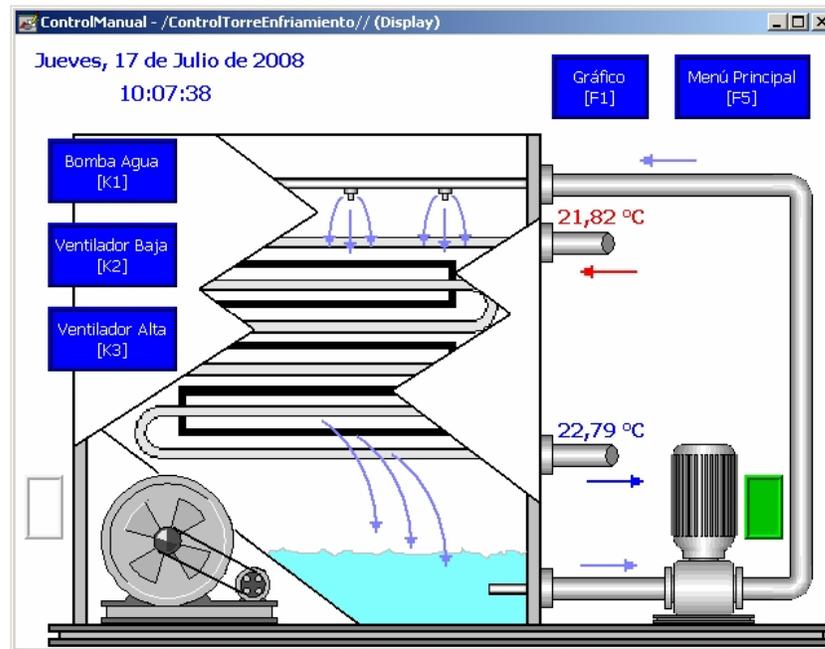
En el modo automático; sólo se presenta la información de funcionamiento del sistema, el controlador se encarga del resto de la operación.



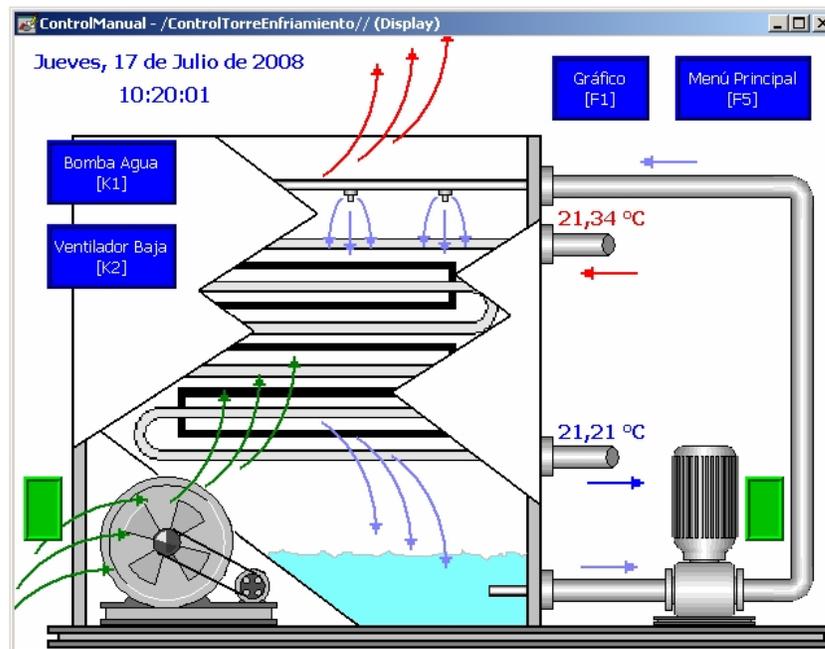
**Figura 8.15.** Ventilador de baja velocidad encendido



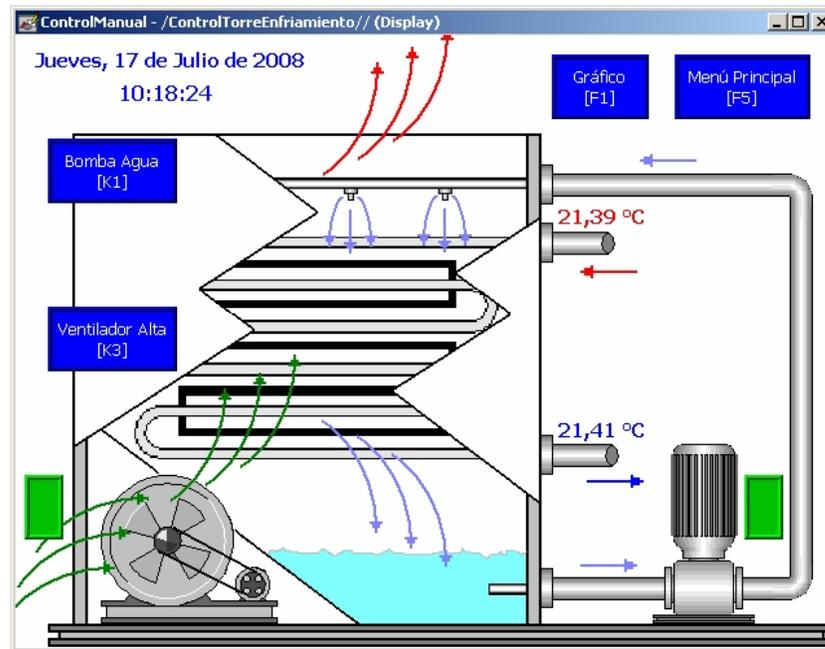
**Figura 8.16.** Ventilador de alta velocidad encendido



**Figura 8.17.** Bomba de agua fría activada

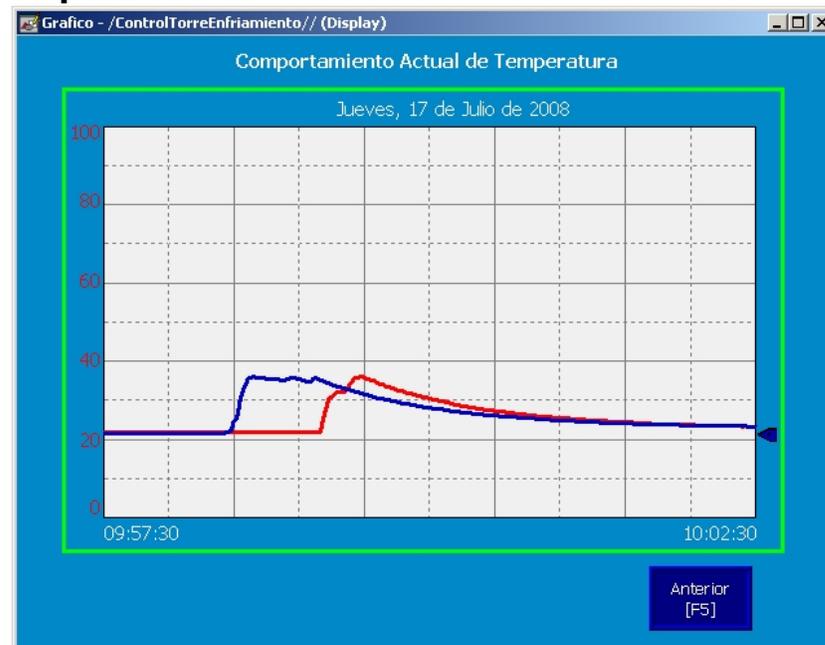


**Figura 8.18.** Conjunto bomba y ventilador baja encendido



**Figura 8.19.** Conjunto bomba y ventilador alta activado

### Gráfico de comportamiento

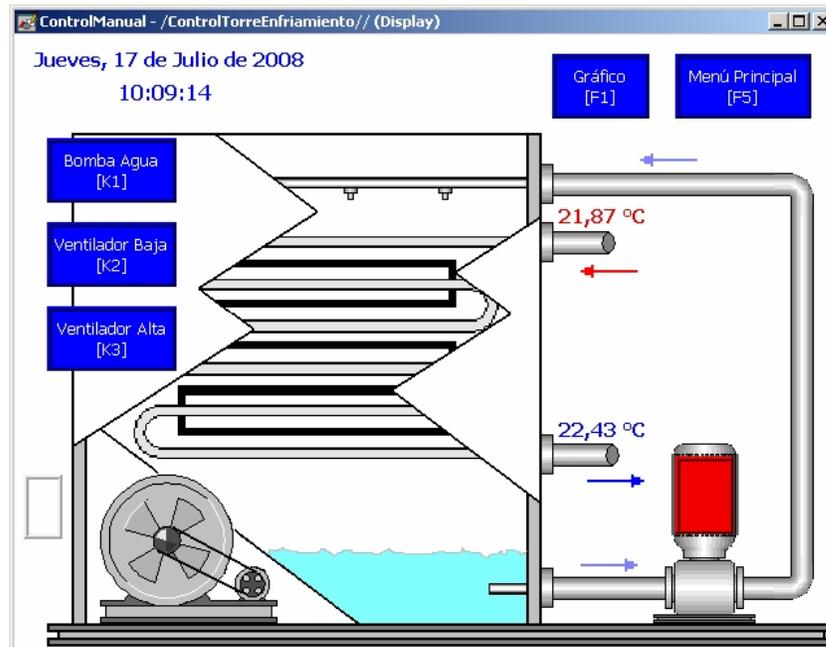


**Figura 8.20.** Comportamiento de las temperaturas del sistema

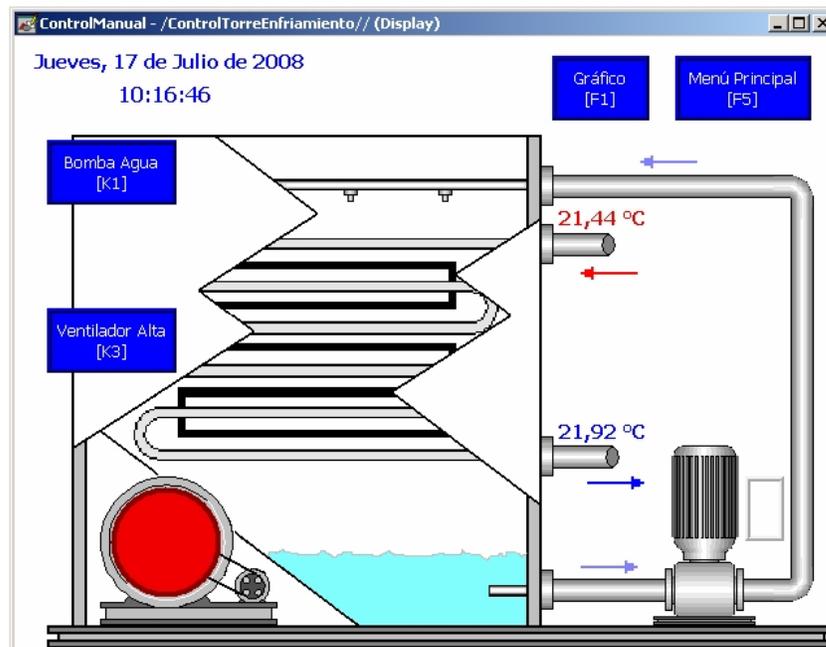
Si el usuario necesita observar un gráfico del comportamiento del sistema, lo puede hacer con solo presionar F1, tanto en la ventana de control manual como automático. La ventana de tiempo de cinco minutos muestra el comportamiento de las temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento de los compresores.

## Fallos de funcionamiento

Teniendo en cuenta que el sistema no es inmune a fallos; la unidad de visualización le indica al usuario con un cuadro rojo sobre el dispositivo que se sospecha esté generando el error. De modo que el usuario constate a que se debe dicho error, según el diagrama eléctrico del sistema y atienda la falla para no entorpecer el proceso de enfriamiento de los compresores de aire.



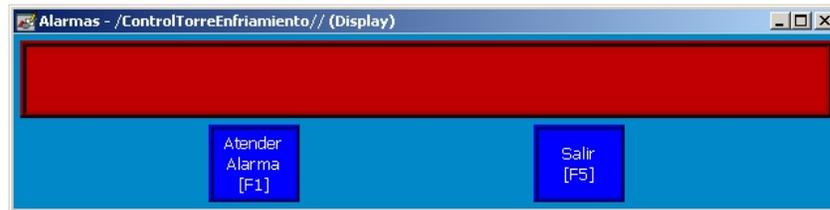
**Figura 8.21.** Fallo de funcionamiento de la bomba de agua



**Figura 8.22.** Fallo de funcionamiento del ventilador

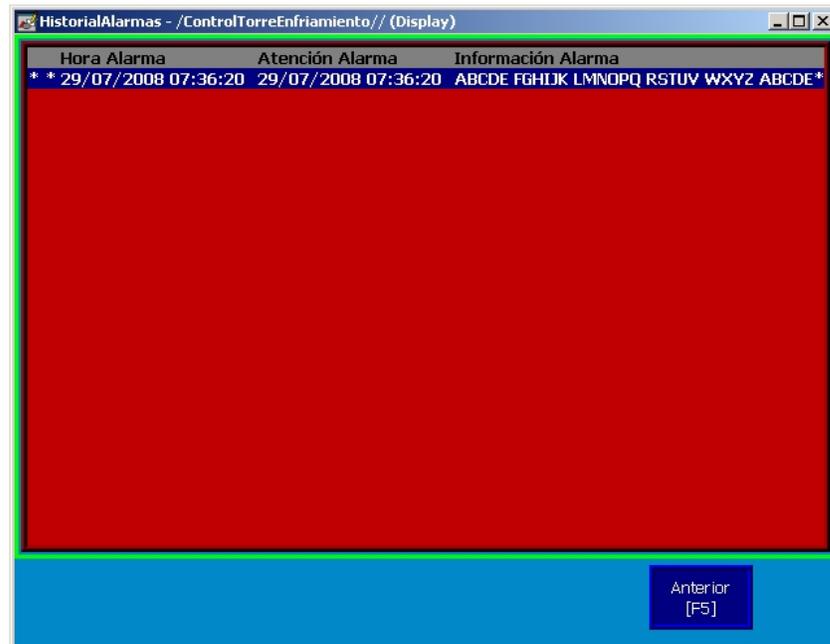
## Alarmas

Además de los cuadros indicativos, una ventana emergente aparece sobre la ventana actual, para informar sobre un error ocurrido en el funcionamiento del equipo. Presionando las teclas respectivas, el usuario puede indicar que se va proceder a reparar la falla.



**Figura 8.23.** Ventana desplegada con información del error

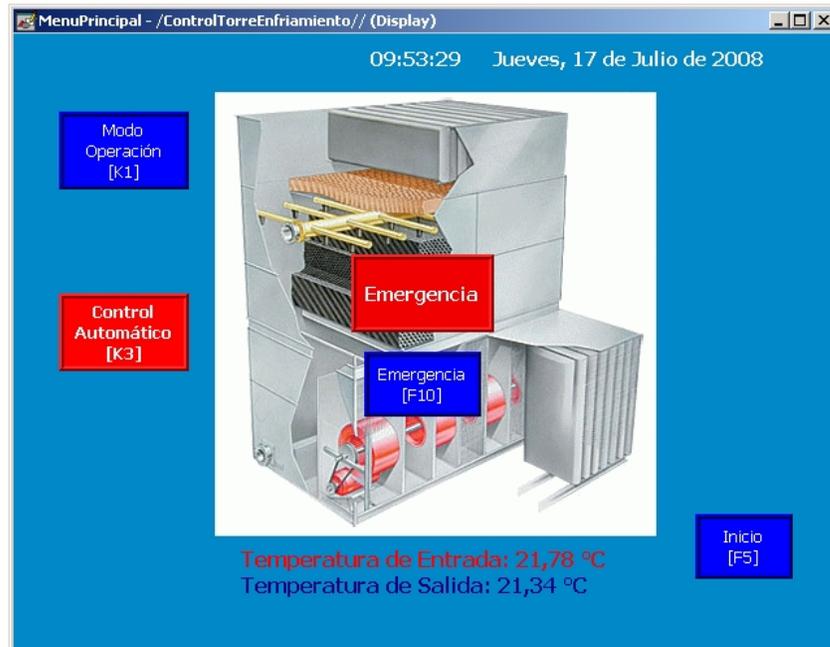
Cada error es almacenado en la ventana de historial de alarmas, de modo que se pueda llevar un recuento de la hora y fecha en que se dio un determinado evento y sentar las responsabilidades del caso, en cuanto a mantenimiento preventivo y correctivo respecta.



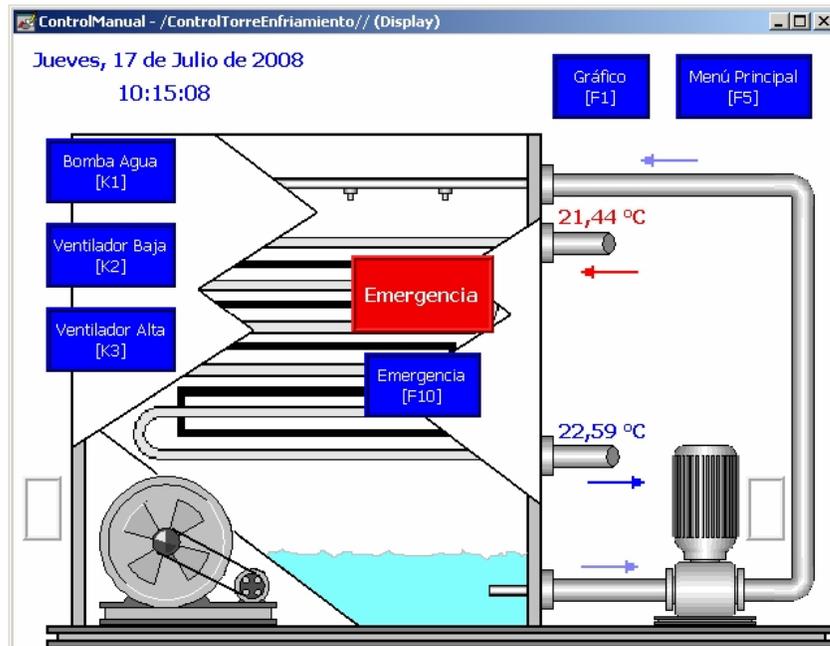
**Figura 8.24.** Historial de alarmas del sistema

## Emergencia

Si el botón de parada de emergencia es presionado, el sistema se detiene por completo como medida de seguridad para evitar un posible accidente laboral o motivo de fuerza mayor que necesite apagar el sistema por completo.

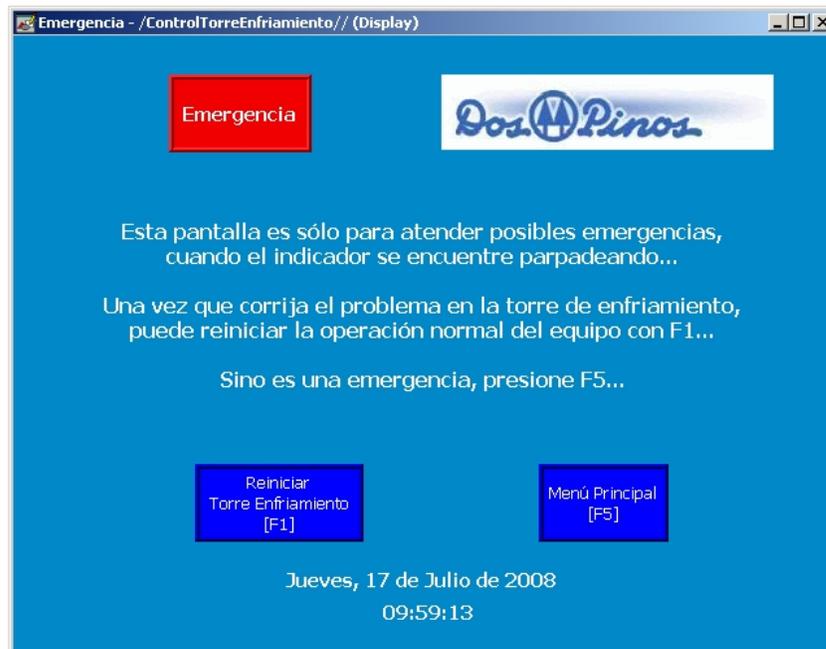


**Figura 8.25.** Atención de parada de emergencia (*principal*)



**Figura 8.26.** Atención de parada de emergencia (*operación*)

Una vez que la emergencia haya terminado; el sistema puede volver a activarse presionando el botón F10 en la ventana principal o de operación, según se encuentre la operación del sistema.

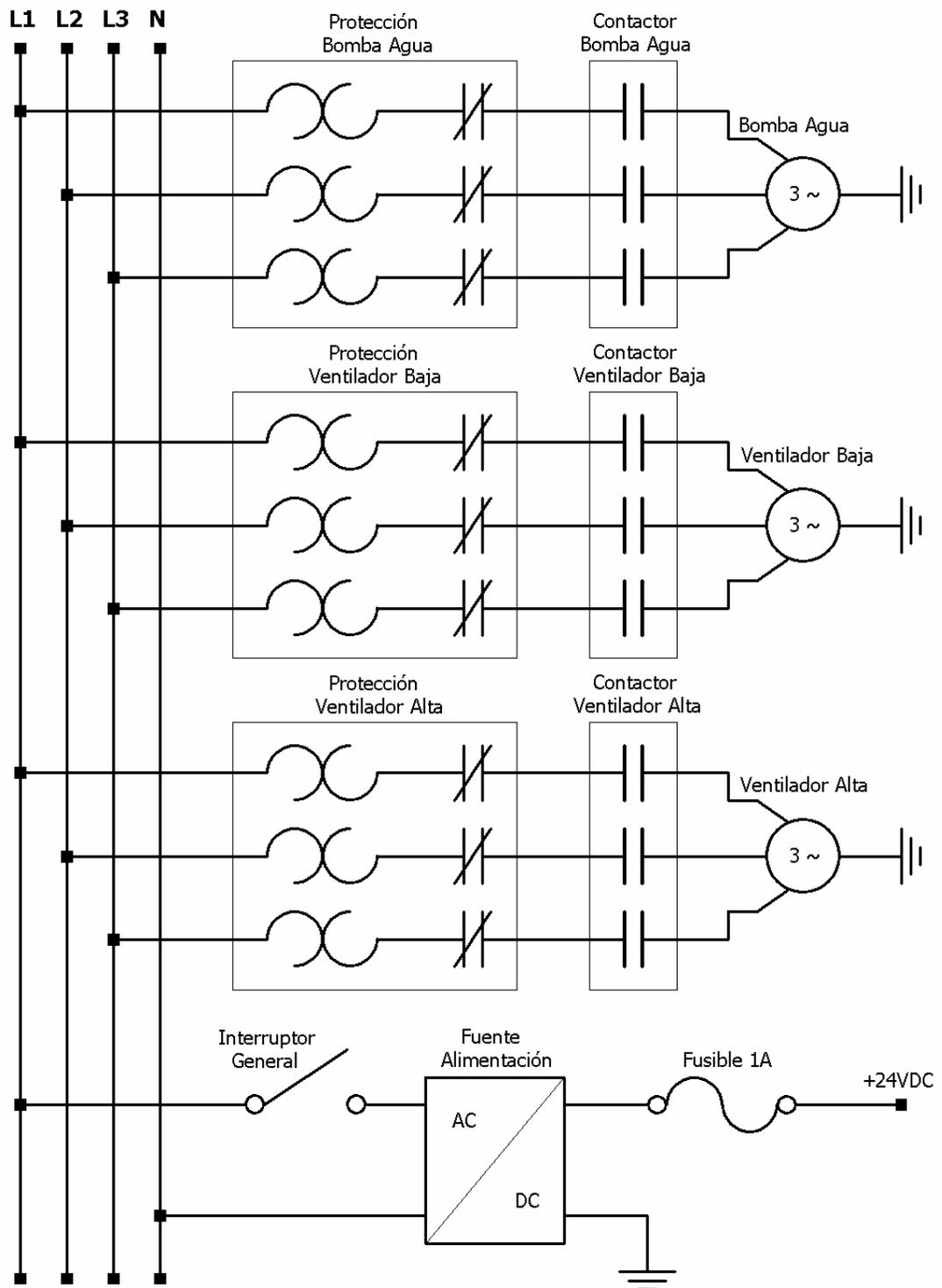


**Figura 8.27.** Ventana de atención de parada de emergencia

Una vez en la ventana de atención de la emergencia, el usuario debe presionar F1 para reiniciar la operación de la torre de enfriamiento de los compresores de aire.

Para regresar al menú principal y seguir el funcionamiento normal del equipo solo hace falta presionar F5 y el usuario podrá seguir utilizando el sistema de manera normal.

## 8.4. Diagrama eléctrico



**Figura 8.28.** Diagrama eléctrico

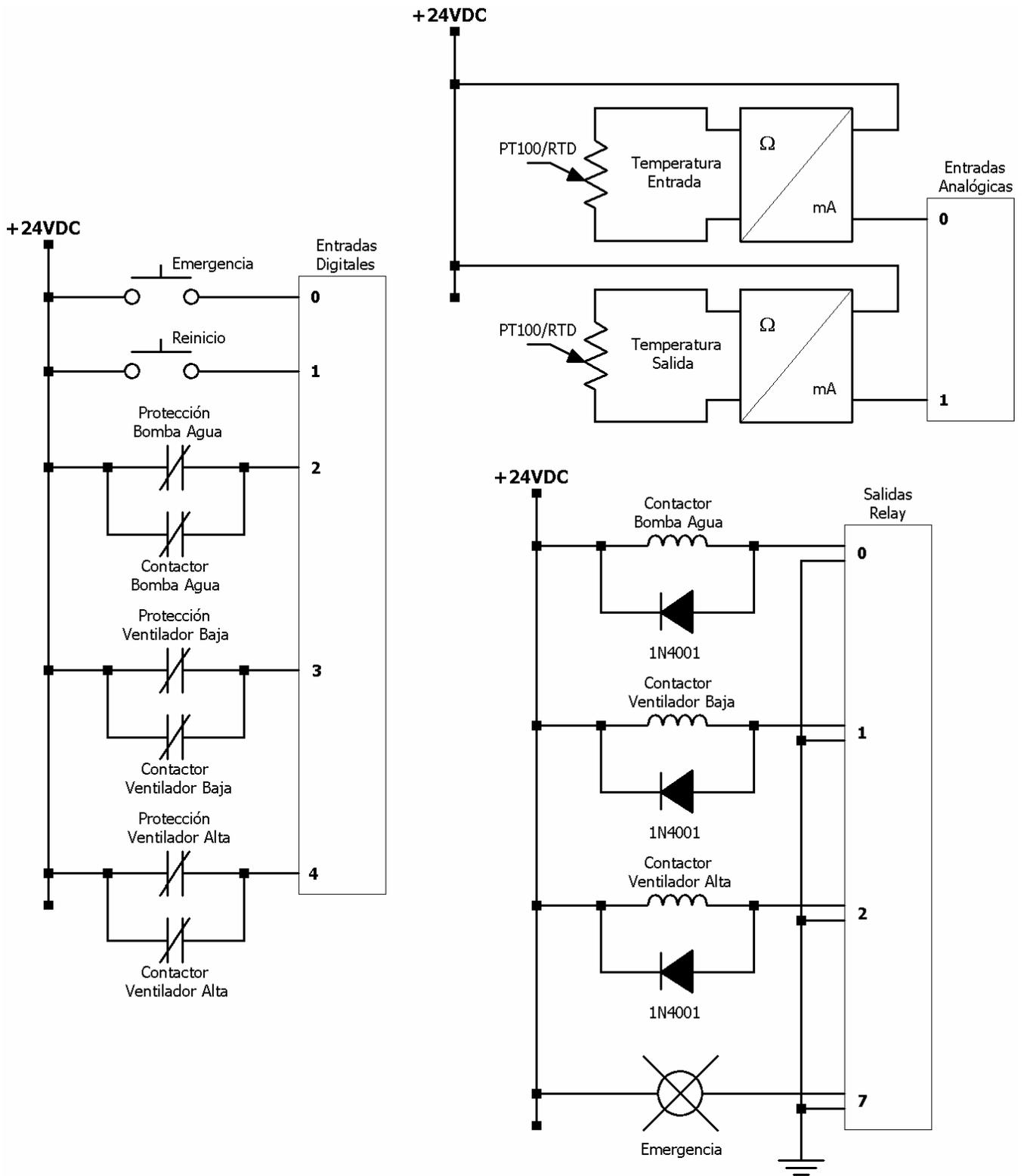


Figura 8.29. Diagrama de módulos remotos

## 8.5. Distribución de entradas/salidas

El sistema de control distribuido se encuentra configurado de la siguiente manera; de modo que para futuras actualizaciones al diseño, es recomendable tomar en cuenta dichos parámetros.

**Tabla 8.1.** Distribución de entradas digitales (1794-IB8)

Pin	Descripción
0	Parada de emergencia
1	Reinicio del sistema
2	Fallo de bomba de agua
3	Fallo de ventilador de baja velocidad
4	Fallo de ventilador de alta velocidad
5	<i>No conectado (Disponible)</i>
6	<i>No conectado (Disponible)</i>
7	<i>No conectado (Disponible)</i>

**Tabla 8.2.** Distribución de entradas analógicas (1794-IE8)

Pin	Descripción
0	Temperatura de entrada (4 ~ 20 mA)
1	Temperatura de salida (4 ~ 20 mA)
2	<i>No conectado (Disponible 4 ~ 20 mA)</i>
3	<i>No conectado (Disponible 4 ~ 20 mA)</i>
4	<i>No conectado (Disponible 4 ~ 20 mA)</i>
5	<i>No conectado (Disponible 4 ~ 20 mA)</i>
6	<i>No conectado (Disponible 4 ~ 20 mA)</i>
7	<i>No conectado (Disponible 4 ~ 20 mA)</i>

**Tabla 8.3.** Distribución de salidas de relé (1794-OW8)

Pin	Descripción
0	Bomba de agua fría
1	Ventilador de baja velocidad
2	Ventilador de alta velocidad
3	<i>No conectado (Disponible)</i>
4	<i>No conectado (Disponible)</i>
5	<i>No conectado (Disponible)</i>
6	<i>No conectado (Disponible)</i>
7	Emergencia

## 9. Anexos

### 9.1. Datos de motores y protecciones

**Tabla 9.1.** Datos de placa de los motores

<b>Motor</b>	<b>Potencia (HP)</b>	<b>Velocidad (RPM)</b>	<b>Tensión (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>
Bomba de agua fría	0.5	3450	230/460	2.1/1.0
Ventilador de baja velocidad	2.0	1730	230/460	7.0/3.5
Ventilador de alta velocidad	7.5	1760	230/460	23.2/11.6

**Tabla 9.2.** Protecciones seleccionadas

<b>Motor</b>	<b>Protección (A)*</b>
Bomba de agua fría	16
Ventilador de baja velocidad	4
Ventilador de alta velocidad	1

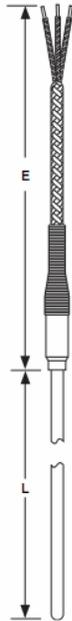
\* Operando en configuración de 480VAC.

## 9.2. Hojas de datos

### Sensor de temperatura PT100 / RTD

#### RTDs and Thermistors

##### RTD Style RF Metal Transitions



##### Features and Benefits

###### Stainless steel transitions

- Crimped to sheath and filled with 260°C (500°F) epoxy
- Optional brazing available

###### Coiled spring strain relief

- Protects lead wire against sharp bends in the transition area

###### Flexible mineral insulated construction

- Provides a bendable and highly durable sensor

###### Temperature rating

- -200 to 650°C (-328 to 1200°F)

###### High accuracy

- Dependable readings

###### Diameters available

- 0.125 to 0.250 inch O.D.

② Requires two- or three-wire only, single element only

##### Rapid Ship Sensors

Rapid Ship sensors come with 100Ω DIN 0.00385 curve, 316 stainless steel, 0.188 inch diameter, 24 AWG stranded Teflon® three-wire, four foot leads, temperature rating -200 to 650°C (-328 to 1200°F), standard split end lead termination and no mounting fittings. See page 166 to order additional connector hardware.

Class Accuracy	Sheath Length in. (mm)	Part Number 4 foot (102 mm) Leads
A	3 (76)	RFHB0TK030BA040
	6 (152)	RFHB0TK060BA040
	9 (229)	RFHB0TK090BA040
	12 (305)	RFHB0TK120BA040

Custom Ordering Information—Items in **Bolded Green Type** are preferred with shorter lead times.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

**R F**

1-2. Style  
F = Metal transition with strain relief

3. Sheath O.D. (inch)  
G = 0.125  
**H = 0.188**  
J = 0.250

4. Lead Wire Construction  
Standard Overbraid Flex Armor  
Fiberglass Stranded **A** J R  
PFA or TFE Stranded **B** L T

5. Fittings  
If required, enter order code from pages 39 to 40.  
**If none, enter "0"**.

6. Lead Wire Termination  
A<sup>②</sup> = Standard male plug  
B<sup>②</sup> = Standard female plug  
C<sup>②</sup> = Standard plug with mating connector  
J<sup>②</sup> = Male miniature plug  
K<sup>②</sup> = Female miniature jack  
L<sup>②</sup> = Male/female mini set  
**T = Standard leads**  
U = Leads with spade lugs

7. Sheath Construction  
316 SS Alloy 600  
Mineral Insulated **K** **L**

8-9. Sheath Length "L" (inch)  
**03, 06 and 12**  
Whole inches: 03 to 99  
Metric lengths and lengths over 99 inches consult factory.

10. Sheath Length (fractional inch)  
**0 = No fraction, whole inches**  
1 = ¼ 3 = ⅜ 5 = ½ 7 = ¾  
2 = ¼ 4 = ½ 6 = ¾

11. Element  
2-wire 3-wire  
100Ω Single **A** **B**

12. Temperature Coefficient  
DIN 0.00385  
**A = Class A**  
**B = Class B**

13-14. Lead Wire Length "E" (foot)  
**02 and 04**  
Whole feet: 01 to 99

15. Special Requirements  
**0 = None**  
X = Special requirements, consult factory

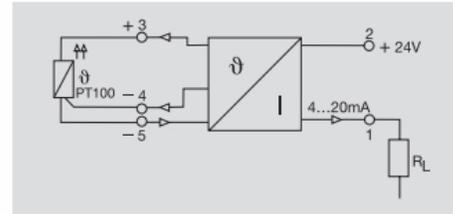
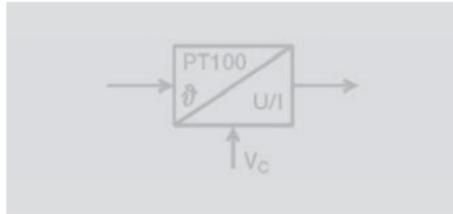
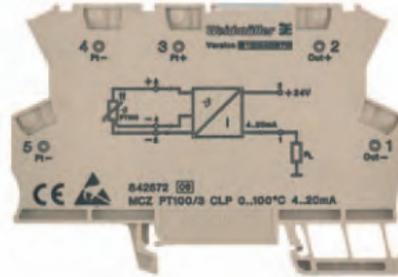
## Convertidor PT100 / RTD (4~20 mA)

### PT100 / RTD - signal isolator/converter

#### PT100, 2-/3-Conductor disconnecter converter

- For 2- or 3-conductor PT100 sensors
- Loop-fed output current
- High accuracy and linearity

#### MCZ PT100/3 CLP



#### Technical data

Input	
Sensor	PT100/2-/3-conductor
Feed current	0.8 mA
Output	
Output current	4...20 mA (current loop)
Load resistance voltage/Current	/< = 600 Ω
Accuracy/Influence of cable resistance	typical 0.2%, max. 0.5% of FSR/max. 0.6 K/Ω
Response time	10 ms
General data	
Operation temperature/Storage temperature	0 °C...+50 °C/-20 °C...+85 °C
Approvals	CSA;UL/UR;CE;ESD;
Standards	EN 50178, EN 60751, IEC751
EMC standards	EMVG, EN 50081-1, EN 50082-2
Dimensions	
Clamping range (rating- / min. / max.)	mm² 1.50 / 0.50 / 1.50
Length x width x height	mm 91.0 x 6.0 x 63.2
Information	
	Tu=23°C, single module

#### Ordering data

Temperature input range	Type of connection	Type	Qty.	Order No.
0...100 °C	Tension clamp c.	MCZ PT100/3 CLP 0...100C	10	8425720000
0...120 °C	Tension clamp c.	MCZ PT100/3 CLP 0...120C	10	8483680000
0...150 °C	Tension clamp c.	MCZ PT100/3 CLP 0...150C	10	8604420000
0...200 °C	Tension clamp c.	MCZ PT100/3 CLP 0...200C	10	8473010000
0...300 °C	Tension clamp c.	MCZ PT100/3 CLP 0...300C	10	8473020000
-50...+150 °C	Tension clamp c.	MCZ PT100/3 CLP -50C...+150C	10	8473000000
-40...+100 °C	Tension clamp c.	MCZ PT100/3 CLP -40C...100C	10	8604430000

#### Information

## Controlador FlexLogix 5434

LISTEN.  
THINK.  
SOLVE.<sup>SM</sup>

# FLEXLOGIX CONTROLLERS



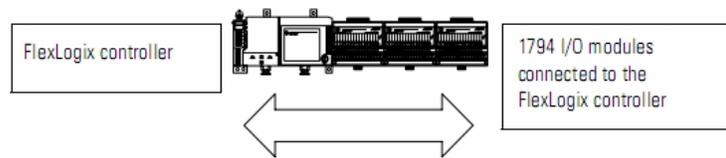
1794-L34



## Where to Start

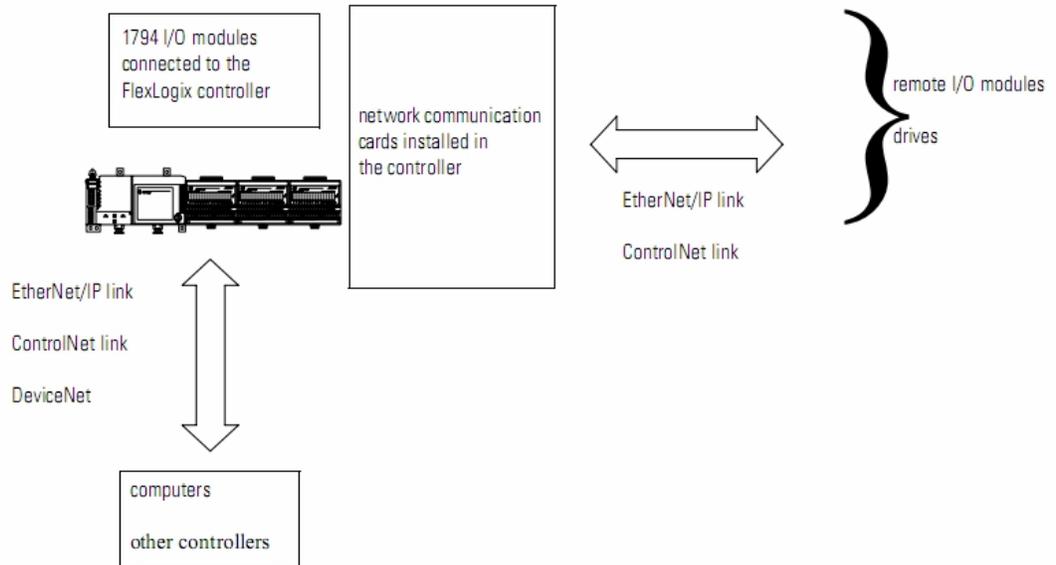
### Use This Chapter

The FlexLogix controller offers state-of-art control, communications, and I/O elements in a distributed control package..



For a more flexible system, use:

- multiple controllers joined across networks
- I/O from multiple platforms that is distributed in many locations and connected over multiple I/O links



The FlexLogix controller, part of the Logix family of controllers, provides a small, powerful, cost-effective system built on the following components:

- 1794-L34 FlexLogix controller available in 512 Kbytes of user memory.
- FlexLogix controller that supports the Logix instructions.
- RSLogix 5000 programming software that supports every Logix controller.
- FLEX I/O modules that provide a compact, DIN-rail mounted I/O system.
- 1788 communication daughtercard that provides communication over standard-based ControlNet, DeviceNet or EtherNet/IP networks. The controller allows the insertion of daughtercards for up to 2 networks (e.g., one for DeviceNet and one for EtherNet/IP).

## Design

### See:

- *FlexLogix Selection Guide*, 1794-SG001
- *Logix5000 Controller Design Considerations Reference Manual*, 1756-RM094

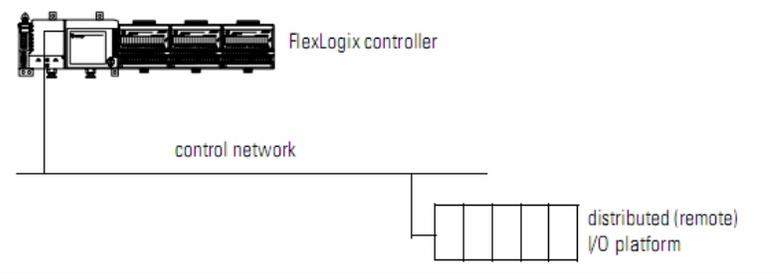
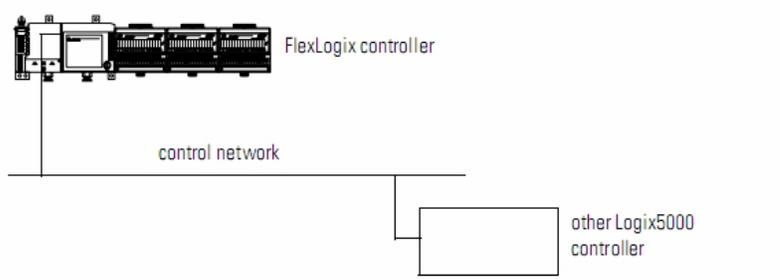
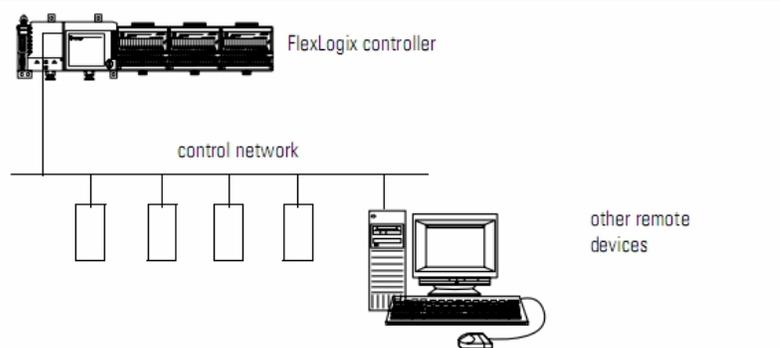
When designing a FlexLogix system, determine the network configuration and the placement of components in each location. Make these decisions as you design your system:

<b>Design Step</b>	
<b>O 1.</b>	Select I/O devices
<b>O 2.</b>	Select communication cards
<b>O 3.</b>	Select controllers
<b>O 4.</b>	Select power supplies
<b>O 5.</b>	Select software

## Communicate over Networks

### Use This Chapter

The FlexLogix controller supports additional networks so that the controller can:

Supported networks for:	Example:
<p>Control distributed (remote) I/O</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• EtherNet/IP</li> <li>• ControlNet</li> <li>• DeviceNet</li> </ul>	 <p>The diagram shows a FlexLogix controller (represented by a rack of modules) connected to a distributed (remote) I/O platform. A horizontal line labeled 'control network' connects the controller to the I/O platform, which is represented by a row of five rectangular modules.</p>
<p>Produce/consume (interlock) data between controllers</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• EtherNet/IP</li> <li>• ControlNet</li> </ul>	 <p>The diagram shows a FlexLogix controller (represented by a rack of modules) connected to another Logix5000 controller. A horizontal line labeled 'control network' connects the two controllers, which are represented by rectangular boxes.</p>
<p>Send and receive messages to and from other devices (this includes access to the controller via RSLogix 5000 programming software)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• EtherNet/IP</li> <li>• ControlNet</li> <li>• DeviceNet (to devices only)</li> <li>• serial</li> <li>• DH-485</li> </ul>	 <p>The diagram shows a FlexLogix controller (represented by a rack of modules) connected to other remote devices. A horizontal line labeled 'control network' connects the controller to four rectangular boxes representing devices and a computer workstation (monitor, keyboard, mouse) representing RSLogix 5000 programming software.</p>

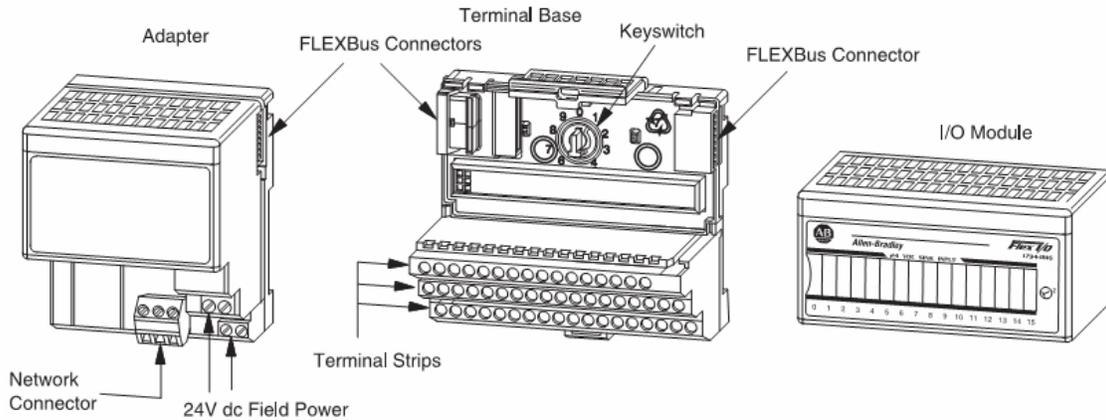
## Módulos de control distribuido Flex I/O

LISTEN.  
THINK.  
SOLVE.<sup>SM</sup>

# FLEX I/O AND FLEX EX



## FLEX I/O Overview



FLEX I/O offers:

**FLEX I/O complements all of our processor platforms** and acts as local I/O for FlexLogix controllers, creating a tightly integrated control and I/O solution.

**Flexible, low-cost, modular I/O for distributed applications.** FLEX I/O offers all the functions of larger, rack-based I/O without the space requirements. Independently select the I/O, termination style, and network to meet your application needs.

**Two separate connection terminals for field power** let you daisy-chain power connections to adjacent terminal bases.

**One adapter communicates with up to eight I/O modules.** Allows connection to:

- 256 digital input/output points, or
- 96 analog input/output points, or
- mix of I/O to meet your needs.

**Modularity of FLEX I/O system** provides choice of network and ease of expansion.

**The wiring terminations** are done almost entirely on the terminal base.

**Terminal base termination selection** includes screw-clamp, spring-clamp, and cage-clamp to wire directly to 2-, 3-, or 4-wire devices. Additional options of D-shell, knife disconnect, and fused are available.

**Adjustable keyswitch** prevents incorrect module insertion into a preconfigured terminal base.

**Terminal bases can be exchanged** without moving other bases in your system.

**If desired, connect individual power supplies** to each base to isolate modules.

**Plug the I/O module into the terminal base** to connect the I/O bus and field devices.

**Remove and insert modules under power.** No direct wiring to the module enables you to change modules without disturbing field wiring or system power.

**Mix and match I/O modules.** Wide variety of digital, analog, and specialty modules.

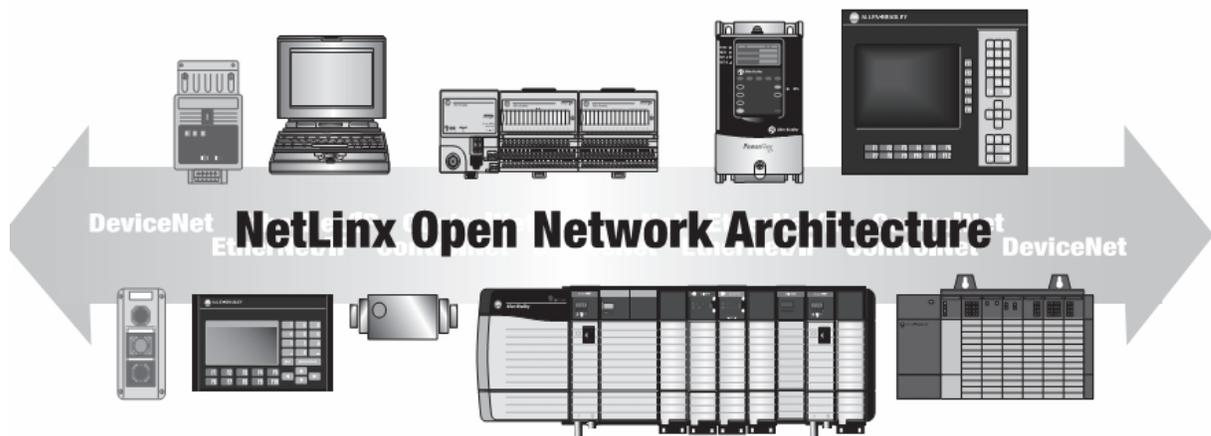
**Conformal coating available** in select FLEX I/O products.

Each FLEX I/O system contains at least one adapter, terminal base, and I/O module. You can power the system with a FLEX power supply (1794-PS13 or -PS3) or any other compatible power source. Use the terminal block on the terminal base to wire your field devices directly. Wiring directly saves you:

- installation and testing time
- multiple, long wiring runs and external terminal blocks
- control cabinet panel space

FLEX I/O provides additional savings if system problems develop. Combining your field-wiring terminations and the I/O interface into the same location saves you time and money by making your system easier to maintain and troubleshoot. Additionally, the full-featured FLEX I/O system lets you, in non-hazardous location, remove and insert modules under backplane power without disrupting your system.

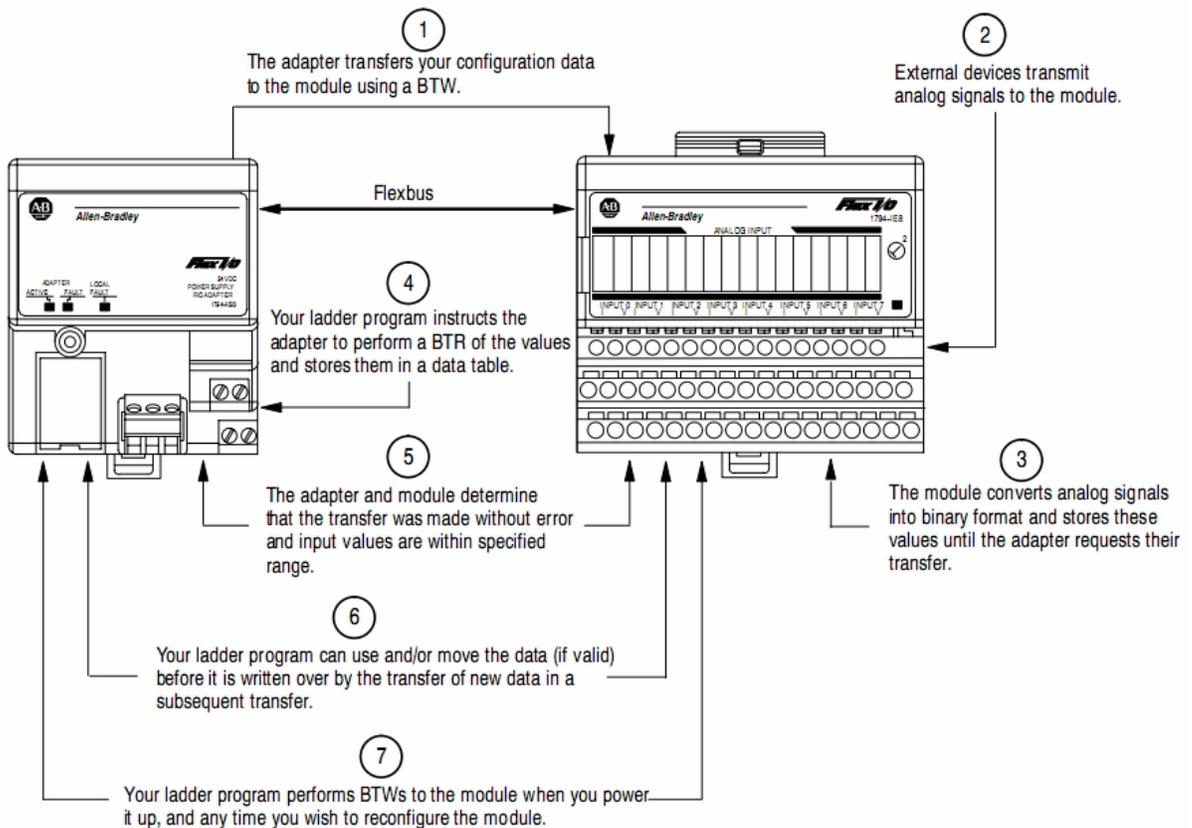
Your FLEX I/O system can communicate on EtherNet/IP, ControlNet, DeviceNet, and many other open networks including, but not limited to, Remote I/O, PROFIBUS DP, and Interbus-S. Adapters and other components are available for adding to your system as your specific application requirements change.



## How FLEX I/O Analog Modules Communicate with Programmable Controllers

The adapter/power supply transfers data to the module (block transfer write) and from the module (block transfer read) using BTW and BTR instructions in your ladder diagram program. These instructions let the adapter obtain input values and status from the module, and let you send output values and establish the module's mode of operation. Figure 1.1 describes the communication process.

**Figure 1.1**  
An Example of Communication Between an Adapter and an Analog Input Module



**Pantalla de visualización PanelView Plus 700**

# PanelView Plus Terminals



**User Manual**

**(Catalog Numbers 400, 600, 700, 1000,  
1250, 1500)**

## PanelView Plus 700 to 1500 Terminals

This section gives an overview of the PanelView Plus 700, 1000, 1250, 1500 terminals.

- Modular components
- Base-configured unit
- Communication modules
- Logic module, standard or CE
- Power supply, ac or dc
- Display modules

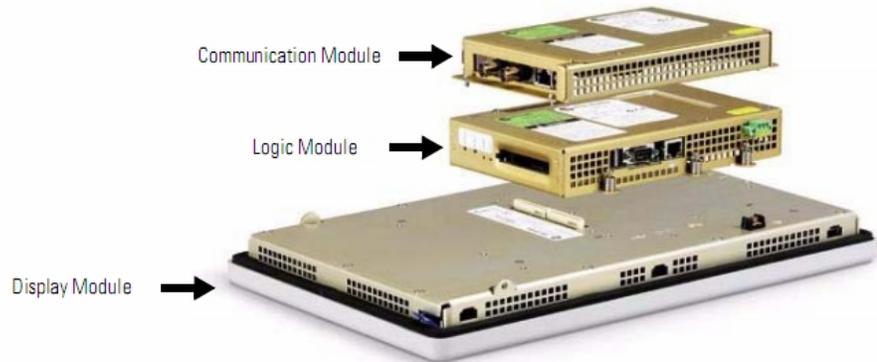


The PanelView Plus 700 to 1500 terminals are HMI devices that offer these features:

- Graphic color-display modules with keypad, touch screen, or keypad and touch screen support
- Analog resistive touch screen
- Ethernet and serial communications
- Modular communication interface for easy add-on capability
- Memory expansion modules for field upgrades to 256 MB RAM and 512 MB CompactFlash
- Power input, ac (85...264V ac) or dc (18...32V dc)
- CompactFlash card slot supports Type 1 CompactFlash cards
- USB ports provide connections for keyboard, mouse, and printer
- Field replaceable bezels
- Same panel cutouts as the PanelView Standard and PanelView Enhanced terminals
- Standard or CE logic module
- 650 MHz Celeron processor in PanelView Plus CE terminals

## Modular Components

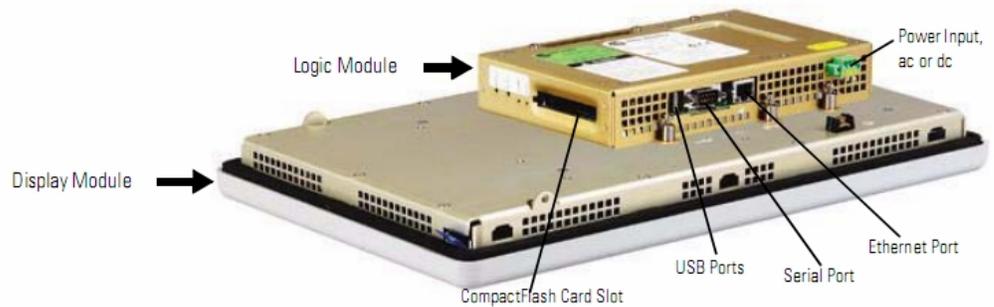
The terminals use modular components allowing for flexible configuration, installation, and upgrades. You can order items as separate components or factory assembled per your configuration.



## Base-configured Unit

The base-configured unit of the terminal consists of:

- display module (700, 1000, 1250, 1500) with keypad, touch, or keypad and touch input.
- logic module.



The logic module contains:

- 24V dc input (18...32V) or ac input (85...264V).
- SDRAM and flash memory, various sizes.
- 10/100 BaseT Ethernet port.
- serial RS-232 port for file transfers, printing, and logic controller communications.
- two USB ports for attaching mouse, keyboard, or printer.
- card slot for Type I CompactFlash cards.
- battery-backed real-time clock.

## Logic Modules and CompactFlash

The logic module is available with or without internal CompactFlash. The contents of the internal CompactFlash is what differentiates a PanelView Plus device from a PanelView Plus CE device.

- For the PanelView Plus terminals, the internal CompactFlash contains FactoryTalk View ME software and flash memory.
- For the PanelView Plus CE terminals, the internal CompactFlash contains the open Windows CE operating system, FactoryTalk View ME software, and flash memory.

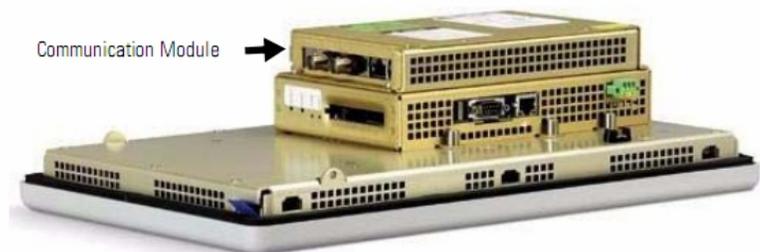
The internal CompactFlash is available in different sizes and can be ordered separately or bundled with the logic module.

## Communication Modules

You can attach a communication module with a network interface to the base-configured unit of the terminal to increase your communication capability with these networks:

- DH+/DH-485/Remote I/O
- DeviceNet
- ControlNet

The communication module installs easily on top of the logic module on the back of the unit.



## Power Options

The base-configured units of the 700 to 1500 PanelView Plus terminals are available with either ac (85...264V) or dc (18...32V) power input providing application flexibility.

For dc applications using ac power, a remote ac-to-dc power supply, cat. no. 2711P-RSACDIN, is available for DIN-rail mounting.

## Display Modules

The terminals offer a range of TFT color graphic displays with either keypad, touch screen, or keypad and touch screen support.

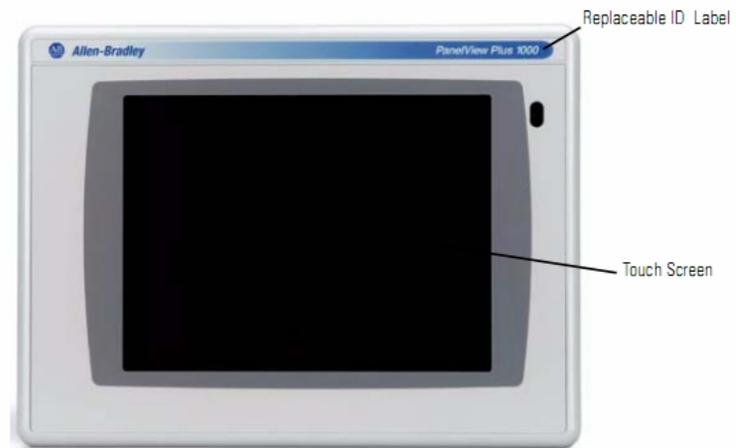
- 700 (6.5 in.)
- 1000 (10.4 in.)
- 1250 (12.1 in.)
- 1500 (15 in.)

The 700 and 1250 touch displays are available in conformal-coated options. A 1250 high-bright, touch display module is available for outdoor installations. Plus the 1250 and 1500 touch displays offer an integral antiglare overlay.

All displays have common features and firmware providing for easy migration to a larger display. Field-replaceable bezels are also available.

### *Touch Screen*

All touch-screen displays are analog resistive and similar except for size.



---

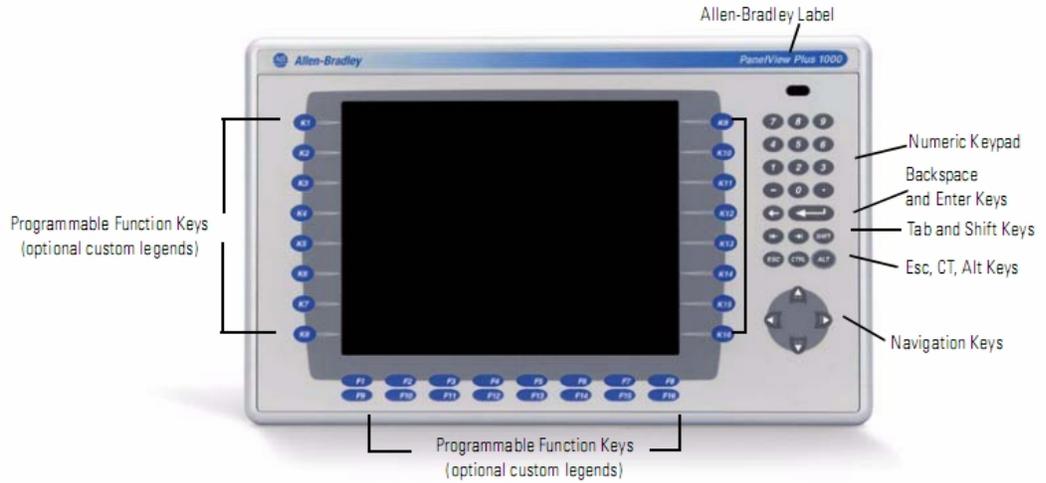
**IMPORTANT**

Use a plastic stylus device with a minimum tip radius of 1 mm (0.040 in.) to prevent damage to the touch screen.

---

*Keypad or Keypad and Touch*

All displays are similar except for size and the number of function keys available.



The Kxx and Fxx function keys on the keypad terminals are programmable.

Function Keys	Description
Function Keys 700 (F1 through F10, K1 through K12) 1000 (F1 through F16, K1 through K16) 1250 (F1 through F20, K1 through K20) 1500 (F1 through F20, K1 through K20)	Programmable keys that initiate functions on terminal display. Replaceable legends are available for the terminals allowing for custom function key labels.
Numeric Keypad	0...9, ., -, Backspace, Enter, Left and Right tab, Shift, Esc, Ctrl, Alt keys.
Navigation Keys	Use the arrow keys to move cursor in lists and select objects. Alt+arrow key activates home, end, page up, page down functions.