

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Control de un sistema de distribución de agua HVAC tipo Chilled Water

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

Christian Almengor Morales

Cartago, Mayo del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

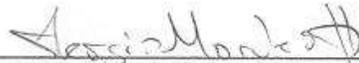
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Carlos Badilla Corrales

Profesor lector



Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor lector



Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor asesor

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

Cartago, 3 de Mayo del 2010

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

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

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

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

Cartago, 3 de mayo del 2010



Christian Almengor Morales

Cédula: 1-1243-0041

RESUMEN

La empresa Gallito es una de las empresas líderes en la producción de chocolates en el país. Para que su producción tenga el mayor éxito posible es necesario que todo esté controlado en forma óptima.

Es esencial que se mantenga una temperatura fija en el ambiente debido a que incrementos o decrementos en la misma puede afectar el acabado final del producto. El mantener esta temperatura constante se logra mediante un sistema de enfriamiento HVAC tipo Chilled Water.

La empresa cuenta con un sistema de Chilled Water de 2 etapas. Actualmente solamente una está en funcionamiento, lo que ocasiona que debe pararse la producción cuando se le debe hacer mantenimiento, por lo que es necesario diseñar una etapa de control en la cual se vean involucrados las 2 etapas trabajando en conjunto y que permitan que el proceso productivo no se vea afectado cuando alguna de ellas no esté en funcionamiento.

El presente documento propone mediante métodos de control automático, una solución para obtener el control de los chiller Water que mejor se adecúe a los requerimientos propuestos por la empresa.

Palabras claves: Chilled water, HVAC, control automático, modelo matemático.

ABSTRACT

The Gallito company is one of the leading companies in the production of chocolates in the country. For your production has the greatest success is necessary that everything is controlled optimally.

It is essential to maintain a fixed temperature in the environment due to increases or decreases in itself can affect the finished product. Maintaining constant temperature is achieved through a cooling system HVAC Chilled Water type.

The company has a Chilled Water system in 2 stages. Currently only one is running, causing production to be stopped when you should do maintenance, so it is necessary to design a control stage in which they are involved 2 stages working together and allow the process production is not affected when one of them is not running.

This paper proposes using automatic control methods, a solution for the control of Water chiller that best suits the requirements proposed by the company.

Keywords: Chilled water, HVAC, automatic control, mathematical model

DEDICATORIA

A mi madre y padre, a mis hermanos, mis tíos y mis abuelitas que nunca perdieron a fe en mí y siempre me han apoyado.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la calma, la inteligencia y el razonamiento ante las diferentes situaciones que me encontré en este difícil camino.

A mis padres por darme la oportunidad de estudiar y siempre haberme brindado los consejos y herramientas necesarias para cumplir mis metas.

A mis abuelitas y mi familia por darme toda su comprensión y buenos consejos cuando los necesité.

A todos los profesores que me dieron sus consejos, me brindaron su experiencia y me enseñaron las bases para llegar a lograr mis objetivos.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros que estuvieron conmigo en las buenas y en las malas y me brindaron sus conocimientos y hicieron de igual manera muy ameno estos años juntos a ellos.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución	1
1.2 Solución seleccionada.....	4
Capítulo 2. Meta y Objetivos	7
2.1 Meta	7
2.2 Objetivos	7
2.2.1 Objetivo general.....	7
2.2.2 Objetivos específicos.....	7
Capítulo 3. Marco teórico.....	9
3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar.....	9
3.1.1 Sistemas enfriadores de líquido.....	9
3.1.2 Centro de control eléctrico	10
3.1.3 Ciclo de refrigeración.....	10
3.1.4 Evaporador	11
3.1.5 Condensadores	11
3.1.6 Compresores	12
3.1.7 Válvulas automáticas de expansión.....	13
3.1.8 Tipo de refrigerante	13
3.2 Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema	13
3.2.1 Controlador Lógico Programable	13
3.2.2 Modelo matemático de sistemas térmicos.....	14
3.2.3 Modelo matemático sensores	16

3.2.4	Modelo matemático de válvulas.....	17
3.2.5	Controladores	19
3.2.6	Criterios de estabilidad	24
Capítulo 4. Procedimiento metodológico		28
4.1	Reconocimiento y definición del problema	28
4.2	Obtención y análisis de información.....	28
4.3	Implementación de la solución	29
4.4	Reevaluación y rediseño	30
Capítulo 5. Descripción detallada de la solución.....		31
5.1	Análisis de soluciones y selección final.....	31
5.1.1	Modelo matemático de condensador.....	31
5.1.2	Modelo matemático de evaporador	33
5.1.3	Modelo matemático del sensor de temperatura.....	35
5.1.4	Modelo matemático del sensor de presión	35
5.1.5	Modelo matemático de la válvula.....	36
5.1.6	Diseño del control	37
5.1.7	Diseño del control On-Off con histéresis del condensador	42
5.2	Descripción del hardware.....	45
5.2.1	Controlador lógico programable.....	45
5.2.2	Diseño del panel de control	48
5.3	Descripción del software	54
5.3.1	Software del PLC en Rslogix500	54
5.3.2	Programa para verificación de rutinas en FactoryTalk Viem Studio ..	62
5.3.3	Matlab/Simulink	64
5.3.4	Control Station.....	65

Capítulo 6. Análisis de Resultados	66
6.1 Resultados y análisis.....	66
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones.....	85
7.1 Conclusiones.....	85
7.2 Recomendaciones.....	85
Capítulo 8. Bibliografía.....	86
Capítulo 9. Apéndices	88
A.1 Glosario.....	88
A.2 Tabla de respuesta ante una entrada escalón	89
A.3 Información sobre la empresa/institución	91
A.4 Planos eléctricos	92
A.5 Hojas de datos	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de bloques del control del condensador	4
Figura 1.2 Diagrama de bloques del control del evaporador	5
Figura 3.1 Típico Sistema de refrigeración por líquido	9
Figura 3.2 Diagrama de bloques controlador PI	19
Figura 3.3 Control On-OFF.....	21
Figura 3.4 Control On-Off con histéresis	22
Figura 3.5 Características dinámicas de un Control On-OFF con histéresis	24
Figura 3.6 Curva experimental para obtener los parámetros del Método Ziegler-Nichols	27
Figura 5.1 Gráfica de respuesta ante un escalón en un condensador	31
Figura 5.2 Gráfica de respuesta ante un escalón en el evaporador	33
Figura 5.3 Respuesta al escalón en lazo abierto de la válvula y el evaporador ...	40
Figura 5.4 Modelo del control de evaporador en Matlab/Simulink.....	41
Figura 5.5 Modelo del control de evaporador con las 2 válvulas en Matlab/Simulink	42
Figura 5.6 Modelo del compresor con el control On-Off en Matlab/Simulink.....	43
Figura 5.7 Curva de histéresis del comportamiento del control On-Off	44
Figura 5.8 Diagrama físico del Micrologix 1100.....	45
Figura 5.9 Switch del módulo 1762sc-IF8u	47
Figura 5.10 Diagrama eléctrico de circuito de potencia.....	50
Figura 5.11 Configuración de I/O	54
Figura 5.12 Configuración de las entradas y salidas analógicas.....	55
Figura 5.13 Diagrama de flujo principal	56
Figura 5.14 Diagrama de flujo Alarma.....	57
Figura 5.15 Diagrama de Flujo encendido de Motores.....	58
Figura 5.16 Bloque de escalamiento	60
Figura 5.18 Pantalla para fijar valores del PID	62
Figura 5.19 Pantalla para verificación del Control On/Off	63
Figura 5.20 Pantalla para verificación del encendido de los compresores	64

Figura 6.1 Simulación de la función de transferencia del condensador obtenida en Simulink.....	67
Figura 6.2 Simulación de la función de transferencia del evaporador obtenida en Simulink.....	67
Figura 6.3 Lugar de las raíces del sistema sin compresor en Matlab.....	69
Figura 6.4 Comportamiento del sistema con compensador a un SetPoint de 5° en Simulink.....	71
Figura 6.5 Lugar de las raíces con el compensador diseñado.	72
Figura 6.6 Comportamiento del sistema con compensador a un SetPoint de 5°C en Control Station.....	73
Figura 6.7 Comportamiento del sistema con compensador ante perturbaciones a un SetPoint de 5° en Simulink.....	74
Figura 6.8 Comportamiento del sistema con compensador ante perturbaciones a un SetPoint de 5° en Control Station.....	75
Figura 6.9 Comportamiento del sistema siguiendo diferentes SetPoints en Control Station.	75
Figura 6.10 Comparación entre comportamientos del sistema con una válvula y el sistema con 2 válvulas compensados en Simulink.....	76
Figura 6.11 Comportamiento del condensador ante perturbaciones con control y sin control.....	78
Figura 6.12 Comportamiento del control On-Off sin perturbaciones	79
Figura 6.13 Comportamiento del control On-Off ante perturbaciones.....	80
Figura 6.14 Simulación del Control On-Off con histéresis del PLC	81
Figura 6.15 Simulación de las alarmas del Control On-Off con Histéresis del PLC	82
Figura 6.16 Simulación de encendido en los compresores con solo un motor compresor	83
Figura 6.17 Simulación de encendido en los compresores con solo un motor compresor	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Arreglo de Routh-Hurtwitz	26
Tabla 5.1 Valores obtenidos de la curva de comportamiento ante un escalón unitario en el condensador	32
Tabla 5.2 Valores obtenidos de la curva de comportamiento ante un escalón unitario en el evaporador.....	34
Tabla 5.3 Valores de diseño reales para diseño del modelo de la válvula.	36
Tabla 5.4 Arreglo e Routh	38
Tabla 5.5 Característica del Micrologix 1100.....	46
Tabla 5.6 Asignación de las entradas y salidas de los módulos.....	48
Tabla 5.7 Notación de colores de bornes dentro gabinete normado por Sistemas IQ S.A.....	51
Tabla 5.8 Notación en cableado dentro gabinete normado por Sistemas IQ S.A.	52
Tabla 6.1 Comparación entre los valores experimentales y de simulación del evaporador y el condensador.....	68
Tabla 6.2 Comparación entre características dinámicas entre el sistema compensado y sin compensar.....	71
Tabla 6.3 Comparación entre características dinámicas del sistema con una válvula y el sistema con 2 válvulas compensados.	77
Tabla 6.4 Comparación entre tiempos de estabilización de condensador	77
Tabla 6.5 Comparación entre tiempos muertos de la planta del condensador.....	79
Tabla A.2.1 Valores obtenidos en el condensador ante una entrada escalón de 4.8 KW	89
Tabla A.2.2 Valores obtenidos en el evaporador ante una entrada escalón de 60 lbm/h	90

Capítulo 1. Introducción

El propósito de este proyecto es el diseño de un control para un sistema de enfriamiento de agua que pueda mantener una temperatura constante en su salida. La importancia de mantener constante esta temperatura en un ambiente controlado reside en garantizar ésta mediante una manejadora de aire instalada dentro de la fábrica.

El sistema de enfriamiento de agua está en funcionamiento en la fábrica de chocolates El Gallito. Este cuenta con dos etapas de enfriamiento que trabajan sobre un mismo evaporador. Actualmente solamente una de las etapas está en funcionamiento por lo que está ocasionando problemas de mantenimiento al sistema y pérdidas económicas a la empresa. Por lo anterior, es importante un nuevo control para que ambas etapas trabajen en conjunto.

En este proyecto se involucran conocimientos en termodinámica para comprender el sistema y en electrónica para logra diseñar el control electrónico y el panel donde va ir colocado el hardware. Para poder demostrar el funcionamiento del diseño del control se utiliza software que tenga las características de verificación.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

La compañía Kraft Foods Inc. es actualmente el más grande fabricante de alimentos de Estados Unidos y el segundo a nivel mundial. Tiene sedes en 155 países y cuenta con más 99 000 empleados en el mundo. La compañía fue fundada en 1903 y es conocida a nivel mundial por su larga historia y una gran herencia. Muchas de las marcas que ahora forman parte de la corporación han estado presentes en el mercado desde hace más de 230 años.

En el año de 1994, la empresa Kraft Foods Inc. compra la mayoría de las acciones de la compañía costarricense El Gallito Industrial que participaba en el

mercado de los chocolates y confites y que estaba afrontando dificultades económicas para obtener las materias primas, además de carecer de fondos para crear una nueva planta. Fue hasta el 2004 que Kraft Foods Inc. compró la totalidad de acciones. (1)

Actualmente El Gallito Industrial tiene una planta de chocolates de 9500 m² ubicado en San Antonio de Belén. Esta superficie está dividida en tres secciones: bodegas, manufactura de confites y manufactura de chocolates. (2)

El Gallito fabrica anualmente 6500 toneladas de productos, de las cuales un 65% son confites y el resto chocolates. En total son 120 tipos diferentes de dulces, entre los productos estacionales y los permanentes. El 50% de la producción es exportada, y tiene los primeros lugares en confites y chocolates de Centroamérica. (2)

Las nuevas instalaciones están diseñadas para que la producción se desarrolle desde el ingreso de materias primas hasta el producto terminado (producción en línea) y tuvieron un costo de US\$16 millones, de los cuales US\$2 millones se invirtieron en la planta de tratamiento de agua. El 35% de la maquinaria es nueva y el resto es la que funcionaba en su antigua planta ubicada en el cantón de Goicoechea. (2)

En el equipo que fue trasladado, se encontraba un sistema de distribución de agua HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado) tipo chilled water que es una unidad enfriadora de líquidos

Los aires acondicionados y los deshumificadores acondicionan el aire mientras que un chilled, usando la misma operación de refrigeración, enfría el agua (3), de tal manera que abren y cierran el flujo de agua a través de áreas específicas manteniendo el aire de los recintos a la temperatura deseada.

Para la ambientación de la producción de la fábrica se utilizaba una manejadora de aire (UMA). La UMA es una caja que tiene un ventilador (que es el propulsor del aire) y uno o varios serpentines (estos hacen la función de radiadores)

que están colocados (antes o después del ventilador) dentro de los ductos por donde fluye el aire. Se hace pasar agua (helada o caliente) por los serpentines permitiendo que el aire que es impulsado por el ventilador y que pasa a través de los serpentines se enfríe o se calienta según las necesidades.

El funcionamiento de los chilled water es de suma importancia para la producción de chocolates, ya que esto permite que el producto terminado se mantenga a una temperatura constante a través de la UMA para lograr una cristalización adecuada. Si la temperatura es demasiado baja, el producto tendrá problemas de sobre-cristalización y humedad y en caso contrario, una elevación de temperatura ocurrirá una des-cristalización, lo cual producirá un rápido espesamiento y un brillo apagado. La falta de un ambiente controlado podría ocasionar pérdidas millonarias en la producción por no cumplir con las especificaciones de calidad del producto.

Como actualmente solo se cuenta con una etapa del chilled water, esto está ocasionando problemas a la hora de dar mantenimiento al mismo ya que se debe apagar el sistema, con la consecuente paralización de la producción de chocolate, ya que como se mencionó anteriormente, sin un chilled water que mantenga la temperatura del agua constante a través de las UMA, el chocolate no llegaría al punto de cristalización óptima. El actual chilled water requiere de un mantenimiento más continuo que provoca constantes interrupciones en la producción.

En razón de lo anterior, se necesita implementar un control para el nuevo chilled water que compense adecuadamente la temperatura de agua a través de la UMA para la producción de chocolate y de esta manera, cuando se necesite dar mantenimiento a alguno de las dos etapas del chilled water, no se tenga que detener la producción ya que algunos de los dos se mantendrá en funcionamiento y el proceso productivo seguirá en normal funcionamiento.

Como es necesaria la puesta en marcha del nuevo chilled water, la empresa Kraft Foods Inc., contrató a la empresa nacional Sistemas de Integración Qualitativos (Sistemas IQ), para que ésta le brinde una solución de ingeniería a la compañía, así

como abastecer el equipo o hardware requerido para implementar el diseño de un nuevo sistema de control automático.

1.2 Solución seleccionada

El interés del proyecto se centra básicamente en el diseño de una alternativa que permita mantener la temperatura constante del agua a través de la UMA para la producción de chocolate. La solución consiste en obtener un control automático que sea capaz de tomar señales digitales y analógicas provenientes de diferentes sensores, ya sea para monitoreo o para el manejo de lazos de control que permitan manejar ventiladores y válvulas.

Para poder diseñar un control adecuado del sistema, es preciso obtener los modelos matemáticos de los procesos que van a ser controlados en el sistema de distribución de agua HVAC. El lograr estos modelos, requiere de a) un análisis de separación de cada uno de los componentes del sistema en subsistemas, b) la obtención de los modelos de los subsistemas por separado y c) combinarlos y obtener un modelo del sistema total. En la figura 1.1 y en la figura 1.2, se presentan los diagramas de bloques de los modelos de control propuestos para controlar los dos sistemas que tienen lazos de control cerrados (el condensador y el evaporador).

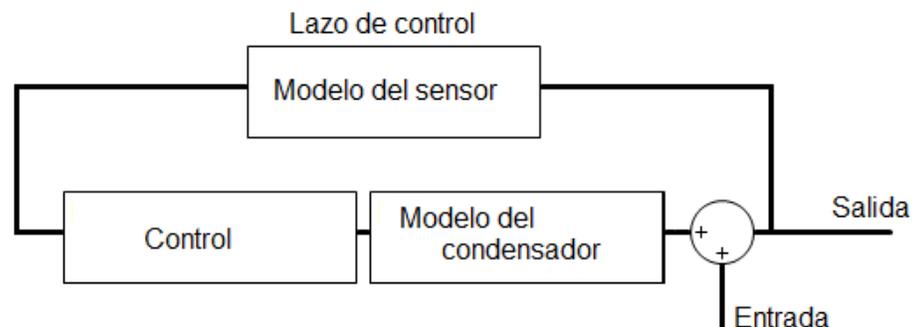


Figura 1.1 Diagrama de bloques del control del condensador

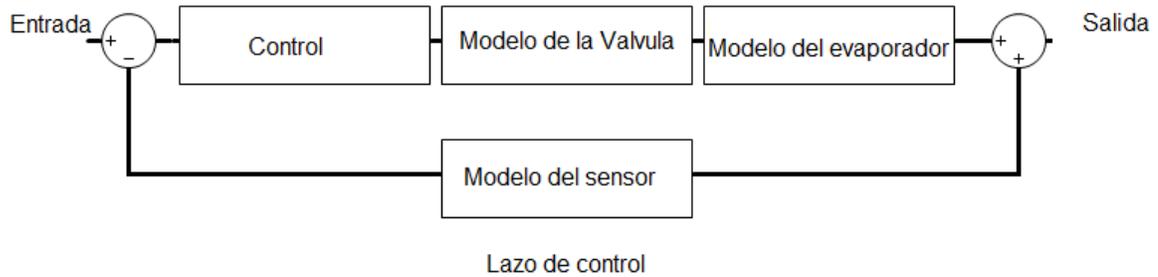


Figura 1.2 Diagrama de bloques del control del evaporador

En la elaboración de estos modelos, es necesaria la aplicación de leyes físicas. Los modelos que son imposibles de solucionar mediante métodos de balances de energía, se utilizan procedimientos de modelaje experimental, donde a partir de un conjunto de entradas conocidas se miden las salidas y a partir de esas relaciones se obtiene el modelo.

Con el método anterior, se logra obtener un modelo de la planta en tiempo continuo. Para este propósito, este modelo es introducido en un software de diagnóstico de ingeniería (Matlab/Simulink) y mediante simulación se obtienen gráficos, ubicación de polos, entre otros y así se analiza el comportamiento y tendencias del sistema.

Utilizando conceptos de control automático, se diseñará un compensador que logre controlar el sistema modelado. Posteriormente, utilizando el software Control Station se podrá comprobar mediante simulación si realmente el sistema logra compensar la temperatura del agua.

Finalmente, se programan las rutinas de control del sistema de enfriamiento en un controlador de lógica programable (PLC). Las rutinas que se introducen en la memoria se encargan de hacer muestreos del equipo de instrumentación, para que el control diseñado logre controlar y encender dispositivos mecánicos externos proporcionalmente y así mantener el agua de salida a una temperatura constante. Es

necesario agregar rutinas de control ON/OFF para procesos de inicialización y apagado del equipo.

Se diseña un gabinete donde van a estar colocado el PLC, los módulos, las fuentes de alimentación, los breakers y fusibles, por lo que es necesario utilizar el código NEC para poder cumplir con los estándares industriales utilizados en el campo de la electricidad.

Capítulo 2. Meta y Objetivos

2.1 Meta

- Implementar un control para el chilled water que permita mantener constante la temperatura del agua que circula por las manejadoras de aire. Este rango de temperatura es establecido según el proceso de cristalización del chocolate en el entorno de la planta.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

- Diseñar un control para un sistema de distribución de agua HVAC tipo chilled water para mantener la temperatura del agua entre un rango establecido según el proceso de producción.

2.2.2 Objetivos específicos

- Analizar las características y funcionamiento del equipo mecánico y de instrumentación utilizado y obtener variables físicas de sus características.
- Elaborar un modelo matemático en tiempo continuo del sistema de distribución de agua HVAC tipo chilled water basado en las características propias de cada equipo mecánico e instrumentación del sistema.

- Diseñar un compensador mediante algún criterio de control automático que cumpla con los requerimientos de diseño.
- Diseñar la lógica de funcionamiento del equipo de control basados en el estudio de la secuencia de funcionamiento de dicho proceso facilitada por el personal de la empresa Kraft Foods Inc.
- Diseñar el gabinete de control que cumpla con estándares Industriales para un funcionamiento adecuado.

Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

3.1.1 Sistemas enfriadores de líquido (4)

Un sistema refrigerador por líquido enfría agua, alcohol, ácidos, sustancias químicas u otros fluidos. El uso más común es refrigerar agua para aplicaciones de ambientación. El agua refrigerada del sistema circula por el serpentín refrigerador de una unidad de tratamiento de aire, como se muestra en la figura 3.1. La unidad de tratamiento de aire introduce aire en los ambientes acondicionados.

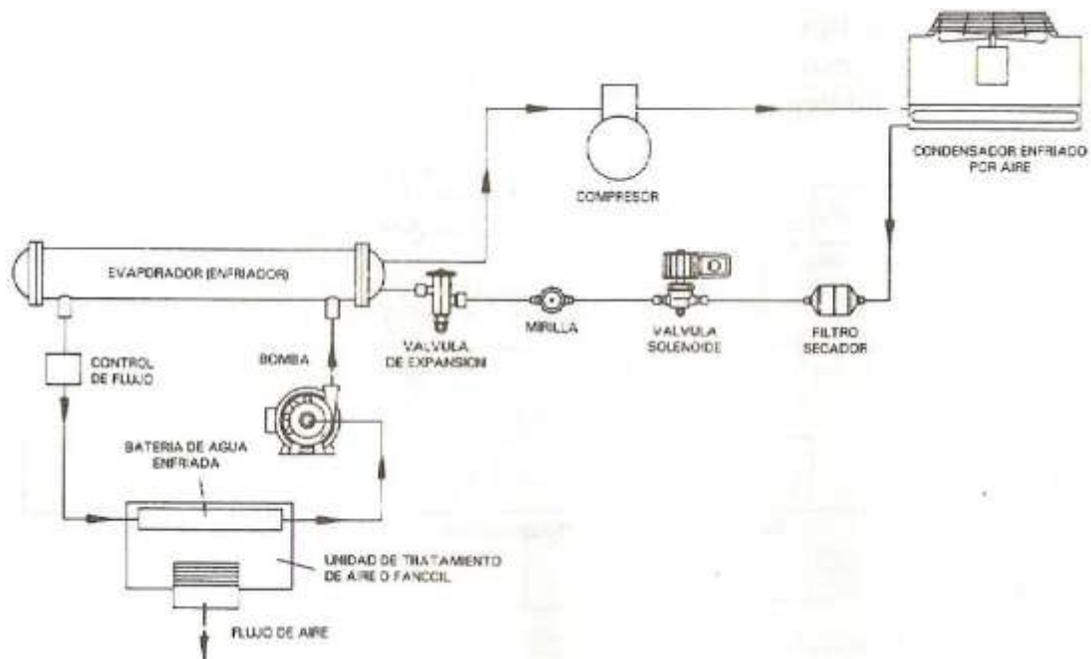


Figura 3.1 Típico Sistema de refrigeración por líquido

El aire de las habitaciones se mueve sobre el serpentín refrigerador de agua de la unidad de tratamiento de aire. Este aire se enfría y vuelve a las habitaciones. En este proceso, el agua fría del serpentín refrigerador recoge calor y vuelve al sistema refrigerador para su enfriado.

Un sistema refrigerador de líquido consta esencialmente de cuatro componentes:

1. Compresores
2. Condensadores
3. Válvulas de expansión
4. Enfriador evaporador

Otras partes del sistema son las válvulas de carga de refrigerante, el filtro de secador, válvula de líquido solenoide, mirilla, indicador de humedad y centro de control eléctrico.

3.1.2 Centro de control eléctrico (4)

Para poder operar y dirigir el sistema, el centro de control eléctrico es parte esencial del sistema total. El centro de control incluye controles de energía, operación y seguridad, estos están montados en un panel de control. Los controles de seguridad incluyen.

1. Interruptor de alta presión de condensador
2. Interruptor de baja presión del refrigerante
3. Control de presión del aceite
4. Interruptor para protección de congelamiento
5. Interruptor de caudal
6. Protección de sobre carga del motor

3.1.3 Ciclo de refrigeración (4)

En un sistema refrigerador típico (figura 3.1), mientras el agua corre por el sistema, el contacto del interruptor de flujo se activa y si todos los mecanismos de seguridad están cerrados, el compresor se conecta. El gas caliente de compresor se descarga en el condensador. Mientras atraviesa el condensador, este refrigerante a alta presión se enfría y cambia su estado al de líquido de alta presión. El refrigerante

líquido de alta presión atraviesa un filtro secador. Luego, atraviesa la válvula solenoide de líquido, la mirilla y la válvula de expansión. Esta última, controla el paso de líquido refrigerante a través del evaporador.

El evaporador permite que el agua se enfríe por la acción de evaporación del refrigerante líquido. El refrigerante recoge el calor del caudal del líquido, lo devuelve al lado de succión del compresor como gas de baja presión y queda entonces listo para reciclarse de nuevo por el compresor.

3.1.4 Evaporador (5)

El evaporador es la parte de la unidad refrigeradora donde el refrigerante se vaporiza desde una mezcla de líquido-gas a un estado totalmente gaseoso, produciendo por tanto el efecto de refrigerador en el que agua u otro líquido está siendo enfriado.

Los evaporadores más comunes son los de expansión directa. En condiciones normales de operación ninguna parte del serpentín está totalmente llena de líquido. El ciclo de refrigeración comienza en el orificio del dispositivo de control de refrigerante (válvula de expansión de figura 3.1). Al pasar por el orificio, el refrigerante se expande y entra a la línea de conexión del evaporador que es de un diámetro mayor. El cambio de presión origina que aproximadamente la tercera parte del refrigerante se convierta de inmediato en vapor. El refrigerante que queda se dejar hervir.

3.1.5 Condensadores (5)

Los condensadores son intercambiadores de calor diseñados para condensar el refrigerante a elevada presión y temperatura de descargado por el compresor. En este proceso, el condensador expulsa el calor recogido por el evaporador. Al mismo tiempo, los condensadores convierten el gas a elevada presión y temperatura en

refrigerante líquido a elevada presión y temperatura, preparado para ser reciclado por la válvula de expansión, evaporador y de vuelta al compresor. Este tipo de condensador utiliza el aire como medio de enfriar y condensar el vapor del refrigerante caliente.

Los ventiladores de los condensadores son del tipo helicoidal y están equilibrados estática y dinámicamente para un funcionamiento de baja vibración.

El aire se aspira del fondo del condensador, y pasa por un conjunto de tubos y aletas que tienen conexiones de entrada de gas caliente y de salida de líquido refrigerante. Éste se descarga hacia arriba, moviéndose en dirección opuesta al movimiento del aire. En este proceso tiene lugar la transferencia de calor. El aire ambiental frío circula sobre el refrigerante caliente. El aire ambiental recoge el calor, se calienta y es descargado a la atmósfera. El gas refrigerante caliente se enfría y se condensa en líquido.

3.1.6 Compresores (6)

Un compresor es una máquina que está construida para aumentar la presión y desplazar fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

El compresor es del tipo reciprocante o alternativo: utilizan pistones (sistema bloque-cilindro-émbolo como los motores de combustión interna). Abren y cierran válvulas que con el movimiento del pistón aspira/comprime el gas gracias a un motor eléctrico incorporado.

3.1.7 Válvulas automáticas de expansión (7)

La válvula automática de expansión es una válvula de expansión controlada. Estas válvulas son dispositivos precisos que miden y controlan el flujo de refrigerante que va al evaporador de manera exacta y en la proporción que requiere la velocidad de evaporación. En otras palabras, se adecúan automáticamente a las variaciones de la carga y mantienen una eficiencia máxima en todo el tiempo.

3.1.8 Tipo de refrigerante (8)

El clorodifluorometano (Freón-22 o R22) es el refrigerante más popular para refrigeradores de líquido. Es un gas incoloro cuya fórmula química es CHClF_2 . Tiene un peso molecular de 86,5g/mol, y una densidad de 1.43g/m^3 . Aunque el Freon-22 es apropiado para refrigeradoras de alta temperatura, su uso está disminuyendo por la controversia de los clorofluorocarbonos.

3.2 Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema

3.2.1 Controlador Lógico Programable

Los controladores lógicos programables o PLC son dispositivos electrónicos capaces de realizar distintas funciones simultáneamente, esto significa que se puede controlar varios procesos tanto secuencialmente como en paralelo. Están dirigidos para aplicaciones industriales, por lo que su diseño les confiere una especial robustez.

Estos dispositivos electrónicos funcionan adquiriendo datos de un determinado entorno y mediante una unidad de procesamiento previamente configurada, toman en tiempo real las decisiones necesarias para controlar automáticamente un proceso. Dependiendo del tamaño y la complejidad de los procesos, la cantidad de PLC puede aumentar. Estos pueden operar independientemente o entrelazados.

Los PLC no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, tales como el Control Proporcional Integral Derivativo (PID).

Para el procesamiento de señales de entrada y salida, los PLC tienen la características de expansibilidad de módulos que van desde manejo de señales discretas, analógicas, servos, HART entre otros. Además, tiene la posibilidad de comunicación multiprotocolo, con registro de datos y control de supervisión (SCADA), interfaz de usuario (HMI) y otros PLC y dispositivos de instrumentación.

3.2.2 Modelo matemático de sistemas térmicos (9)

Muchos procesos estables y sobreamortiguados de segundo orden y órdenes superiores que se encuentren en el dominio de la “s” ante una entrada escalón, pueden ser aproximados por un modelo de retardo de primer orden con tiempo muerto como se muestra en la ecuación 3.1.

$$G(s) = \frac{k \cdot e^{-st_d}}{(s+a)} \quad (3.1)$$

Donde

a = constante de tiempo

k = constante de ganancia estática

t_d = tiempo muerto

La constante “a” representa el recíproco de la constante de tiempo del sistema y el tiempo muerto se ajusta para representar las otras constantes de tiempo, correspondientes a polos alejados del origen cuya influencia desaparece rápidamente.

Un método para poder conseguir estos valores es excitando el sistema mediante entrada escalón y de esta manera se obtiene una gráfica de respuesta ante un escalón. Con los datos de la gráfica, se obtiene la constante de tiempo (τ) del sistema. El tiempo $t_{63\%}$, es aquel el cual la salida alcanza un el 63.2% de la diferencia entre el valor final y el valor inicial. A este tiempo hay que restarle cualquier tiempo muerto (t_d) existente en el sistema, que es el tiempo que transcurre desde la aplicación de la entrada hasta que la salida empieza a cambiar.

Para determinar la constante τ se mide el tiempo $t_{39\%}$, que es el cual la salida alcanza el 39.3% de la diferencia entre el valor final y el valor inicial.

$$\tau = 2(t_{63\%} - t_{39\%}) \quad (3.2)$$

Con el escalón aplicado en el t_i , que puede ser mayor o igual a cero, el tiempo muerto t_d es

$$t_d = t_{63\%} - (t_i + \tau) \quad (3.3)$$

La constante “ a ” será, el recíproco de la constante de tiempo τ

$$a = \frac{1}{\tau} \quad (3.4)$$

La constante “ k ” será el cociente entre el valor final medio para la salida del sistema y la amplitud “ A ” del escalón aplicado, escalado por la constante “ a ”.

$$k = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - T_i}{A} * a \quad (3.5)$$

3.2.3 Modelo matemático sensores (10)

Los sensores realizan la medición en el sistema de control. En el sensor se produce un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual se relaciona con la variable de procesos que se mide.

La respuesta dinámica de la mayoría de los sensores es mucho más rápida que la de los procesos, en consecuencia su constante de tiempo y tiempo muerto se pueden considerar despreciables y por lo tanto su función de transferencia da la ganancia pura, sin embargo, cuando se analiza la dinámica, la función de transferencia se analiza como un sistema de primer orden. En la ecuación 3.6 se encuentra la función.

$$G(s) = \frac{k_T}{(\tau s + 1)} \quad (3.6)$$

Donde

k_T = constante de ganancia del sensor

τ_t = constante de tiempo del sensor

Para obtener la constante de ganancia del sensor se utiliza la ecuación 3.7.

$$k_t = \frac{\Delta \text{ variable de salida}}{\Delta \text{ variable de entrada}} \quad (3.7)$$

3.2.4 Modelo matemático de válvulas (10)

Las válvulas de control se encuentran en procesos y son utilizadas para mantener las variables controladas, a partir de la regulación de flujo. Las válvulas de control actúan como una resistencia variable y mediante el cambio de su apertura se modifica la resistencia y flujo de la misma.

El dimensionamiento de la válvula de control es el procedimiento mediante el cual se calcula el coeficiente de flujo de la válvula. En la ecuación 3.8 se encuentra la ecuación básica para dimensionar una válvula.

$$f = C_V \sqrt{\frac{\Delta P_v}{G_f}} \quad (3.8)$$

Donde

F =flujo en gpm

ΔP =Caída de presión, en psi en la sección de la válvula

G_f = gravedad específica del líquido

C_V =coeficiente de flujo

Si las unidades de flujo se dan en lbm/hr, se utiliza la ecuación 3.9.

$$w = \left(f \frac{gal}{min}\right) \left(60 \frac{min}{h}\right) \left(8.33 G_f \frac{lb}{gal}\right) = 500 C_V \sqrt{G_f \Delta P_v} \quad (3.9)$$

Donde

w =flujo en lbm/hr

De la ecuación 3.9 se obtiene la ecuación 3.10

$$C_V = \frac{w}{500\sqrt{G_f\Delta P_v}} \quad (3.10)$$

Para dimensionar la válvula se utiliza la ecuación 3.11, donde los valores indicados con una raya son los valores nominales en estado estable. Para determinar el máximo factor de sobrecapacidad se utiliza la ecuación 3.12.

$$\overline{C_V} = \frac{\overline{w}}{500\sqrt{G_f\Delta P_v}} \quad (3.11)$$

$$C_{V,max} = 1.5 \cdot \overline{C_V} \quad (3.12)$$

La función de transferencia que representa a la válvula está dada por:

$$G_V(s) = \frac{k_V}{\tau_v s + 1} \quad (3.13)$$

Donde:

K_v : ganancia de la válvula.

τ_v : Constante de tiempo de la válvula.

Para determinar la ganancia de la válvula se parte de la capacidad de control de la válvula (α) según su tipo (de igual porcentaje).

$$k = \pm \frac{w_{max} \text{ lbm/h}}{100 \%CO} \quad (3.14)$$

3.2.5 Controladores

Los controladores se utilizan para mantener las variables en un valor constante o en un rango determinado. Existen diferentes tipos de controladores, entre ellos se encuentran los controles PI y los control On-Off. Estos se explican a continuación.

3.2.5.1 Control PI (11)

Los controladores PI, incluyen 2 acciones, la proporcional (P) y la integral (I). En la figura 3.2.a, se encuentra un diagrama de bloques de la estructura del controlador PI, en la figura 3.2.b se encuentra el controlador en el dominio del tiempo y en la figura 3.2.c se encuentra en el dominio de Laplace.

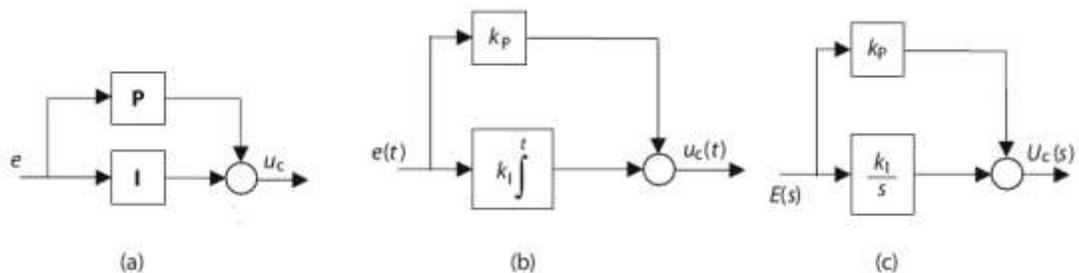


Figura 3.2 Diagrama de bloques controlador PI

Acción proporcional: da una salida del controlador que es proporcional al error. En la ecuación 3.15 se obtiene la relación anterior con respecto a la figura 3.2.b y en la ecuación 3.16 se obtiene la relación con respecto a la figura 3.2.c. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (3.15)$$

$$G_p(s) = K_p \quad (3.16)$$

Donde

K_p = es una ganancia proporcional ajustable

Acción integral: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento. La señal de control $u_c(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero, por lo que se concluye que dada una referencia constante o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero. En la ecuación 3.17 se obtiene la relación anterior, con respecto a la figura 3.2.b y ecuación 3.18 se obtiene la relación con respecto a la figura 3.2.c

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.17)$$

$$G_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (3.18)$$

Control proporcional-integral, se define mediante el diagrama de bloques de la figura 3.2.b y la ecuación 3.19 describe el control en el dominio del tiempo.

$$u_c(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.19)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quién ajusta la acción integral. La función de transferencia de la ecuación 3.19 muestra el control en el dominio de Laplace.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (3.20)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con una acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativa la señal de control será decreciente.

Este razonamiento sencillo muestra que el error en régimen permanente será siempre cero. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden.

3.2.5.2 Control On-Off (12) (13)

El control On-Off, es la forma más simple de control por realimentación. Es un control de dos posiciones en el que elemento final de control solo ocupa unas de las dos posibles posiciones. La ecuación 3.21 describe la figura 3.3.

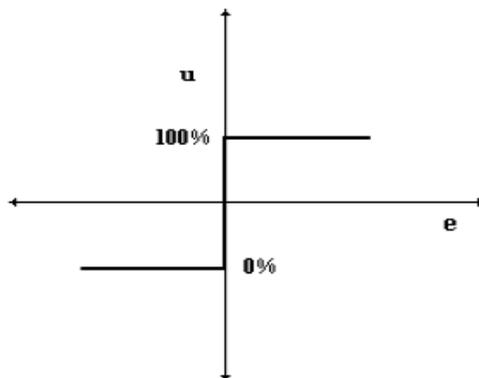


Figura 3.3 Control On-OFF

$$u(s) = \begin{cases} u_{\max} & \text{si } e > 0 \\ u_{\min} & \text{si } e < 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

Donde

$u(s)$: es la variable de entrada al proceso

e : es el error de control

Para determinar el error de control se utiliza la ecuación

$$e = Y_{sp} - Y \quad (3.22)$$

Donde

Y_{sp} : Valor deseado de salida (Set Point)

Y : variable de salida del proceso a controlar

Se puede observar que cuando la variable de salida “ Y ” es menor que el set point Y_{SP} , se asigna a la variable manipulada el valor máximo, mientras que cuando Y_{sp} es menor a “ T ”, se le asigna el valor mínimo. También se puede dar el caso contrario.

Para prevenir cambios continuos en los controladores cuando la variable controlada se encuentra próxima al punto de consigna, se diseñan controladores On-Off con histéresis. Estos controladores hacen que exista una diferencia de valor entre el encendido y el apagado. En la Figura 3.4 se observa la curva de comportamiento de un control On-Off con histéresis.

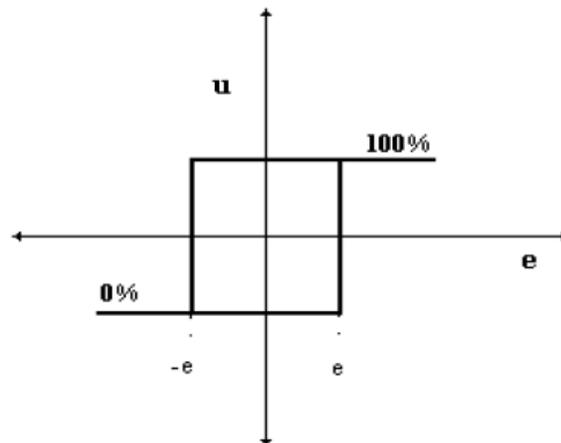


Figura 3.4 Control On-Off con histéresis

De la figura anterior se deduce lo siguiente:

Si error $> +e$, entonces la apertura es del 100%

Si error $< -e$, entonces la apertura es del 0%

Si $-e < \text{error} < +e$, entonces no hay cambios

El ajuste de la zona muerta de histéresis produce dos efectos:

1. El tiempo entre conmutaciones aumenta cuando Δe aumenta
2. La amplitud del ciclo límite también aumenta cuando Δe aumenta

Para determinar las características dinámicas del sistema de regulación utilizando un control On-Off con histéresis, se utiliza la ecuación 3.23 y la ecuación 3.24 (los valores de estas ecuaciones se obtienen de forma gráfica).

En la figura 3.5 se encuentra la gráfica de comportamiento de un sistema con histéresis, donde el comportamiento de la curva es oscilatorio. De esta gráfica se obtiene las siguientes variables:

El periodo está determinado por la ecuación 3.23

$$T = 4T_U + 4T_1 \quad (3.23)$$

Donde

T : Periodo de oscilación

T_U : Tiempo muerto del sistema

La amplitud está determinada por la ecuación 3.24

$$X_m = K_{is} \Delta y T_U + \frac{X_d}{2} \quad (3.24)$$

Donde

K_{is} : factor histéresis

Δy : magnitud de cambio de la variable de entrada

X_d : banda de histéresis del controlador

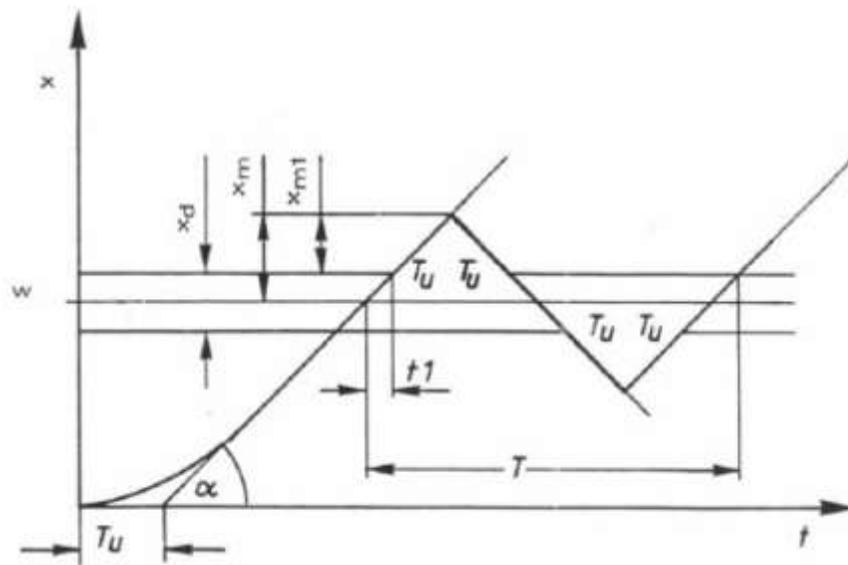


Figura 3.5 Características dinámicas de un Control On-OFF con histéresis (13)

3.2.6 Criterios de estabilidad

Existen diversos métodos para garantizar la estabilidad de un sistema. La mayoría de los procesos son estables cuando no pertenecen a un circuito de control por retroalimentación. Para procesos estables a circuito abierto, la estabilidad es considerable, cuando forma parte de un circuito de control por retroalimentación. Lo anterior debido a que las variaciones en las señales se refuerzan unas de otras conforme viajan sobre el circuito y ocasionan que la salida y otras señales en éste se vuelvan limitadas. Para determinar la estabilidad de sistemas dinámicos existen métodos como la prueba de Routh-Hurwitz y la técnica "lugar de las raíces".

3.2.6.1 Routh-Hurwitz (10)

El procedimiento de Routh está basado en pruebas algebraicas sobre los coeficientes del polinomio del denominador llamado ecuación característica. Esta ecuación se obtiene por igualación a cero del denominador. Al determinar la ecuación característica de una planta, se deben examinar los coeficientes del polinomio para asegurar lo siguiente:

1. Todos los coeficientes de la ecuación característica deben estar presentes
2. Todos los coeficientes deben ser positivos.

Si el polinomio característico no satisface una de las condiciones, se puede concluir que polinomio tiene al menos una raíz que no se encuentra en el semiplano izquierdo, y por lo tanto, el sistema a lazo cerrado es inestable.

La mecánica de la prueba de Routh se puede presentar como sigue, dado un polinomio de grado n .

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0 \quad (3.25)$$

Donde $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ son los coeficientes del polinomio y se debe determinar cuántas raíces tienen parte real positiva.

Para realizar la prueba se debe ajustar el siguiente arreglo de la Tabla 3.1, en el cual los datos de la fila 3 a la $n+1$ se calculan mediante las ecuaciones siguientes.

Tabla 3.1 Arreglo de Routh-Hurtwitz

Fila 1	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	...	a_1	0
Fila 2	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	...	a_0	0
Fila 3	b_1	b_2	b_3	...	0	0
Fila 4	c_1	c_2	c_3	...	0	0
.
.
.
Fila n	d_1	d_2	0	...	0	0
Fila n +1	e_1		0	...	0	0

$$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}} \quad (3.26)$$

$$b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}} \quad (3.27)$$

$$C_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1} \quad (3.28)$$

$$C_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-1} b_3}{b_1} \quad (3.29)$$

y así sucesivamente.

El proceso continua hasta que todos los términos nuevos sean cero. Para que el circuito de control sea estable, todos los términos de la columna izquierda deben tener el mismo signo.

3.2.6.2 Lugar de las raíces (10)

El lugar de las raíces es una técnica gráfica que consiste en graficar las raíces de la ecuación característica. En la gráfica que resulta, se puede apreciar de un vistazo si alguna raíz de la ecuación característica cruza el eje imaginario del lado izquierdo del plano s al lado derecho, lo cual, sería indicación de alguna posibilidad de inestabilidad en el circuito.

3.2.6.3 Método de Ziegler-Nichols (14)

John G. *Ziegler* y Nathaniel B. *Nichols* propusieron una serie de reglas para afinar controladores PID con base a una respuesta experimental. En la figura 3.6 se obtiene experimentalmente la respuesta de la planta a una entrada escalón. La respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo, por lo que de esta forma se puede obtener los parámetros del controlador PID

Para obtener estos parámetros, se debe obtener “L” y “T”, los cuales se ilustran en la figura 3.6. Estas constantes se obtienen trazando una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta. La intersección con el eje del tiempo y con el valor final de la amplitud forman las distancias “L” y “T”.

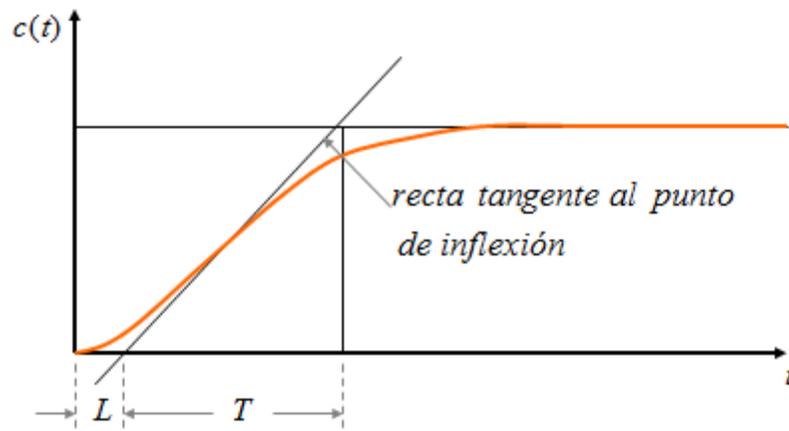


Figura 3.6 Curva experimental para obtener los parámetros del Método Ziegler-Nichols (14)

Con “L” y “T”, se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando las ecuaciones 3.30 y 3.31

$$K_p = 0.9 \cdot \frac{T}{L} \quad (3.30)$$

$$\tau_i = \frac{L}{0.3} \quad (3.31)$$

Capítulo 4. Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para reconocer el problema y entender el proceso del sistema, fue necesario realizar una investigación bibliográfica sobre termodinámica, con el fin de discernir e identificar el entorno del sistema y de esta manera poder llegar a entender cuáles eran los requerimientos y limitaciones de un sistema de enfriamiento.

La empresa SIQ, se comprometió a proporcionar una capacitación para dar una orientación tanto teórica como práctica sobre los PLC y equipos de instrumentación, para que de esta manera se escogerán los criterios básicos para realizar rutinas de control, así como de la utilización de equipo.

Además, es importante mencionar que se realizaron reuniones entre los ingenieros de SIQ y los ingenieros de la planta de El Gallito, para poder lograr definir las metas y restricciones tanto de los equipos utilizados como del proceso a controlar.

En las visitas que se hicieron a la planta se realizaron mediciones de campo en la etapa en funcionamiento del sistema enfriador, esto con fin de poder realizar los cálculos para el modelo del sistema y el diseño del nuevo control.

Partiendo de la información obtenida y la aplicación de los conocimientos de electrónica especialmente en el área de control automático, se diseña un control para el proceso de enfriamiento del agua.

4.2 Obtención y análisis de información

La forma de diseñar los reguladores se obtiene mediante la teoría de control automático propuesta en la bibliografía consultada sobre el tema. Las reuniones fueron de gran importancia en el desarrollo del proyecto ya que permitieron establecer el alcance y limitaciones del mismo.

El uso del internet se hizo efectivo en la obtención de las hojas de datos de los sensores, compresores, válvulas, PLC y sus módulos de entradas y salidas analógicas y digitales. Asimismo, se obtuvo la información concerniente a los tutoriales para la programación de los PLC, el software de simulación MATLAB y Control Station. La información se seleccionó con base en los principios físicos que gobiernan el sistema a regular

Para el desempeño del sistema se estudiaron diferentes opciones de equipo a utilizar y se escogió aquel que posee un mejor amoldamiento a las condiciones de control y presupuesto establecido.

El diseño del compensador se realizó mediante simulaciones utilizando el software Matlab y su herramienta Simulink. Esto permitió obtener una aproximación del sistema real. Para la verificación del software se utilizó un emulador de PLC y el software Control Station, de tal manera que se logre a comprobar que las lógicas funcionarán de la manera deseada.

4.3 Implementación de la solución

De acuerdo con las especificaciones de la empresa SIQ, el proyecto no va a llegar a la etapa de implementación, debido a que la puesta del marcha del mismo esta fuera del alcance de las 16 semanas del proyecto. Esta etapa queda a cargo de los ingenieros de proyecto de la empresa.

A lo largo del diseño de la implementación, se hicieron varias modificaciones debido que al principio se quería obtener el modelo de la planta en base al balance de energía de los sistemas, pero para obtener un balance correcto, exigía un conocimiento realmente muy avanzado de otras ramas de ingeniería por lo que por recomendación, se decidió hacerlo por métodos estocásticos, cuyas pruebas se hicieron con mediciones de campo.

Para realizar las pruebas de verificación correctas fue necesario utilizar software que pudieran interactuar con la programación realizada en el PLC, y de esta manera poder verificar que el funcionamiento de las rutinas estuviera trabajando de manera correcta.

4.4 Reevaluación y rediseño

Una de las formas alternativas de diseño del controlador es utilizar balances de energía para obtener analíticamente las ecuaciones de los modelos matemáticos del evaporador y el condensador. De esta manera, se analiza el orden del sistema y obtiene el diseño del compensador por otros métodos alternativos de control.

Se puede implementar un control PID en el PLC, con el fin de mejorar las características dinámicas de la planta, para ello, se debe solamente modificar la parte derivativa en la programación, lo cual se logra utilizando nuevamente el método de Zigler-Nichols.

Para mejorar la efectividad de la planta se puede utilizar un control PID en el condensador. Por esta razón, se debe invertir en un variador de frecuencia para los ventiladores, con la ventaja de ser más fácil ajustar el control debido a que se conoce el modelo de la planta.

Capítulo 5. Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Para obtener una solución final, se debe de considerar todo el sistema, por lo que en esta sección se encuentra los procedimientos y análisis necesarios para obtener los modelos y controles de los sistemas.

5.1.1 Modelo matemático de condensador

Con los datos de la tabla a.2.1 se obtiene la gráfica de la figura 5.1. En la gráfica de la figura 5.1 se encuentra la respuesta del sistema ante una entrada escalón de 4.8kW. Para obtener la función de transferencia del condensador se va utilizar el modelo continuo de un sistema térmico de primer orden con tiempo muerto. Para realizar el cálculo de este sistema es necesario utilizar las ecuaciones 3.2 a la 3.5. Estas ecuaciones son presentan a continuación y los resultados se observan en la tabla 5.1

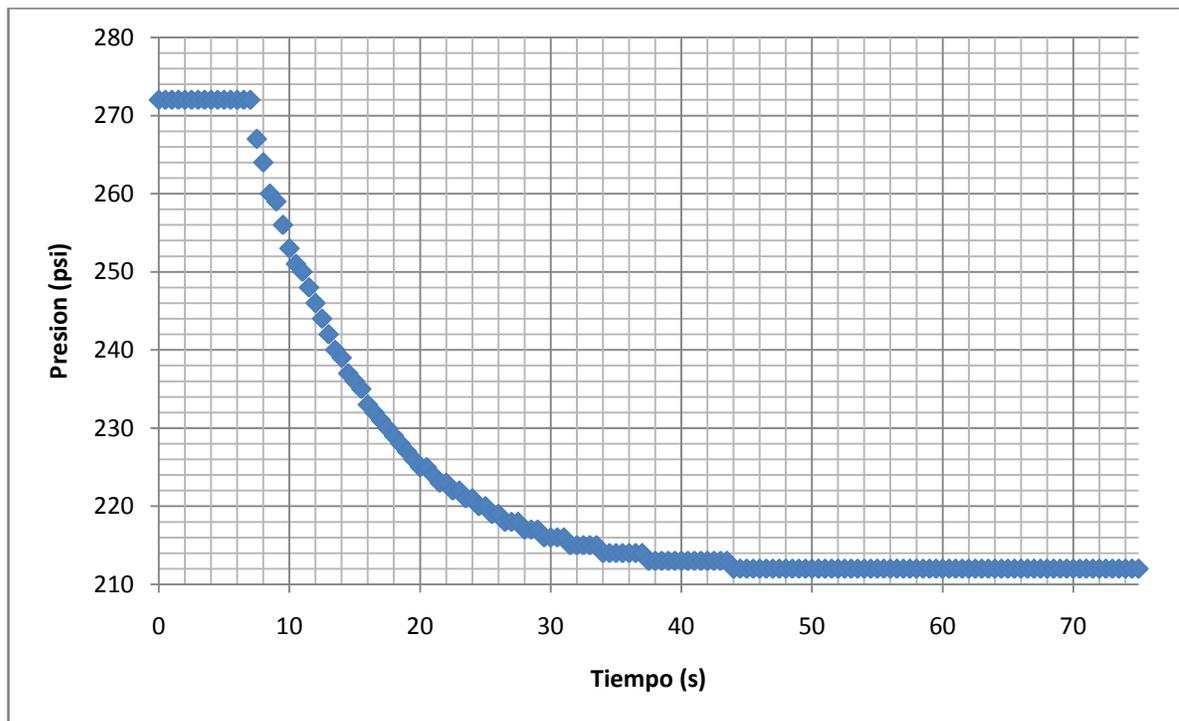


Figura 5.1 Gráfica de respuesta ante un escalón en un condensador

Utilizando la ecuación 3.2 obtenemos $\tau_{condensador}$

$$\tau_{condensador} = 2(t_{63\%} - t_{39\%}) = 2(15,75\text{seg} - 11,25\text{seg}) = 9\text{s} \quad (5.1)$$

Para determinar la constante $a_{condensador}$ y $t_{d-condensador}$ se utiliza la ecuación 3.4 y la ecuación 3.3 respectivamente. Y finalmente para obtener ganancia $k_{condensador}$ se obtiene utilizando la ecuación 3.5

$$a_{condensador} = \frac{1}{\tau_{condensador}} = \frac{1}{9\text{s}} = 0,111\text{s}^{-1} \quad (5.2)$$

$$t_d = t_{63\%} - (t_i + \tau) = 15,75\text{s} - (0\text{s} + 9\text{s}) = 6,75\text{s} \quad (5.3)$$

$$k_{condensador} = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - T_i}{A} * a = \frac{212\text{psi} - 272\text{psi}}{4,8\text{kw}} * \frac{1}{9\text{s}} = -1,389 \frac{\text{psi}}{\text{kw}\cdot\text{s}} \quad (5.4)$$

Tabla 5.1 Valores obtenidos de la curva de comportamiento ante un escalón unitario en el condensador

Variable	Valor
$\tau_{condensador}$ (s)	9
$a_{condensador}$ (s^{-1})	0,1111
$K_{condensador}$ (psi/KW·s)	-1,389
$t_{d-condensador}$ (s)	6,75
$T_{63\%}$ (s)	15,75
$T_{39\%}$ (s)	11,25

Utilizando la ecuación 3.1 y con los valores de la Tabla 5.1 se obtiene la función de transferencia del condensador.

$$G_{condensador}(s) = \frac{-1,389 \cdot e^{-6,27s}}{(s+0,1111)} \quad (5.5)$$

5.1.2 Modelo matemático de evaporador

Con los datos de la tabla a.2.2 se grafica la figura 5.2 donde se encuentra la respuesta del sistema ante un escalón de 60 lbm/h. Con el comportamiento de esta curva es posible obtener la función de transferencia del evaporador que va utilizar el modelo continuo de un sistema térmico de primer orden con tiempo muerto. Para realizar el cálculo de este sistema, es necesario utilizar las ecuaciones 3.2 a la 3.5. Los resultados de las ecuaciones se encuentran en la Tabla 5.2.

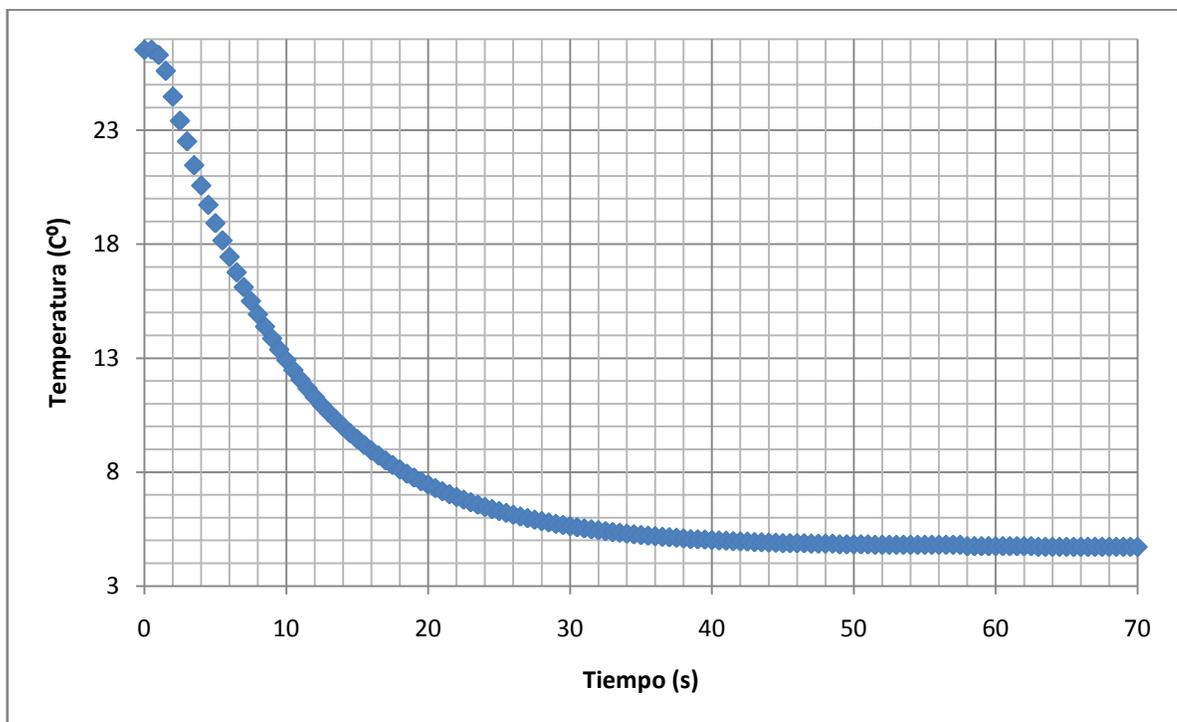


Figura 5.2 Gráfica de respuesta ante un escalón en el evaporador

Utilizando la ecuación 3.2 obtenemos $\tau_{evaporado}$

$$\tau_{evaporador} = 2(t_{63\%} - t_{39\%}) = 2(9,13s - 4,58s) = 9.1s \quad (5.6)$$

Para determinar la constante $a_{evaporador}$ y $t_{d- evaporador}$ se utiliza la ecuación 3.4 y la ecuación 3.3 respectivamente. La ganancia $k_{evaporador}$ se obtiene utilizando la ecuación 3.5.

$$a_{evaporador} = \frac{1}{\tau_{evaporador}} = \frac{1}{9.1s} = 0.109s^{-1} \quad (5.7)$$

$$t_d = t_{63\%} - (t_i + \tau) = 9.13s - (0s + 9.1s) = 0.03s \quad (5.8)$$

$$k_{evaporador} = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - T_i}{A} * a = \frac{4,47^{\circ}\text{C} - 26,28^{\circ}\text{C}}{60\text{lbm/h}} * 0.109s^{-1} = -0,04 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{lbm/h}\cdot\text{s}} \quad (5.9)$$

Tabla 5.2 Valores obtenidos de la curva de comportamiento ante un escalón unitario en el evaporador

Variable	Valor
$\tau_{evaporador}$ (s)	9,1
$a_{evaporador}$ (s^{-1})	0,109
$K_{evaporado}$ ($^{\circ}\text{C}/(\text{lbm/h})\text{s}$)	-0,04
$t_{d\ evaporador}$ (s)	0,03
$T_{63\%}$ (s)	9,13
$T_{39\%}$ (s)	4,58

Mediante la ecuación 3.1 y los valores de la tabla 5.2 se obtiene la función de transferencia del evaporador. Debido a que el tiempo muerto es menor al tiempo de muestreo que se va utilizar, ese lapso de t_d , no se toma en cuenta. En la ecuación 5.10 se encuentra la función de transferencia.

$$G_{evaporador}(s) = \frac{-0,04 \cdot e^{-0,03s}}{(s+0,109)} \cong \frac{-0,04}{(s+0,109)} \quad (5.10)$$

5.1.3 Modelo matemático del sensor de temperatura

A partir de la hoja de datos del sensor de temperatura que se encuentra en el apéndice A.5, es posible encontrar $\tau_{\text{sensor-Temperatura}}$, el valor de esta constante es 0.01s. Utilizando la ecuación 3.7 obtenemos la $k_{\text{sensor-Temperatura}}$.

$$k_{\text{sensor-Temperatura}} = \frac{20\text{mA}-4\text{mA}}{200^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}} = 0,064 \frac{\text{mA}}{^{\circ}\text{C}} \quad (5.11)$$

Con los valores anteriores y aplicando la ecuación 3.6 se obtiene la función de transferencia del sensor de temperatura.

$$G_{\text{sensor-Temperatura}}(s) = \frac{0,064}{(0,01s+1)} \quad (5.12)$$

5.1.4 Modelo matemático del sensor de presión

Utilizando la hoja de datos del sensor de temperatura que se encuentra en el apéndice A.5, es posible encontrar $\tau_{\text{sensor-Presión}}$, el valor de esta constante es 0,001s. Mediante Utilizando la ecuación 3.7 obtenemos la $k_{\text{sensor-Presión}}$.

$$k_{\text{sensor-Presión}} = \frac{20\text{mA}-4\text{mA}}{300\text{psi}-0\text{psi}} = 0.0533 \frac{\text{mA}}{\text{psi}} \quad (5.13)$$

Con los valores anteriores y aplicando la ecuación 3.6 se obtiene la función de transferencia del sensor de temperatura.

$$G_{\text{sensor-Presión}}(s) = \frac{0.0533}{(0.001s+1)} \quad (5.14)$$

5.1.5 Modelo matemático de la válvula

Mediante la hoja de datos de la válvula que se encuentra en el apéndice A.5, es posible encontrar $\tau_{\text{válvula}}$, el valor de esta constante es 1,56s.

Para determinar el K_v se deben dimensionar la válvula para obtener el valor adecuado, se utiliza la ecuación 3.11 y 3.12 para obtener el $C_{V,\text{max}}$, los valores utilizados en estas ecuaciones se encuentran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Valores de diseño reales para diseño del modelo de la válvula.

Variable	Valor
w(lbm/h)	90
$G_F(\text{g/m}^3)$	1.413
$\Delta P_V(\text{psi})$	154

$$\bar{C}_V = \frac{\bar{w}}{500 \sqrt{G_F \Delta P_V}} = \frac{90}{90 \sqrt{0.00366 \cdot 154}} = 0.0122 \frac{\text{lbm}}{\text{h}\sqrt{\text{psi}}} \quad (5.15)$$

$$C_{V,\text{max}} = 1.5 \cdot \bar{C}_V = 0.0183 \frac{\text{lbm}}{\text{h}\sqrt{\text{psi}}} \quad (5.16)$$

El valor obtenido en la ecuación 5.17 se obtiene utilizando la ecuación 3.14.

$$k_V = \pm \frac{w_{max}}{100} = \frac{135}{100} = 1,35 \frac{lbm/h}{\%CO} \quad (5.17)$$

Finalmente para obtener el modelo de la válvula se utiliza la ecuación 5.16 en la ecuación 3.13 y de esta manera se obtiene la función de transferencia de la ecuación 5.18.

$$G_{valvula}(s) = \frac{1,35}{1,56s+1} \quad (5.18)$$

5.1.6 Diseño del control

Para diseñar el control automático primero se debe determinar la estabilidad del circuito utilizando un arreglo de Routh. Para plantas de segundo orden, se utiliza el polinomio característico de lazo cerrado de la ecuación 5.19, las variables de esta ecuación se obtienen de la ecuación 3.20 y la ecuación 5.20.

$$s^3 + 2\xi w_n s^2 + w_n(1 + K \cdot K_p)s + w_n^2 K \cdot K_i = 0 \quad (5.19)$$

$$G_P = \left[\frac{K w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \right] \quad (5.20)$$

Para obtener los valores del polinomio característico de la ecuación 5.19, se debe obtener el producto de la función de transferencia de la ecuación 5.10 y la función de transferencia de la ecuación 5.18. El resultado de este producto se iguala con la ecuación 5.20 como se muestra en la ecuación 5.21.

$$\frac{Kw_n^2}{s^2+2\xi w_n s+w_n^2} = \frac{-0.036}{s^2+0.776 s+0.072667} \quad (5.21)$$

Desarrollando la ecuación 5.21 se obtiene:

$$w_n^2 = 0.072667 \rightarrow w_n = 0.2696 \quad (5.22)$$

$$K = -0.4954 \quad (5.23)$$

$$\xi = 1.439 \quad (5.24)$$

Sustituyendo los valores de las variables en la ecuación 5.19 se obtiene la ecuación 5.25

$$s^3 + 0.776s^2 + 0.2696(1 - 0.4954 \cdot Kp)s - 0.036 \cdot Ki = 0 \quad (5.25)$$

Con la ecuación en forma polinómica, se prepara el arreglo de Routh de la tabla 5.4, y con la ecuación 3.26, la ecuación 3.27 y la ecuación 3.28 se obtiene los valores de b1, b2 y c1 respectivamente.

Tabla 5.4 Arreglo e Routh

Fila 1	1	0.2696(1-0.4954kp)	0
Fila 2	0.776	-0.036Ki	0
Fila 3	b1	b2	0
Fila 4	c1	0	0

$$b_1 = \frac{a_2 a_1 - a_3 a_0}{a_2} = \frac{0.776 * 0.2696(1 - 0.4954 \cdot Kp) - 1 * z - 0.036 \cdot Ki}{0.776} = 0.046392 \cdot Ki - 0.013081 \cdot Kp + 0.026404 \quad (5.26)$$

$$b_2 = 0 \quad (5.27)$$

$$C_1 = \frac{b_1 a_0 - a_2 b_2}{b_1} = \frac{b_1 a_0 - a_2 \cdot 0}{b_1} = a_0 = -0.036 \cdot K_i \quad (5.28)$$

La ecuación 5.26 se debe cumplir la igualdad de la ecuación 5.29

$$b_1 \geq 0 \quad (5.29)$$

$$0.046392 \cdot K_i - 0.013081 \cdot K_p + 0.026404 \geq 0$$

$$K_p \leq 3.54661(k_i + 0.569156) \quad (5.30)$$

La ecuación 5.28 se debe cumplir la igualdad de la ecuación 5.31

$$c_1 \geq 0 \quad (5.31)$$

$$-0.036 \cdot K_i \geq 0$$

$$K_i \leq 0 \quad (5.32)$$

Para determinar los valores de K_i y K_p se utilizará el método de Ziegler-Nichols. Este método es gráfico y se obtiene de la respuesta al sistema de lazo abierto de la figura 5.3. Utilizando esta figura se traza la recta tangente al punto de inflexión y de esta manera se obtiene los valores de "L" y "T". Utilizando estos valores en las ecuaciones 3.30 y 3.31 se obtiene los valores de T_i y K_p .

$$k_p = 0.9 * \frac{T}{L} = \frac{35.912}{3.3} = 9.79 \frac{\%CO}{^\circ C} \quad (5.33)$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} = \frac{3.3}{0.3} = 11 \frac{\%CO}{^\circ C \cdot s} \quad (5.34)$$

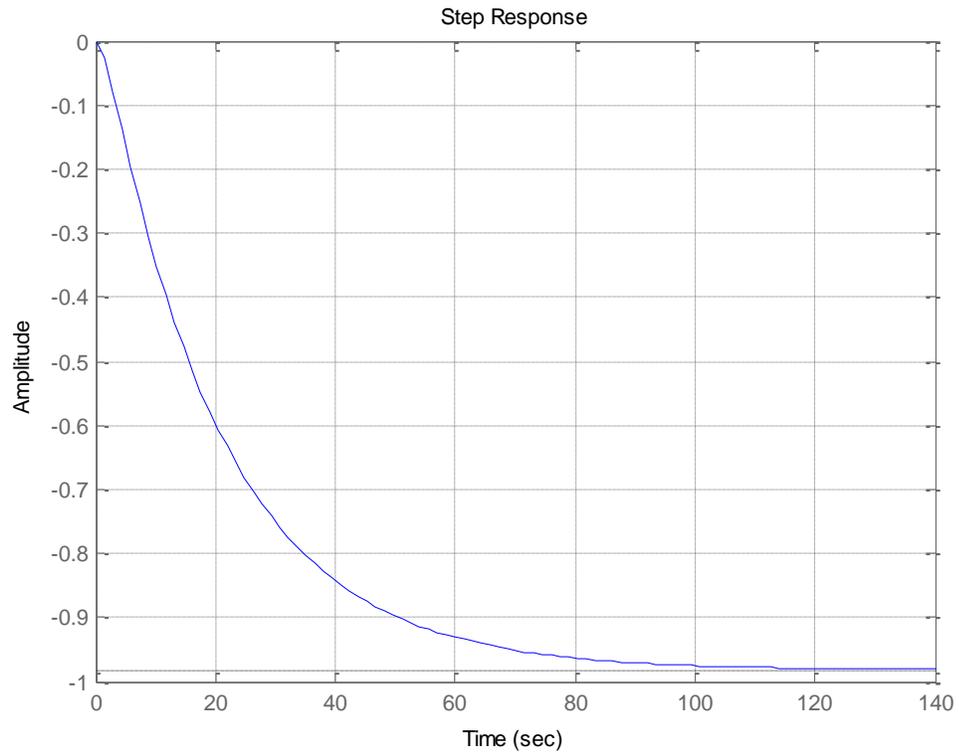


Figura 5.3 Respuesta al escalón en lazo abierto de la válvula y el evaporador

Utilizando la ecuación 3.20, y sustituyendo los valores de las ecuaciones 5.33 y 5.34 se obtiene la función del controlador de la ecuación 5.35.

$$G_{\text{controlador}}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) = -9.79 \left(1 + \frac{1}{11 \cdot s} \right) = -0.89038 \left(\frac{1+11 \cdot s}{s} \right) \quad (5.35)$$

Se determina si los valores obtenidos en las ecuaciones 5.33 y 5.34, mantienen al sistema estable sustituyéndolos en las ecuaciones 5.30 y 5.32.

$$K_p = -9.79 \leq -1.37 \quad (5.36)$$

$$K_i = -11 \leq 0 \quad (5.37)$$

El sistema es estable con los valores obtenidos. En el diagrama de bloques de la figura 5.4 se encuentra el modelo con compensador del sistema que se diseñó. El sistema debe trabajar con 2 válvulas al mismo tiempo, por lo que utilizará el mismo controlador para cada válvula. En el diagrama de la figura 5.5, se muestra el sistema con los dos compensadores.

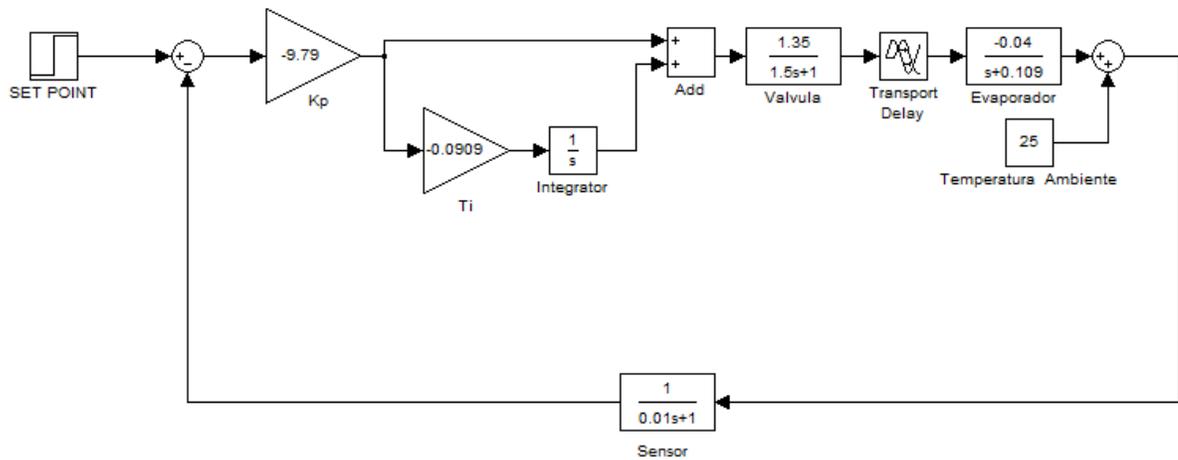


Figura 5.4 Modelo del control de evaporador en Matlab/Simulink

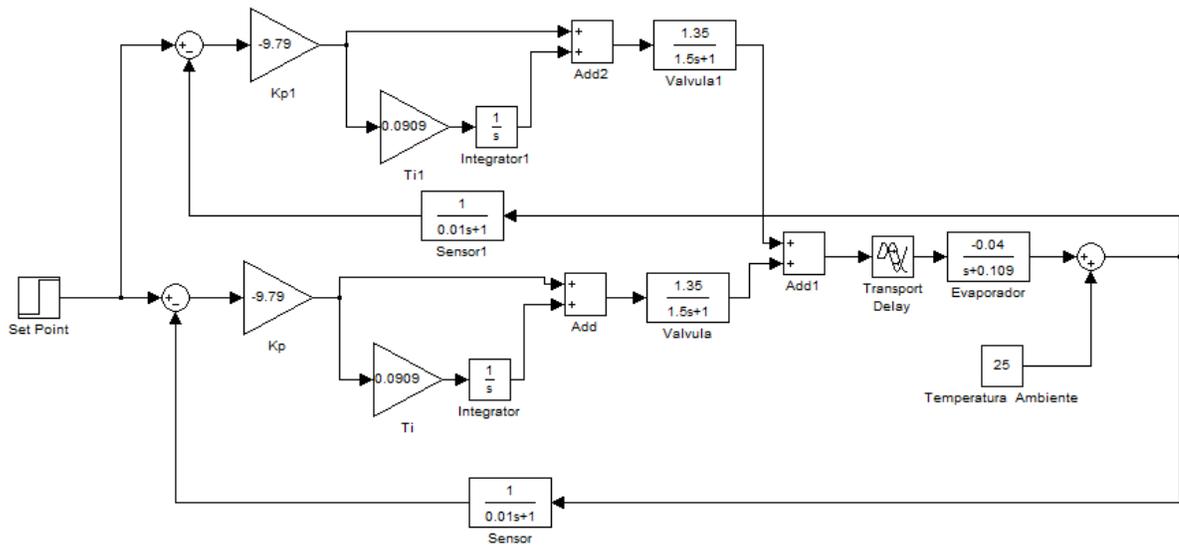


Figura 5.5 Modelo del control de evaporador con las 2 válvulas en Matlab/Simulink

5.1.7 Diseño del control On-Off con histéresis del condensador

El condensador utiliza 4 ventiladores con una potencia de 1.2kW cada uno para poder condensar el refrigerante. El funcionamiento de estos 4 ventiladores es tal que un par siempre se mantenga encendido y si la presión del refrigerante aumenta entran en funcionamiento el otro par de ventiladores. Estos ventiladores no cuentan con la capacidad de poder controlar la velocidad de giro, por lo que es necesario que la presión que va hacia la válvula no sobrepase un rango de trabajo establecido por el fabricante.

Para hacer posible esto, es necesario diseñar un control On-Off en los ventiladores del condensador. El control debe tener histéresis para no trabajar al límite de la presión establecida por el fabricante. En la figura 5.6 se muestra el modelo de condensador con el control que se debe diseñar.

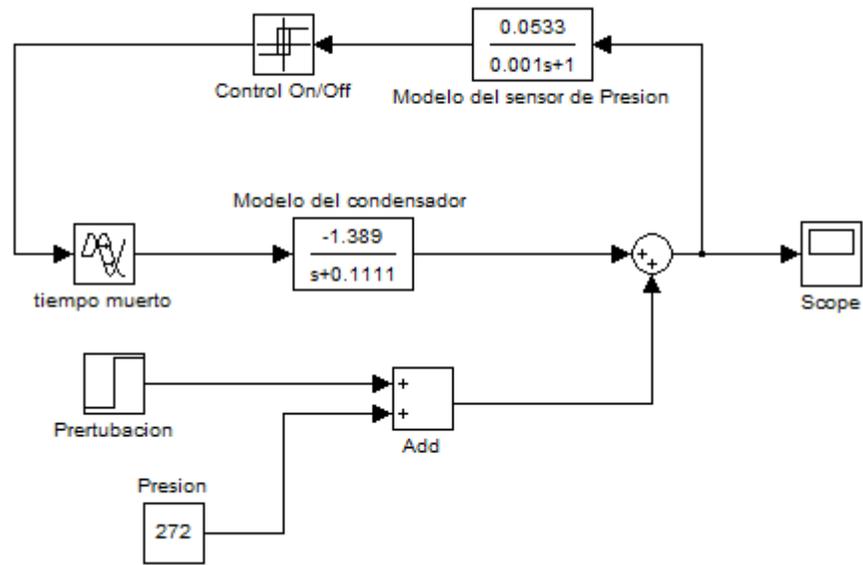


Figura 5.6 Modelo del compresor con el control On-Off en Matlab/Simulink

En la figura 5.7 se plantea el comportamiento gráfico del control On-Off. Entre las características que debe tener este diseño son las siguientes:

1. Tener un diferencial de regulación de 3 psi
2. Si la presión P3 es mayor a 217 psi se debe encender el segundo par de ventiladores y estos se deben apagar cuando la presión P2 sea menor a 214 psi.
3. Si la presión P2 es menor a 214 psi, el segundo par de ventiladores deben estar apagados y estos se deben encender solo si la presión P3 sobrepasa los 217 psi.
4. El diferencial de funcionamiento no debe ser mayor a 10 psi, razón por la cual el diferencial de regulación es tan pequeño.

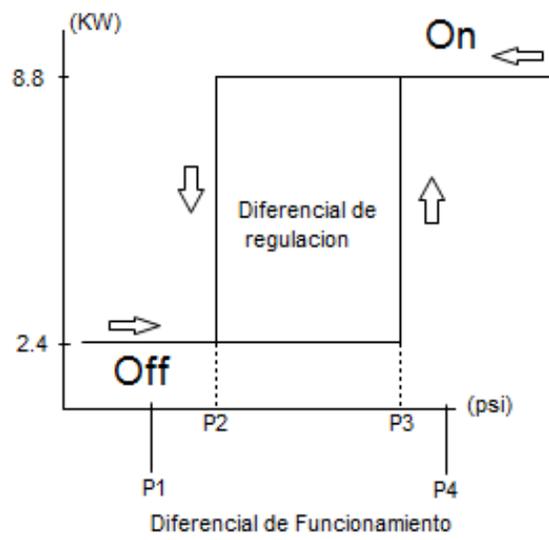


Figura 5.7 Curva de histéresis del comportamiento del control On-Off

5.2 Descripción del hardware

5.2.1 Controlador lógico programable

Según los requerimientos solicitados por la empresa, el dispositivo seleccionado para controlar el sistema, tenía que realizar a) el manejo de señales digitales y analógicas, b) el manejo de lazos de control automáticos, c) la capacidad de expansión en cuanto a equipo y d) secuencias de programación y comunicación mediante Ethernet/IP. Con estas características se optó por utilizar un Controlador Lógico Programable (PLC).

El PLC que mejor se adapta a estas características es el Micrologix 1100, de la marca Allen Bradley(ABB). Se utilizó esta marca por el hecho de que la empresa SIQ, puede ofrecer respaldo inmediato y completo mediante garantía del producto y cuenta con los módulos necesarios para controlar los dispositivos externos al sistema, los cuales se explican más adelante.

En la figura 5.8 se muestra el diagrama físico del Micrologix 1100 modelo 1763-L16AWA y en la Tabla 5.5 las características del mismo.

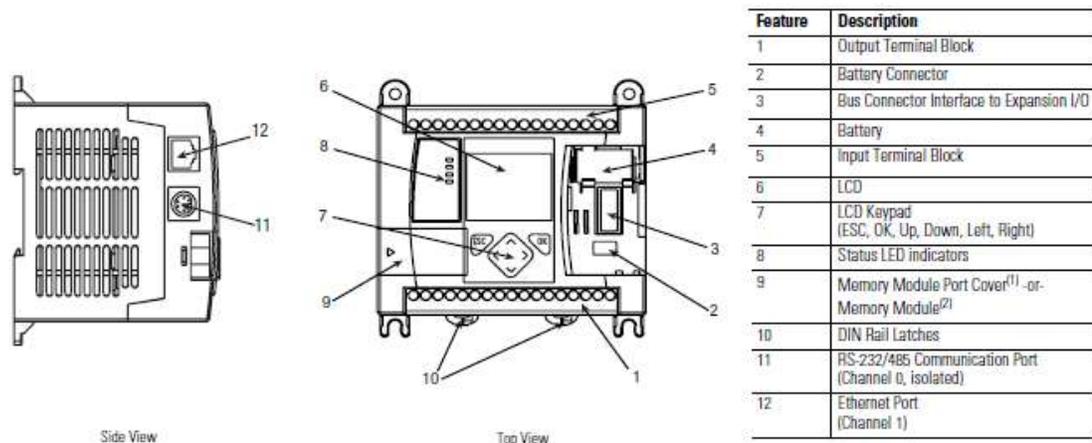


Figura 5.8 Diagrama físico del Micrologix 1100. (15)

Tabla 5.5 Característica del Micrologix 1100 (15)

	Tipo	Característica
Memoria	Programa de usuario/espacio de datos	4K / 4K configurable
	Registro de datos /	Registro de datos: hasta 128 kB*
	Copia de seguridad EEPROM	no
	Batería de respaldo	si
	Módulo de memoria de respaldo	si
E/S discretas	Incorporadas	16
	Máximo con expansión local	Hasta 80
Funcionalidad adicional	Analógica	2 incorporadas, hasta 16 de expansión
	Potenciómetros de ajuste	2 digitales
	PID	si
	Reloj en tiempo real	si
	Herramienta de acceso a datos	Pantalla de cristal líquida incorporada
	Matemática de punto flotante	si
Comunicaciones	Puertos RS-232y Puertos RS-485	Mini DIN de 8 pines
	DeviceNet, dispositivos similares/esclavos	con 1761-NET-DNI
	Ethernet	Incorporadas y con 1761-NET-ENI
	DH-485	Directamente desde el puerto Combinado usando el 1763-NC01
	Modbus RTU	Maestro/esclavo
Alimentación de funcionamiento	120/240 VCA / 24 VCC	si

El módulo de entradas analógicas 1762sc-IF8u posee entradas analógicas para tipo termocupla, RTD, resistencia, corriente y voltaje. Para seleccionar el tipo de entrada se hace mediante un switch ubicado al costado del módulo. Por defecto de fábrica cuenta con una entrada analógica de corriente. En la figura 5.9 se muestra el diagrama del switch.

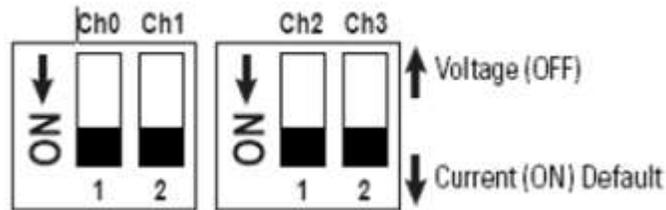


Figura 5.9 Switch del módulo 1762sc-IF8u (15)

El módulo de entradas para RTD 1762-IR4 recibe y almacena datos analógicos digitalmente convertidos de entradas de RTD u otras entradas de resistencia, tales como potenciómetros. El módulo acepta conexiones de cualquier combinación de hasta 4 entradas de RTD u otras entradas de resistencia. Cada uno de los 4 canales de entrada es individualmente configurable para un dispositivo de entrada específico y ofrece indicación de circuito abierto o cortocircuito y sobrerango o bajo rango.

El módulo de salidas a relay AC/DC 1762-OW16 es capaz de manejar 16 salidas de corriente alterna o directa mediante un relay normalmente cerrado. Los voltajes de operación son de 5 a 265 VAC y de 5 a 125 VDC.

El módulo de salidas analógicas de corriente/voltaje 1762-OF4 cuenta con dos formatos de salidas proporcionales o de tipo PID. Para la configuración de dicho módulo, cada canal se debe configurar por separado. En la sección de software se hace referencia al mismo y en la figura 5.11.

En la tabla 5.6 se muestra la asignación de entradas y salidas de los módulos, con respecto al programa diseñado.

Tabla 5.6 Asignación de las entradas y salidas de los módulos

Módulo	Asignación	Módulo	Asignación
1763-L16AWA	Presión baja aceite compresor 1	1762sc-IF8u	Presión de baja circuito 1
	Presión baja aceite compresor 2		Presión de baja circuito 2
	Falla Voltaje		Presión de alta circuito 1
	Alta corriente compresor 1		Presión de alta circuito 2
	Alta corriente compresor 2	1762-IR4	Temperatura suministro
	Confirmación Bomba Agua 1		Temperatura Retorno
	Confirmación Bomba Agua 1	1762-OW16	Válvula línea de liquido compresor 1
	Arranque Compresor 1		Pareja de abanicos 1 Com1
	Arranque auxiliar compresor 1		Pareja de abanicos 2 Com1
	Arranque Compresor 2		Pareja de abanicos 1 Com2
	Arranque auxiliar compresor 2		Pareja de abanicos 2 Com2
	Etapa Compresor 1	1762-OF4	Válvula circuito 1
	Etapa Compresor 2		Válvula circuito 2
	Válvula de Line de liquido del compresor		

5.2.2 Diseño del panel de control

El diseño de los paneles debe estar restringido sobre alguna norma internacional que ofrezca seguridad tanto para protección del equipo como del

personal encargado de éste. Para el diseño de estos paneles se utilizó el National Electric Code 2008. El artículo 409 de este código trata sobre paneles de control industriales proyectados para uso general y que funcionan a 600 Voltios o menos. En este artículo, se hace referencia a otros artículos de este mismo código necesarios para diseñar de forma adecuada el panel de control.

En la Figura 5.10, se muestra el diagrama de potencia diseñado para este panel. Según el artículo 450, los transformadores instalados en interiores, deben de estar protegidos con fusibles en el primario. Según la tabla 450.3 (B) del código, la protección contra sobrecorrientes para transformadores de 600 voltios o menos, en el primario debe ser de un valor 250% del valor nominal, y en el secundario de 167% del valor nominal. Realizando los cálculos de las ecuaciones siguientes, se obtiene la el valor de los fusibles FU125 y FU205.

$$I_{\text{nominal primario}} = \frac{P}{V} = \frac{500VA}{480V} = 1,042A \quad (5.38)$$

$$I_{300\%-\text{nominal primario}} = 3,126A \quad (5.39)$$

Por lo tanto el fusible FU125 debe ser de 3A

$$I_{\text{nominal secundario}} = \frac{P}{V} = \frac{500VA}{120V} = 4,167A \quad (5.40)$$

$$I_{167\%-\text{nominal primario}} = 6,958A \quad (5.41)$$

Por lo tanto el fusible FU205 debe ser de 7A.

En la figura 5.10, se muestra una etapa que corresponde al supresor de traccientes. Este equipo está diseñado para aplicaciones de control de protección de las unidades de suministro de energía.

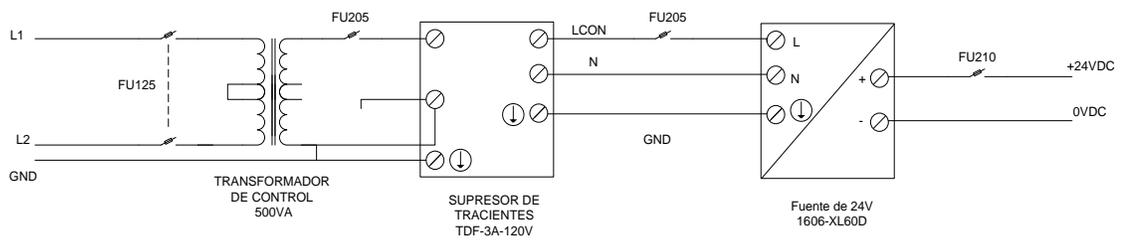


Figura 5.10 Diagrama eléctrico de circuito de potencia

En el código no se hace referencia a este tipo de equipo eléctrico, por lo que para este caso, se utilizaron la hojas de datos del equipo donde se recomienda utilizar para el FU205, un valor de fusible de 4 A. Por criterio de diseño de los ingenieros de Sistemas IQ, se decide utilizar un fusible de 2 A, debido a que éste está colocado directamente antes de la fuente de conmutación y no después del supresor de traccientes. Debido a que las mismas líneas que salen del supresor alimentan al módulo 1763-L16AWA y además las entradas de este módulo son de AC, se decide poner un fusible de 1 A a la entrada del módulo y en cada una de las salidas, para un total de 6 fusibles de un amperio. Esto se hace bajo la recomendación de diseño comentada anteriormente.

La fuente conmutada de la figura 5.10, tiene una potencia de 60W de salida y a su entrada 2.5 A, por lo que por recomendación del fabricante se debe un utilizar un valor 30% máxima la corriente nominal de la fuente. Aplicando la siguiente ecuación se obtiene el valor de la corriente.

$$I_{30\%-\text{nominal fuente}} = 3,15A \quad (5.42)$$

Por lo anterior, el fusible FU210 debe ser de 3A.

Para la conexión de neutro y tierra, se trabajará con cableados y líneas separadas por tratarse de puntos diferentes. Aquellas conexiones donde el neutro y la tierra o chasis estén físicamente unidos deben evitarse por aspectos de seguridad

y es responsabilidad de la planta donde se instale un equipo en estas condiciones, aquellos daños parciales o permanentes en el equipo debido a mala instalación de la tierra. Para los efectos, se utilizó los lineamientos del artículo 250 del National Electric Code, donde las conexiones a tierra deben realizarse en la medida posible punto a punto, es decir, una tierra en el campo no debe unirse con otra en el campo, sino que ambas deben unirse a tierra a través de un borne en el gabinete. En la empresa Sistemas IQ, se establecieron normas de colores para el cableado de los gabinetes, las cuales se describen en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Notación de colores de bornes dentro gabinete normado por Sistemas IQ S.A

Color	Tipo de señal	Propósito
Verde-amarillo	Tierra	Tierra
Rojo	Señales 110VAC	110VAC
Azul	24VDC	Sensores
Gris	110VAC	Entrada/Salida PLC
Gris 6mm o mayor	110VAC 220VAC 460VAC	Potencia

Para la selección de los calibres de cable se utiliza el artículo 240 y la tabla B.310.1. Con estos artículos se recomienda usar para los cables de la parte de control, un calibre de 18 AWG de cobre, que soporte 7 amperios, pero que las cargas continuas no excedan los 5 amperios. Como se mencionó anteriormente ninguna carga en la parte de control excede esos valores. En el caso de la parte de potencia que se trabajan con voltajes de 120V a 480V, se debe utilizar cable 16AWG, el cual está diseñado para corrientes de 10A. Las normas establecidas por la empresa para el cableado de los gabinetes se encuentran en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Notación en cableado dentro gabinete normado por Sistemas IQ S.A

Color	Calibre Mínimo	Tipo de Señal	Propósito
Rojo	AWG-18	110VAC	Control
Azul	AWG-18	24VDC	Control
Verde	AWG-18	Tierra (chasis)	Tierra
Blanco	AWG-18	Neutro de 110VAC	Control
Negro	AWG-16	110VAC 220VAC 460VAC	Potencia
Azul	AWG-18	24VDC 4..20mA	Sensores analógicos

La cantidad de cables máxima por ducto se establecerá según las tablas del apéndice C del NEC. Para los efectos, Sistemas IQ S.A. prevé que cada ducto mayor a 3 pulgadas quede con una capacidad de un 10% más para colocar nuevos cables en el futuro en caso de expansiones.

Para el resguardo de seres vivos, toda conexión que ofrezca peligro de descarga eléctrica capaz de causar lesiones parciales o permanentes, debe estar señalada con indicaciones visibles (calcomanías y otros). Una conexión se considerará peligrosa si opera a más de 50 V y en tal caso debe evitarse cualquier contacto accidental. Siguiendo normas de artículo 110.27 del NEC, se recomienda que aquellas conexiones altamente peligrosas queden situadas a una altura mínima de 2.5 m desde el suelo. Dentro de los gabinetes deberá estar situado el punto donde sea menos posible el contacto accidental y en tal caso debe existir una protección. Los conductores no deben tener puntas expuestas no cubiertas.

En la anexos A.4 se encuentra el plano diseñado con todos los criterios tomados anteriormente discutidos. En este documento se encuentra una alzada del panel donde se observa toda la distribución del equipo la cual e hizo mediante niveles divididos por ductos. En el primer nivel se establece la parte de potencia, donde se encuentra la entrada de la alimentación al sistema proveniente de 120 VAC, la fuente conmutada, el protector de trcientes y el transformador.

En el segundo nivel, se encuentra el PLC utilizado y los módulos agregados en cual se pudo apreciar en la vista de Micrologix 1100, donde se puede observar

con claridad la distribución de los módulos. Finalmente en el tercer nivel se encuentra la distribución de los bornes de entradas y salidas de los módulos.

En la parte final de los planos se encuentra el diagrama eléctrico, el cual se diseñó de manera que al lado izquierdo viene con una numeración consecutiva donde el número inicial coincide con el número de la página. Con ello se logra que para localizar conexiones entre páginas diferentes se busca la página y luego el reglón donde éste se encuentra.

Finalmente, se realizó una descripción de cada una de las terminales, la cual se encuentra al inicio del plano y de esta manera, es posible identificar a que se refiere cada terminal de salida. Lo que son dispositivos de campos se agregaron en el plano mediante cuadros de líneas punteadas, con lo cual se identifica que son dispositivos de campo.

5.3 Descripción del software

5.3.1 Software del PLC en Rslogix500

Para la programación PLC Micrologix 1100 se utilizó el software Rslogix500 Rockwell Automation, mediante diagramas de escalera. Este tipo de lenguaje de programación consiste, en activar salidas que cumplan con las restricciones de las entradas. Cada PLC cuenta con su set de instrucciones, entre éstas se encuentra el bloque PID, el cual hay que configurarlo con los valores del PID obtenidos teóricamente.

La figura 5.11 muestra la configuración de los módulos compatibles con el PLC. Estos módulos se deben ir colocando de la misma manera que se va implementar para que la CPU del PLC los reconozca. Además, para las entradas analógicas se deben configurar cada una de ellas por aparte. En la figura 5.12.a, se muestra la configuración que se debe hacer a cada uno de los canales de módulos analógicos de entrada. Estos se configuran de esta manera para que el valor interno en el software sea un valor proporcional a la corriente que está entrando. Caso contrario, para el módulo de salidas analógicas donde la configuración no se hace proporcional, sino PID, en razón de que esta salida lo que controlará es la válvula. Esto se observa en la figura 5.12.b.

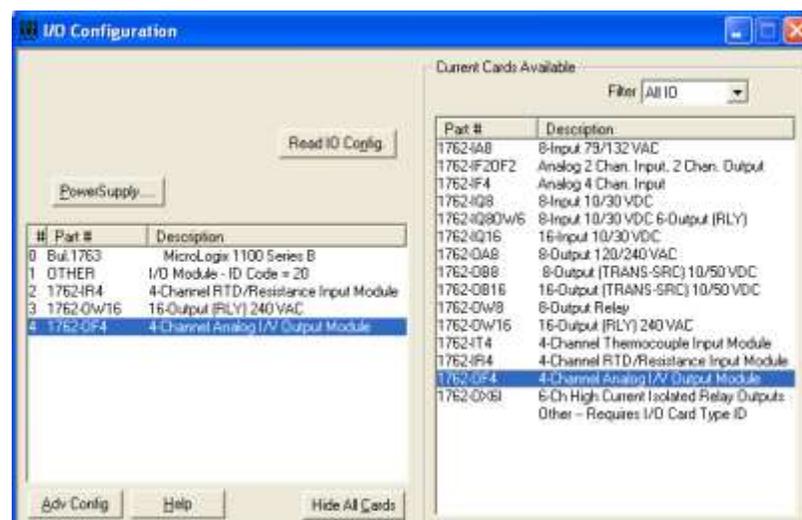


Figura 5.11 Configuración de I/O

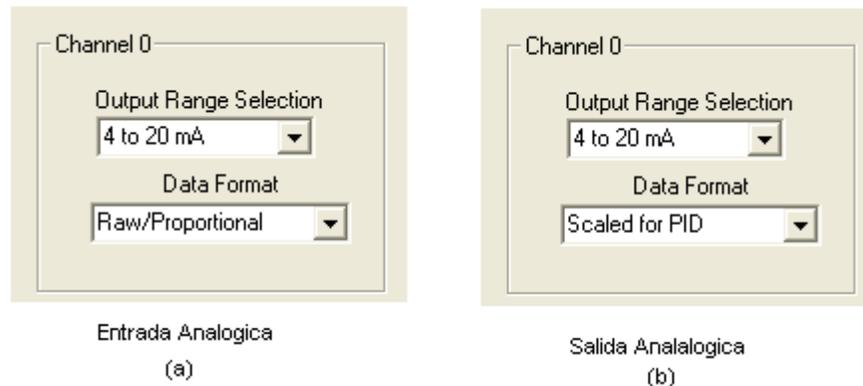


Figura 5.12 Configuración de las entradas y salidas analógicas.

En la figura 5.13, se muestra la rutina principal, que se va a encargar de llamar a las diferentes subrutinas del programa. En la empresa SIQ se trabajan con ciertos estándares de programación, de los cuales, uno de ellos consiste en crear dos subrutinas, llamadas espejos de entrada y espejos de salida. Estas subrutinas consisten en direccionar cada una de las entradas a una variable interna y una variable interna a cada salida, con el fin de poder iniciar la programación sin aún tener conocimiento de la posición de las entradas y las salidas a nivel físico. Si se hiciera un cambio a nivel físico en la puesta en marcha, sólo se debe hacer la modificación en las subrutinas de los espejos y no en todas las subrutinas que utilicen las variables.

En la rutina principal, una vez que ha mapeado las entradas se verifica que ninguna de las alarmas externas del sistema esté activa mediante el proceso revisar alarmas. En la figura 5.14 se muestra el diagrama de flujo de este proceso. En este esquema si algunas de las alarmas está activa, se levantará una bandera y ésta solo podrá desactivarse cuando se haga un reset de las alarmas. En la rutina principal de la figura 5.13, si la bandera alarmas está activa el sistema se apagará.

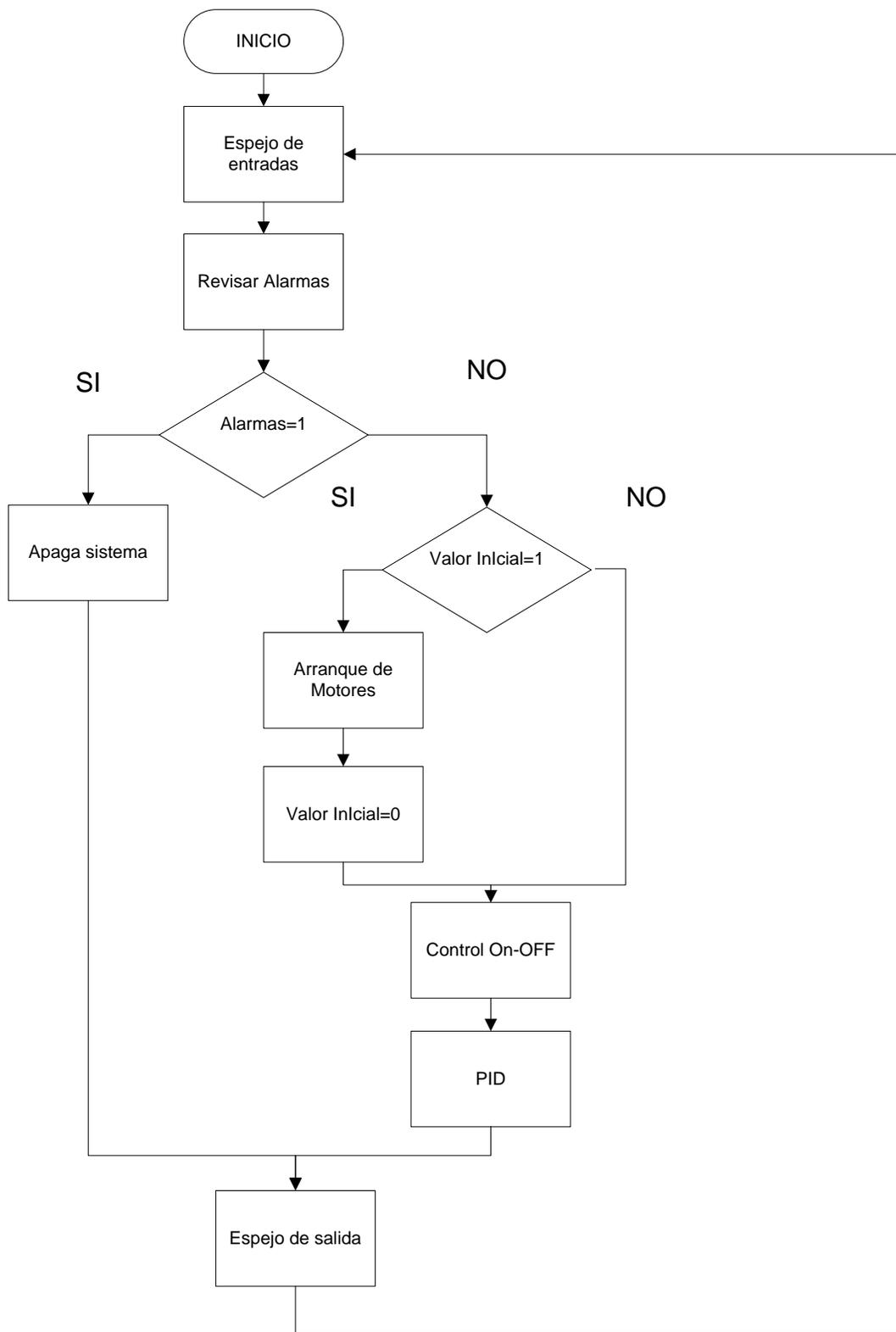


Figura 5.13 Diagrama de flujo principal

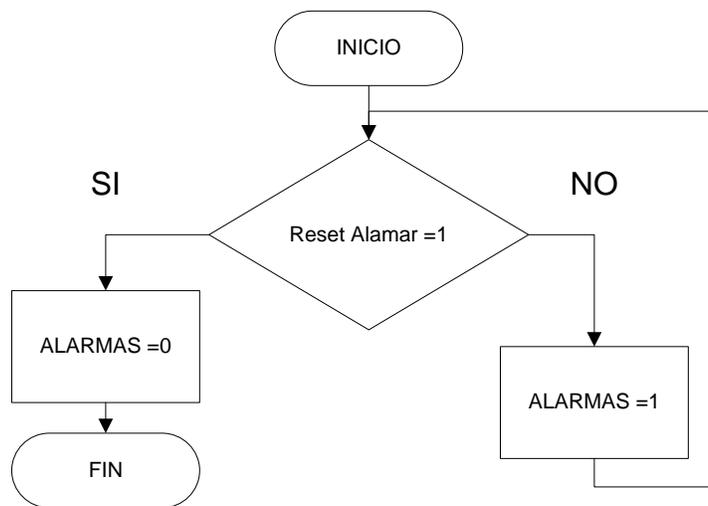


Figura 5.14 Diagrama de flujo Alarma

Una vez verificado que no hay alarmas activas, se verifica si los motores ya están encendidos, caso contrario se entrará a la rutina arranque de motores que se explicará en el diagrama de flujo de la figura 5.15. Una vez activados los motores, se levanta la bandera que indica que estos han sido encendidos.

En el diagrama de la figura 5.13, se observa que tiene una secuencia cíclica y una vez verificado el estado de las alarmas y los motores, va entrar en los procedimientos del control On-Off y el PID que se explican en los diagramas de las figura 5.17 y figura 5.18 respectivamente. Para la asignación del estado de las salidas, el sistema siempre lo hace mediante el espejo de salida que es la misma lógica que el espejo de entrada.

En la figura 5.15, se encuentra el diagrama de flujo del encendido del motor de los compresores. Estos motores no se pueden encender inmediatamente por recomendación de los ingenieros de mantenimiento, por lo que se hizo una rutina que encendiera primero un motor y luego el otro. Los motores cuentan con doble bobinado, por lo que primero se conecta una bobina, se espera un lapso de tiempo que el motor llegue a la corriente de media carga y se le conecta el otro bobinado.

Esta rutina contempla ambos motores, porque si se encienden los dos al mismo tiempo es mayor la corriente exigida.

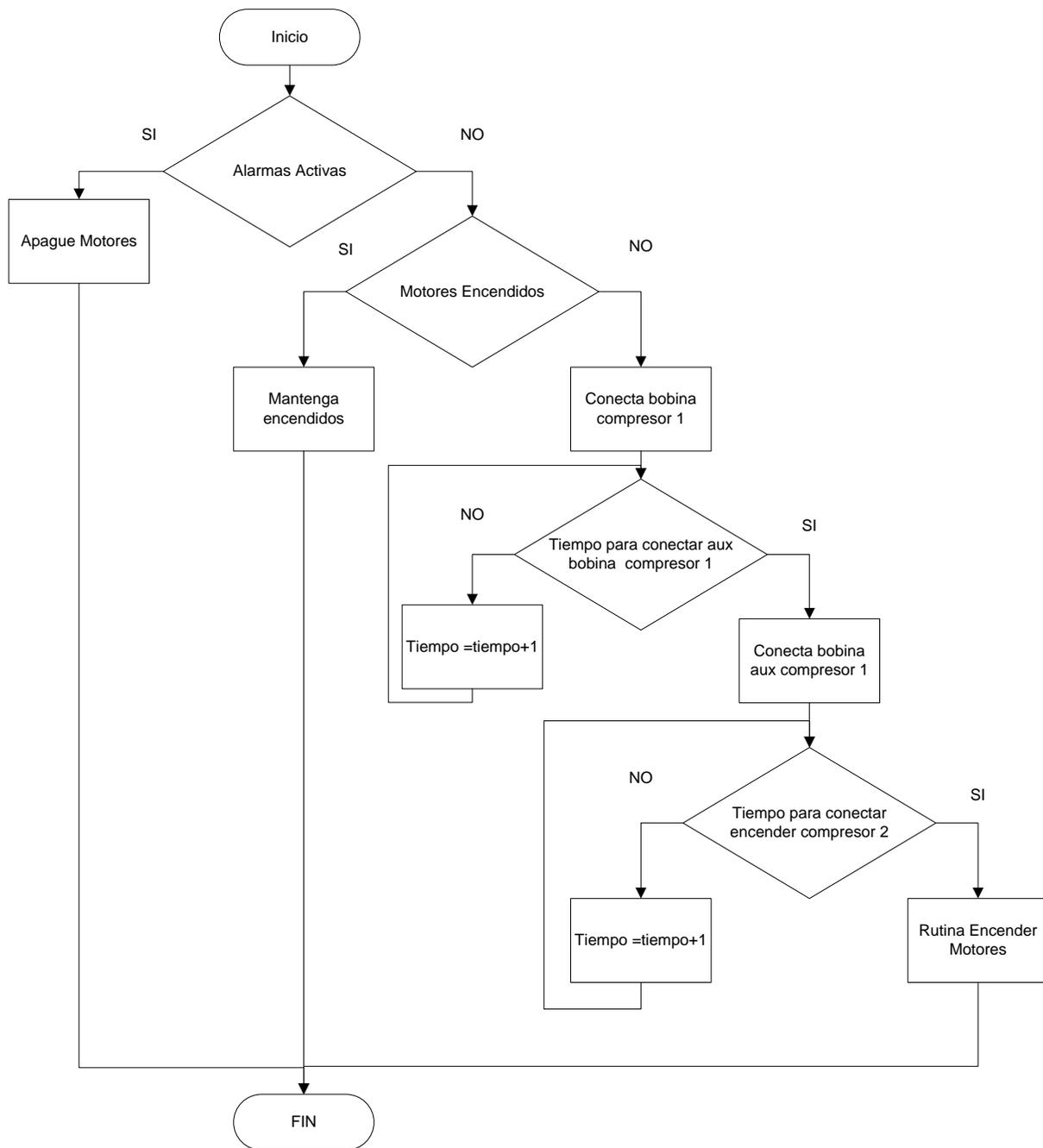


Figura 5.15 Diagrama de Flujo encendido de Motores

Para el escalamiento de las entradas, se utilizó el bloque SCP, como se muestra en la figura 5.16. En la configuración de esta instrucción, se debe determinar los parámetros máximos y mínimos de la recta de escalamiento que se va a utilizar. Este bloque calcula la salida escalada con respecto al parámetro de la entrada.

La figura 5.17 muestra el diagrama de flujo para el control On-Off que se desea implementar. Este programa va estar en un ciclo constante donde al principio de la rutina va leer el valor de presión. Este valor de presión viene de otra rutina que se va encargar de escalar el valor de 4 a 20 mA del sensor a un valor de presión en psi. Una vez escalado el valor, se revisa si la presión está entre el rango máximo y mínimo de alarmas. Si el valor de presión se encuentra fuera de este rango se encenderán las alarmas y apagará inmediatamente todo el sistema. Estas alarmas notificaran cual fue el tipo de fallo.

Si el valor de presión medido se encuentra dentro del rango de protección descrito anteriormente y si la presión es mayor a la presión máxima, se debe encender los ventiladores y si la presión es menor a la presión mínima, se deben apagar. Como el control es con histéresis, se debe mantener el estado actual de ventiladores mientras se encuentre en el rango entre la presión máxima y la presión mínima. Esto se refiere a que, si el ventilador se encuentra encendido solo se va poder apagar hasta que llegue al valor mínimo de presión, y si se encuentra apagado solo se va lograr encender hasta que llegue al valor máximo de presión.

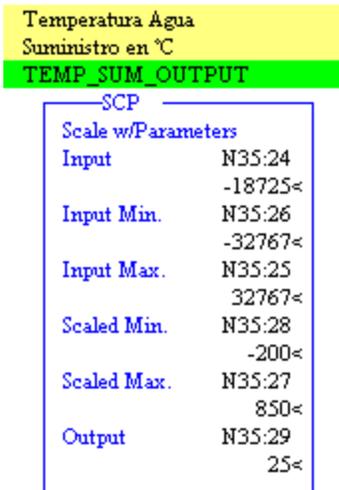


Figura 5.16 Bloque de escalamiento

El programa cuenta con un bloque que calcula el PID y en éste se deben especificar los parámetros que se van a utilizar. En la figura 5.18, se muestra la ventana en la que se deben colocar los parámetros. Primero, en la parte de tuning se deben colocar los parámetros de la ganancia proporcional e integrativa (en este caso no se utiliza la derivativa, por lo que simplemente este valor se deja en cero). En esa misma parte, se coloca el tiempo de muestreo utilizado. En la sección de loop update y el modo de control, es la parte con la cual el control calcula el error para el tipo de control y se utiliza el modo SP-PV (set point -variable de proceso). Los demás son parámetros de entrada que se están midiendo y la salida que se controla. Estos parámetros van a depender de las escalas que utilicen, en el caso de la entrada va ser la temperatura y para la salida va ser el control de la válvula.

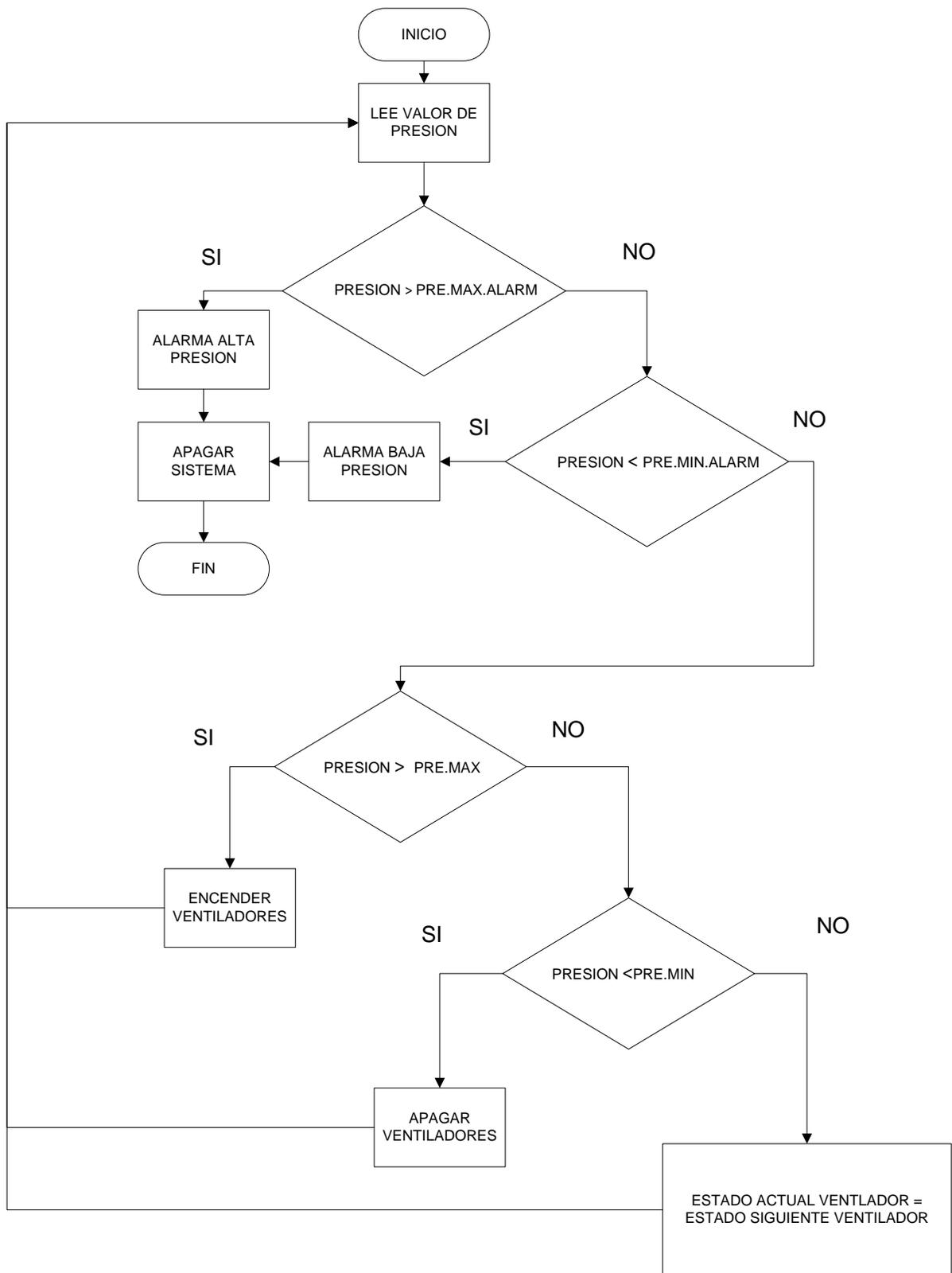


Figura 5.17 Diagrama de flujo del Control On-Off

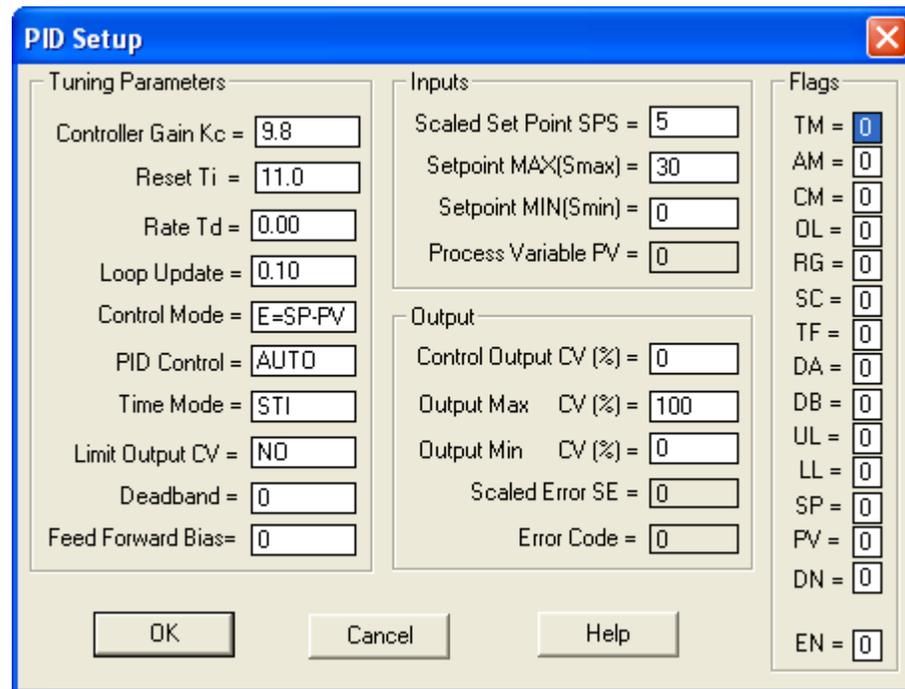


Figura 5.18 Pantalla para fijar valores del PID

5.3.2 Programa para verificación de rutinas en FactoryTalk Viem Studio

Para revisar que las rutinas diseñadas funcionan adecuadamente, se utilizó el FactoryTalk Viem Studio. Este software es utilizado para hacer interfaces HMI, aunque en los objetivos de este proyecto no está diseñar una interfaz de este tipo, se hizo con el fin de poder conectar la programación mediante un emulador y un servidor OPC a la aplicación creada, de tal forma que se pueden hacer pruebas en tiempo real y revisar si las rutinas trabajan de manera correcta.

En la figura 5.19, se encuentra una de las pantallas diseñadas para la verificación del control On-OFF. Esta pantalla cuenta principalmente con una sección donde se mostrará el gráfico en tiempo real. Las curvas que se irán desplegando en el gráfico tienen un color específico, las cuales se muestran al lado derecho de la pantalla. La primera línea corresponde al valor actual de la variable

controlada, la segunda a la acción de control, y las otras cuatro son los límites del controlador y los límites de alarma.

En la sección de abajo derecha, se encuentra un cuadro de las alamas y ventiladores. A la par de cada cuadro, aparece un cuadro pequeño, que si está en verde quiere decir encendido o activada, y en rojo quiere decir que se encuentra apagado, además aparece la palabra “encendido” o “apagado”, para especificar mejor la función. En la esquina izquierda superior y en la inferior, aparecen 2 cuadros que son utilizados para escalar la gráfica y dar funcionamiento al sistema graficador.

Para la simulación, se agregó una perturbación a la variable controlada, la cual se hace mediante pulsos. Estos pulsos son generados por el cuadro que se encuentra en la parte izquierda inferior, los cuales pueden aumentar y disminuir su valor en tasas de $n\pm 1$, $n\pm 10$, logrando de esta manera verificar el correcto funcionamiento de sistema. Finalmente para desactivar las alarmas, se debe inicializar todas las alarmas, con el botón de “Reset” , función que se ubica en el lado inferior derecho.



Figura 5.19 Pantalla para verificación del Control On/Off

En la figura 5.20, se encuentra la pantalla para la verificación de los motores del compresor, con la cual se puede verificar el encendido de los bobinas, con respecto al lapso de tiempo establecido. Conforme los motores se van encendiendo, va apareciendo la palabra encendido. Si el motor tiene ambas bobinas puestas, al lado de cada bobinado van apareciendo si ésta se encuentra conectada o apagada.

Para lograr corroborar la lógica del control On-Off y el encendido de los motores del compresor fueron conectadas al PLC mediante un servidor OPC y Rslogix Emulate.

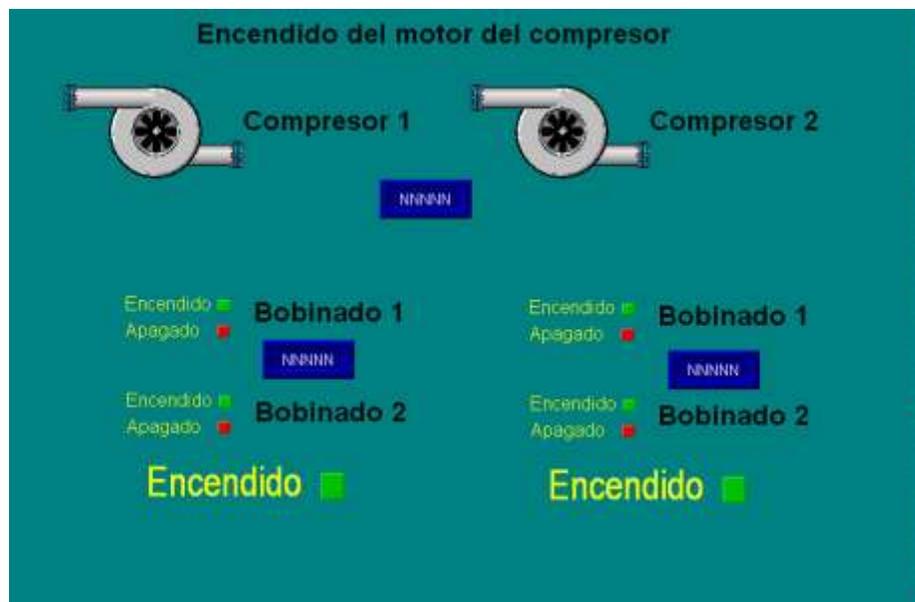


Figura 5.20 Pantalla para verificación del encendido de los compresores

5.3.3 Matlab/Simulink

Para el desarrollo de los modelos y simulación de los mismos se utilizó el software Matlab/Simulink. Este programa funciona como una consola donde se van escribiendo las funciones y operaciones y luego mediante instrucciones ya definidas por el programa, éste las soluciona, desplegando adicionalmente pantallas con gráficos. Este software fue utilizado para obtener gráficos del comportamiento de los modelos.

Para la simulación y verificación de los controladores se utilizó un subprograma de Matlab llamado Simulink. Se utilizó por la facilidad de ir armando los modelos a partir de bloques funcionales y con respecto al entorno de Matlab es más sencillo de utilizar.

5.3.4 Control Station

Este software cuenta con la característica de poder hacer simulaciones de procesos y plantas en tiempo real. De esta manera, conectado el PLC a la planta simulada mediante un servidor OPC, es posible ver el comportamiento del control diseñado. Los modelos de las planta se introducen en el dominio de Laplace y en las gráficas se observa el comportamiento del sistema al seguir un Set Point.

Capítulo 6. Análisis de Resultados

6.1 Resultados y análisis

En la figura 6.1 y en la figura 6.2, se realizaron las simulaciones de las funciones de transferencia obtenidas para el condensador y el evaporador respectivamente. Estas simulaciones se hicieron mediante el software Matlab/Simulink, que permite hacer una comparación entre estas figuras y las gráficas de la figura 5.1 y la figura 5.2 que corresponde a la curvas de comportamiento experimental del condensador y el evaporador respectivamente. Se puede visualizar que el comportamiento en ambas es similar. Por lo tanto la función de transferencia de la ecuación 5.5 para el condensador y la ecuación 5.10 para el evaporador se comportan como el modelo real. La comprobación de esto se puede observar en la tabla 6.1.

$$G_{condensador}(s) = \frac{-1,389 \cdot e^{-6,27s}}{(s+0,1111)} \quad (5.5)$$

$$G_{evaporador}(s) = \frac{-0,04 \cdot e^{-0,03s}}{(s+0,109)} \cong \frac{-0,04}{(s+0,109)} \quad (5.10)$$

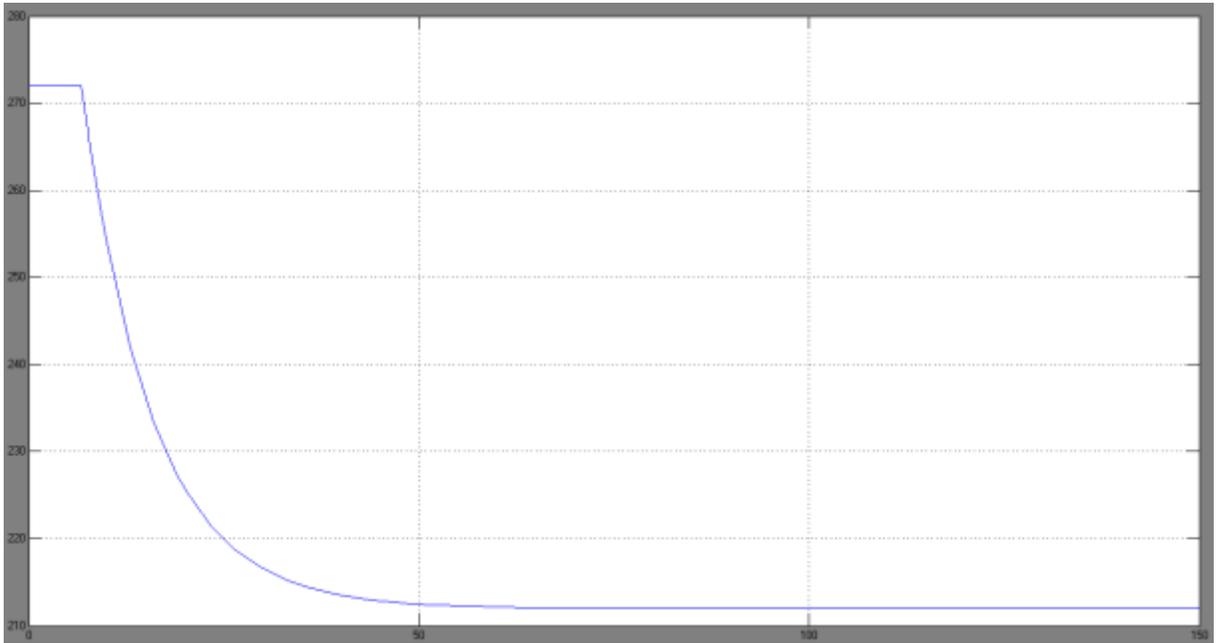


Figura 6.1 Simulación de la función de transferencia del condensador obtenida en Simulink

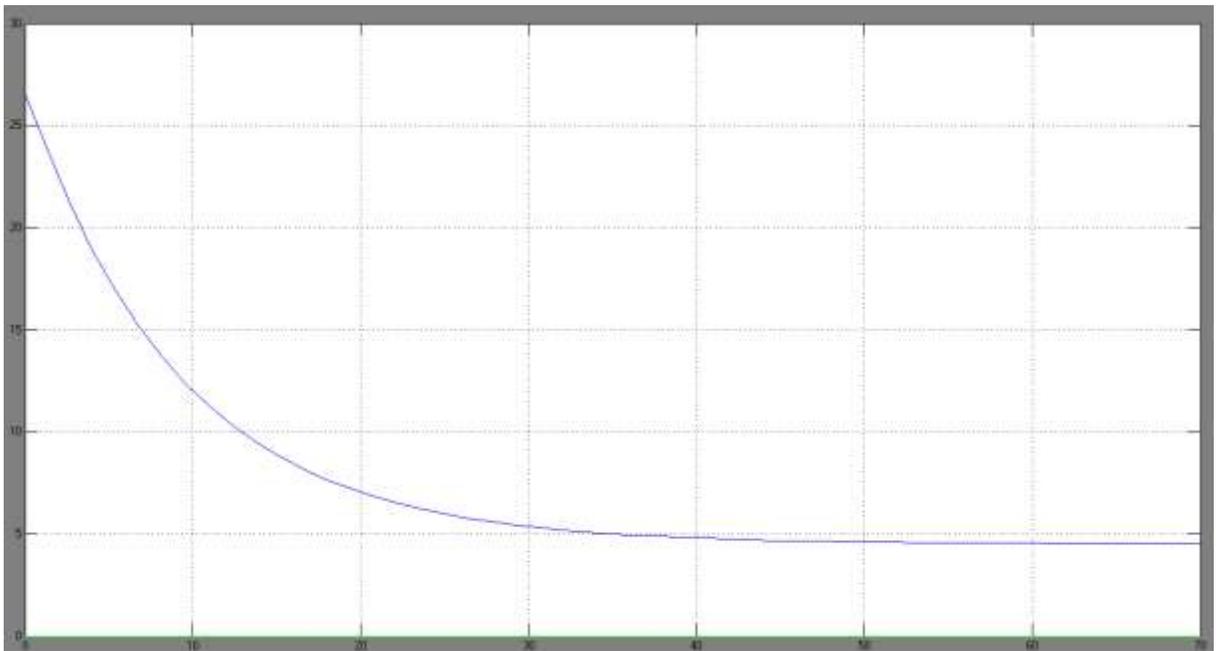


Figura 6.2 Simulación de la función de transferencia del evaporador obtenida en Simulink

Tabla 6.1 Comparación entre los valores experimentales y de simulación del evaporador y el condensador.

	Evaporador			Condensador		
	Experimental	Simulación	Error (%)	Experimental	Simulación	Error (%)
Tiempo muerto(s)	0.3	0.3	0	6.75	6.75	0
Tiempo de estabilización(s)	63.5	64.8	2.04	67	64	4.47
Sobreimpulso	0°C	0°C	0	0 psi	0 psi	0

Los modelos matemáticos de los sensores obtenidos en la ecuación 5.12 y la ecuación 5.14, no tienen comparación con un modelo real. Para verificar completamente su validez, se puede analizar en esta ecuación que el τ , tiene un valor pequeño por lo que los tiempos de estabilización son muy rápidos, y se adecúa al tiempo de respuesta de un sensor.

$$G_{\text{sensor-Temperatura}}(s) = \frac{0,064}{(0,01s+1)} \quad (5.12)$$

$$G_{\text{sensor-Presión}}(s) = \frac{0.0533}{(0,001s+1)} \quad (5.14)$$

El modelo matemático de la válvula de la ecuación 5.18, fue realizado a partir de los criterios del libro “Control Automático de Procesos”, a partir de las recomendaciones de diseño y comportamiento real se logra obtener el modelo de la válvula, para verificar si el modelo tiene las características de un modelo real, es necesario que trabaje en forma conjunta con el evaporador. En simulación de la figura 5.3 se observa que la válvula y el evaporador mantienen el comportamiento de

un sistema de primer orden y además los valores de ganancia de la válvula se mantienen en el rango permitido por el evaporador, por lo que el modelo de válvula se adecúa a los requerimientos del evaporador.

$$G_{valvula}(s) = \frac{1,35}{1,56s+1} \quad (5.18)$$

Se debía determinar si al colocar la función de transferencia del evaporador de la ecuación 5.10 con la función de transferencia de la válvula de la ecuación 5.18, el sistema se va a comportar como un sistema estable. En la figura 6.3, se muestra la gráfica del lugar de las raíces en lazo abierto y como se logra verificar que los polos se encuentran del lado izquierdo, esto debido a que ninguna raíz de la ecuación característica cruza el eje imaginario y por lo tanto no da indicación de inestabilidad en la planta.

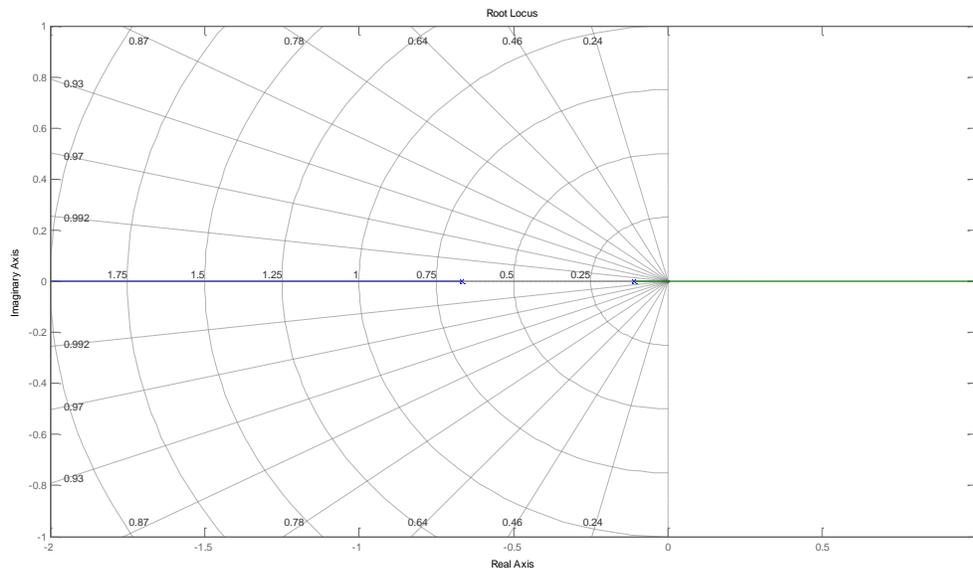


Figura 6.3 Lugar de las raíces del sistema sin compresor en Matlab

Con lo analizado de los modelos anteriores se logra alcanzar 2 objetivos específicos. El primero de ellos, consiste en analizar las características y funcionamiento del equipo mecánico y de instrumentación. Con este análisis fue posible obtener todas las variables necesarias para lograr realizar los modelos matemáticos a partir de las hojas de datos y mediciones de campo. El objetivo de obtener un modelo matemático del HVAC, fue posible lograrlo obteniendo los modelos del evaporador, el condensador, las válvulas y los sensores y las ecuaciones de la función de transferencia de estos modelos, las cuales al simularlas, se comportan igual que el dispositivo real obtenido y por lo tanto las ecuaciones describen el comportamiento.

En la figura 6.4, se observa, mediante una gráfica, el comportamiento del sistema en lazo de cerrado con el compensador diseñado, mediante el método de Ziegler-Nichols. Debido a que se utilizó un compensador PI, la función principal del mismo es tener un error de estado estacionario igual a cero y en la gráfica se logra apreciar eso. Comparando los sistemas con compensador y sin compensador, se logra apreciar en la tabla 6.2 que las características dinámicas cambiaron. El tiempo de estabilización disminuyó con el compensador, pero trae como consecuencia que el sobreimpulso aumente. Para corregirlo esto, se debería integrar una parte derivativa al compensador, pero como se desea un sistema que tenga una respuesta de estabilización veloz ese sobreimpulso no es crítico en el proceso, por lo cual no hace falta disminuirlo.

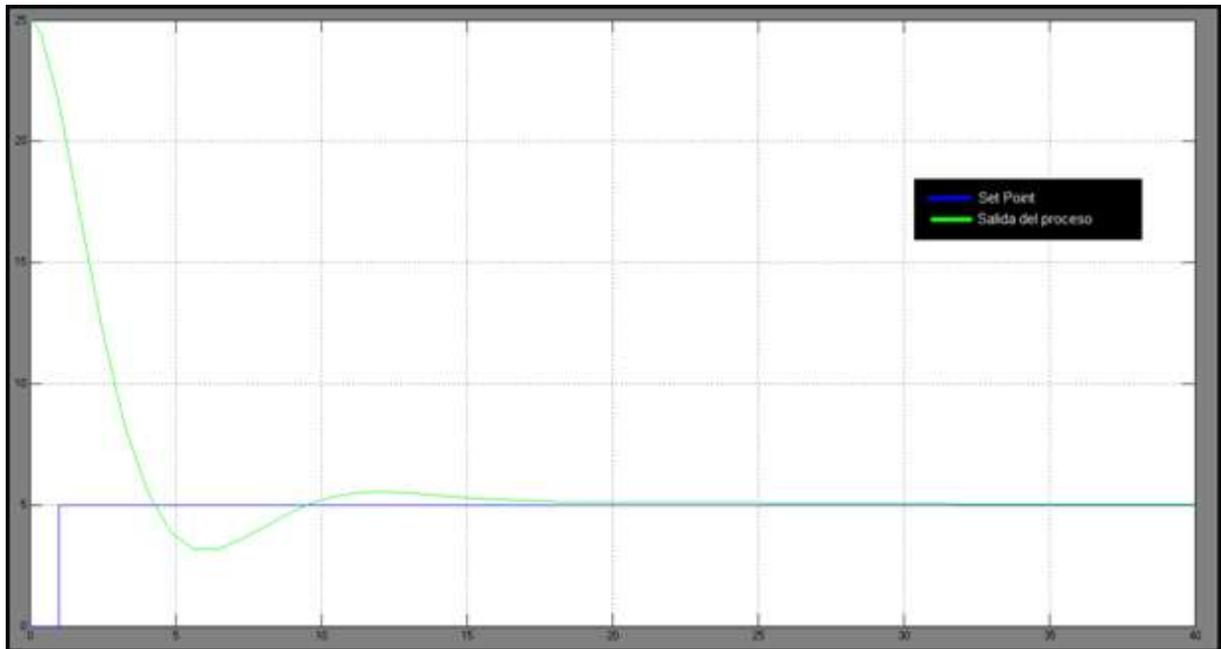


Figura 6.4 Comportamiento del sistema con compensador a un SetPoint de 5° en Simulink.

Tabla 6.2 Comparación entre características dinámicas entre el sistema compensado y sin compensar.

Sistema	Tiempo de estabilización(s)	Sobre impulso(°C)
Sin compensador	37.5	0
Con compensador	29.7	1.09

En la ecuación 5.30 y la ecuación 5.32, se observa que las raíces de la ecuación característica dependen de los valores de K_p y K_i , y la estabilidad del circuito depende del ajuste de esos valores. En la figura 6.5, se muestra el lugar de las raíces y al examinar la gráfica, se determina que este circuito de control nunca se va volver inestable.

Al aumentar los valores de K_p y K_i , la respuesta se hace más oscilatoria o subamortiguada. La respuesta subamortiguada se da por que las raíces se alejan del eje real, conforme se incrementa el valor de las constantes K_p y K_i . En la figura 6.4, se determina como los valores obtenidos por el método Ziegler-Nichols, se encuentran en un rango adecuado ya que la respuesta no es oscilatoria y el subamortiguamiento es poco y se estabiliza en forma rápida.

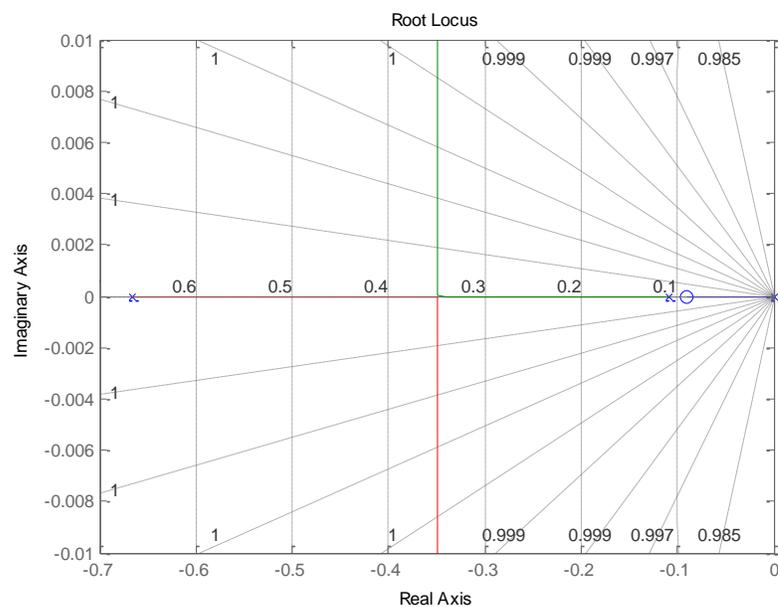


Figura 6.5 Lugar de las raíces con el compensador diseñado.

En la figura 6.6, se observa la simulación hecha en el Control Station y se observa que el compensador programado en PLC logra estabilizar el sistema. En esta gráfica se aprecia mejor la función a la salida del compensador. Cuando las perturbaciones a la salida son muy altas el compensador llega a elevar su valor a la salida y luego conforme el sistema va alcanzado al valor de estabilización, el sistema va disminuyendo su valor proporcionalmente.

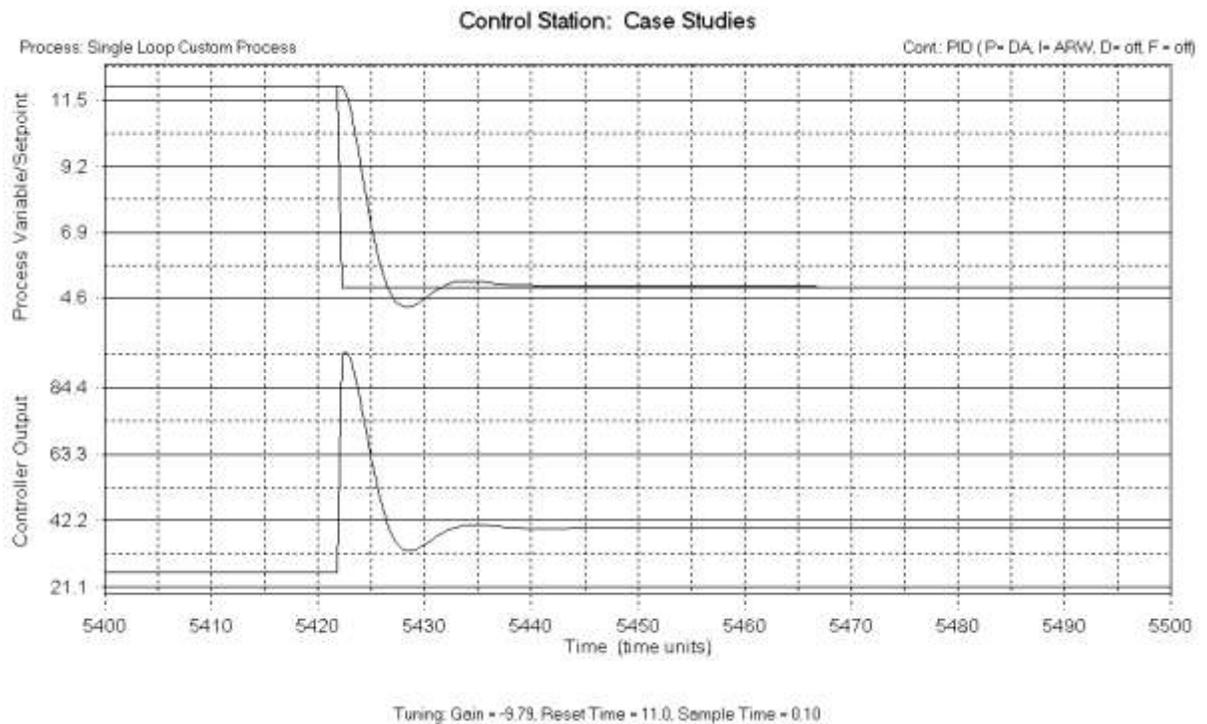


Figura 6.6 Comportamiento del sistema con compensador a un SetPoint de 5°C en Control Station.

El sistema normalmente va tener el SetPoint a 5°C. Las variaciones que va tener el sistema son perturbaciones a la salida, por lo que el compensador debe de actuar rápidamente para mantener el sistema en un valor constante. En la simulación de la figura 6.7, se logra introducir estas perturbaciones manteniendo un valor estable a la salida y sumándole o restándole un 1°C, de esta manera se logra perturbar al sistema. Se observa que aunque el control tenga que estabilizar la salida ya sea a un valor mayor o menor, siempre va tener el mismo comportamiento. Se logra comprobar que el diseño del compensador si actúa de manera constante y rápida ante las perturbaciones. En la figura 6.8, se muestra como el PI programado en el PLC logra compensar de manera similar a la simulación hecha en la figura 6.7. En esta prueba se realizan más variaciones en la perturbación debido a que el programa permite hacerlo. De igual manera el sistema siempre va a tender a compensarlo para mantenerlo al valor de Set Point preestablecido. Al igual que el caso anterior, el sistema siempre mantiene un comportamiento, lo que cambia es la

amplitud de la salida del controlador, ya que ésta es la diferencia que tenga del valor actual con la perturbación entrante.

En la figura 6.9 se observa el comportamiento del sistema al cambiarle en forma constante el valor del SetPoint. Se observa que el compensador ante estos cambios logra estabilizarse al nuevo valor. Al comparar las gráficas de la figura 6.8, y la figura 6.9, se establece que el compensador va reaccionar de manera más rápida para mantener la estabilidad cuando se encuentre ante una perturbación que ante cambio en el SetPoint. Esto se debe a que se realiza menos cálculos para lograr compensar una perturbación que para un cambio de Setpoint.

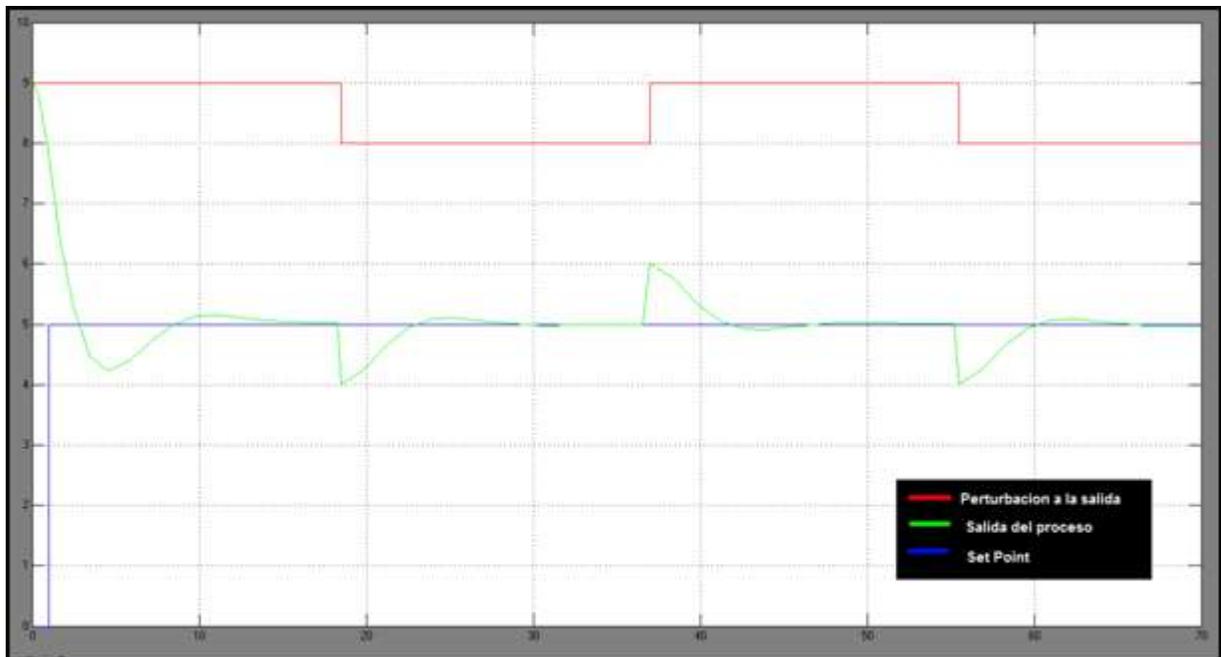


Figura 6.7 Comportamiento del sistema con compensador ante perturbaciones a un SetPoint de 5° en Simulink

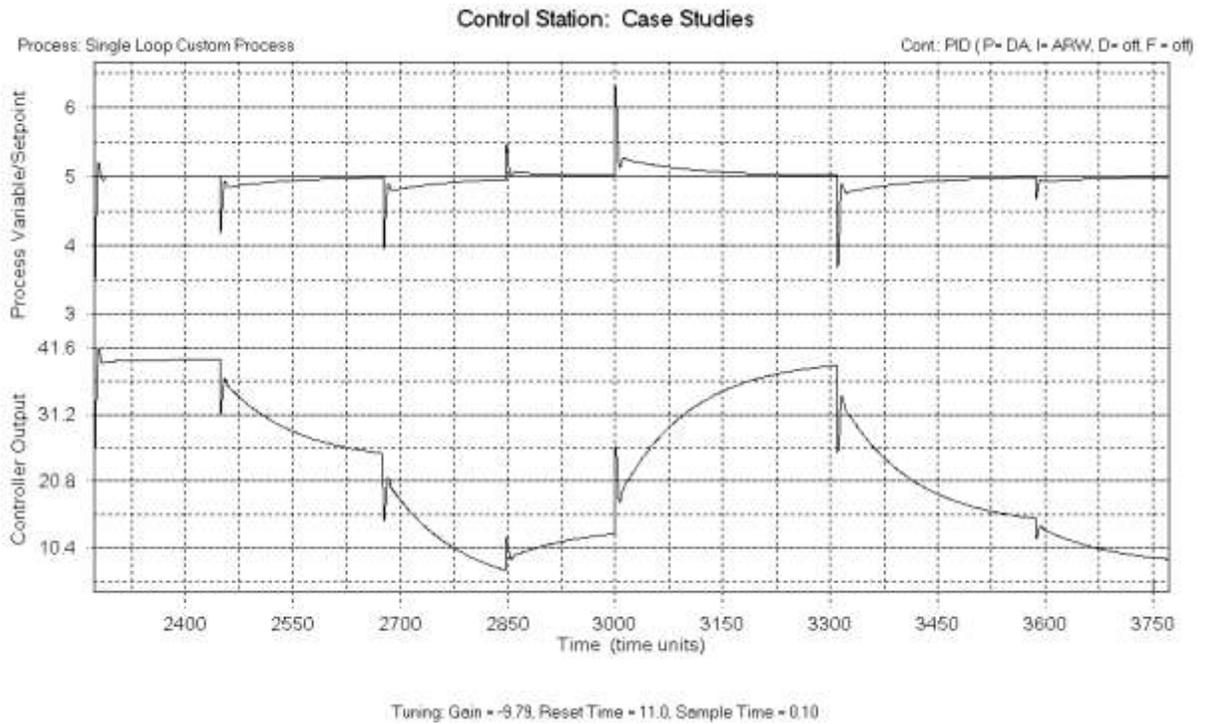


Figura 6.8 Comportamiento del sistema con compensador ante perturbaciones a un SetPoint de 5° en Control Station.

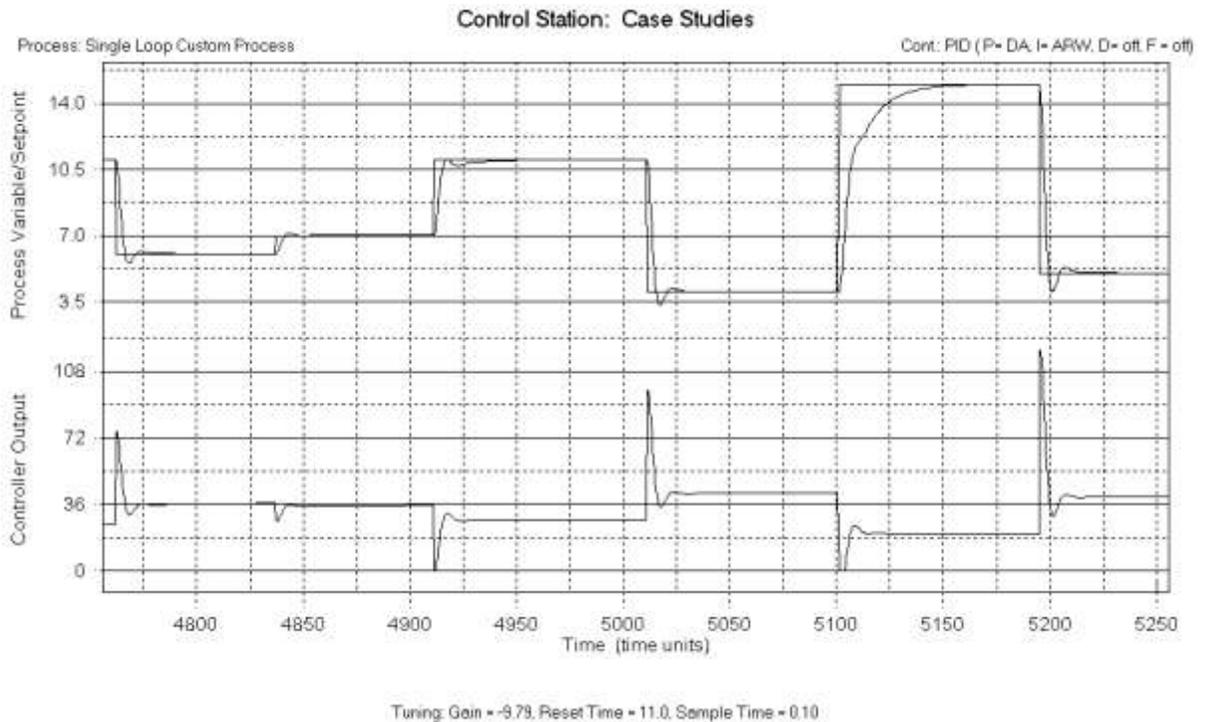


Figura 6.9 Comportamiento del sistema siguiendo diferentes SetPoints en Control Station.

Entre los requerimientos que el sistema debía cumplir era que trabajara en forma conjunta con los 2 circuitos de enfriamiento, por lo que se debe analizar al sistema cuando opera en forma conjunta con las 2 válvulas sobre el evaporador. Se observa en la figura 6.10 que el sistema va a enfriar más rápido porque está entrando mayor carga de refrigerante. Y como se observa en la Tabla 6.3, el tiempo de estabilización disminuye pero de igual forma el sobreimpulso aumenta. El compensador mantiene su comportamiento y aunque se trabaje con 2 válvulas, la respuesta en la salida no es oscilatoria y el subamortiguamiento es poco y se estabiliza rápidamente.

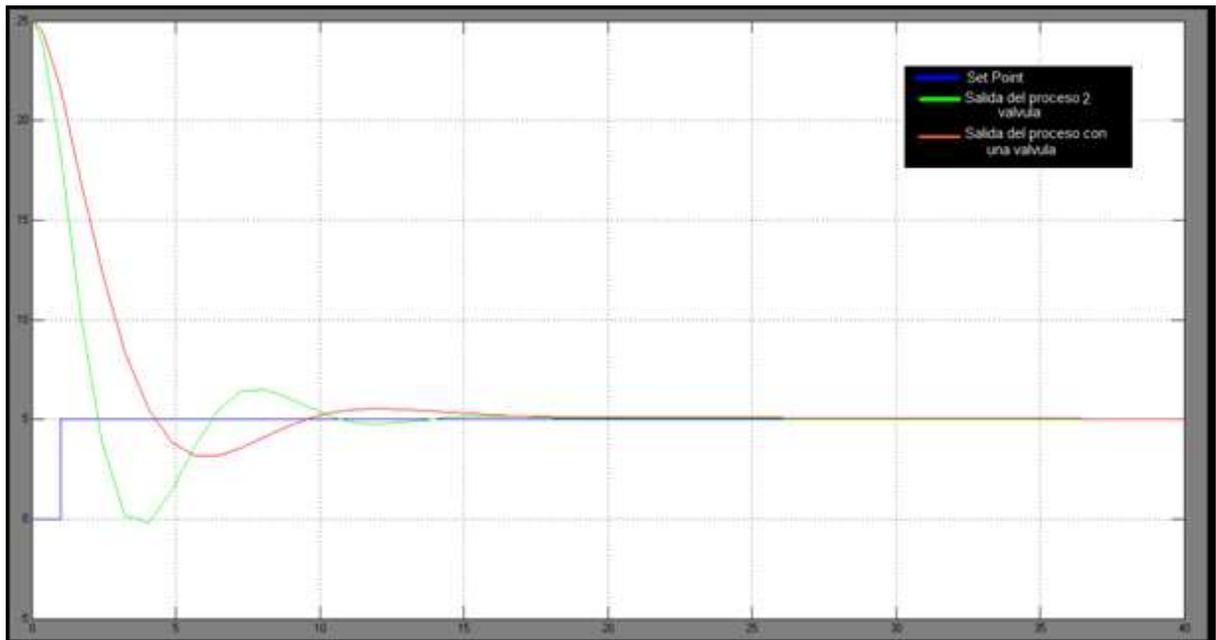


Figura 6.10 Comparación entre comportamientos del sistema con una válvula y el sistema con 2 válvulas compensados en Simulink

Tabla 6.3 Comparación entre características dinámicas del sistema con una válvula y el sistema con 2 válvulas compensados.

Sistema	Tiempo de estabilización(s)	Sobre impulso(°C)
Con una Válvula	29.7	1.09
Con 2 Válvulas	19.3	1.23

Para controlar el condensador fue necesario un control On-Off, esto debido a que solo se podían controlar el arranque y el paro de los ventiladores y no así la velocidad de giro. El controlador diseñado fue hecho con histéresis. Al comparar la gráficas de la figura 6.11 y la tabla 6.4, el sistema sin control tiende a estabilizarse más rápido y las fluctuaciones son menores ante las perturbaciones, pero tiene el inconveniente de llegar a estabilizarse sobre el rango de presión máxima. Si se deja el sistema sin control, es posible que el sistema esté activando las alarmas y se encuentre en un constante paro. En gráfica de la figura 6.11, se observa que el control On-Off con histéresis tiene mayores fluctuaciones y no lograr llegar a un valor constante, esto se debe a que el controlador no tiene la capacidad de producir un valor exacto en la variable controlada, ya que se produce una continua desviación del valor de referencia.

Tabla 6.4 Comparación entre tiempos de estabilización de condensador

Sin control (s)	Con control(s)
35.6	42.1

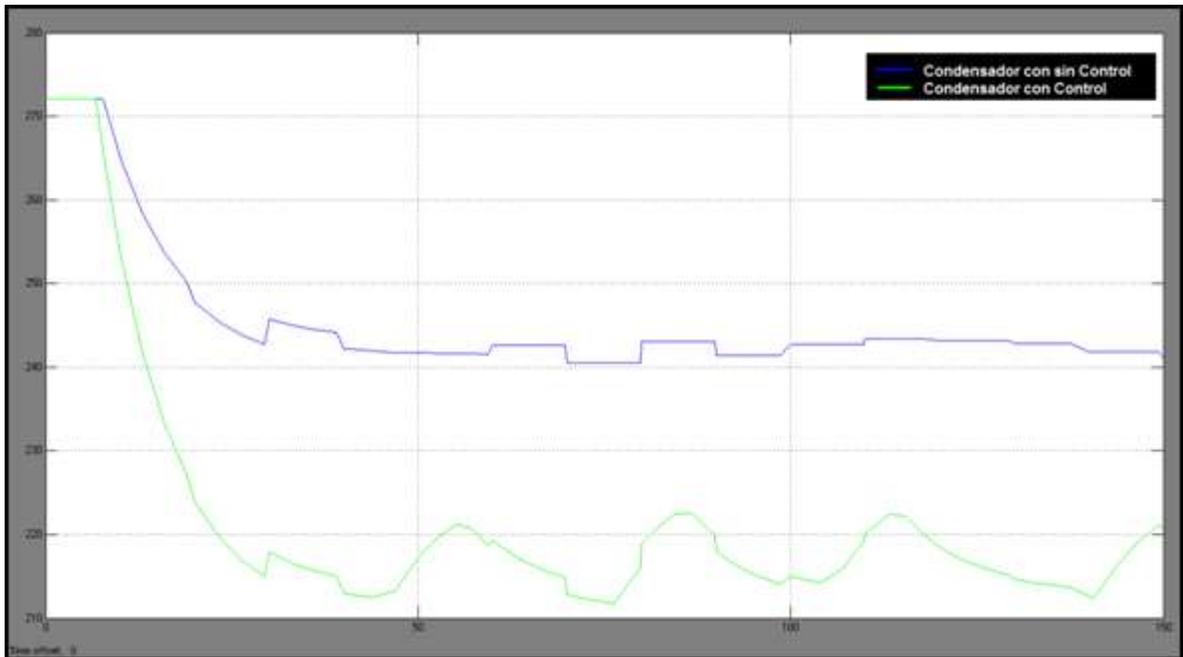


Figura 6.11 Comportamiento del condensador ante perturbaciones con control y sin control

Con la ayuda de la figura 6.12, fue posible obtener las características dinámicas del control On-OFF con histéresis y utilizando la figura 3.5, se logró comparar los tiempos muertos de la planta que se encuentran en la tabla 6.5. Con los valores de esta tabla se identificó las características del control On-Off y utilizando la ecuación 3.23, se obtiene el tiempo muerto del sistema

$$T_U = \frac{T-4T_1}{4} = \frac{31.5-4*1,3}{4} = 6,575s \quad (6.1)$$

Con el tiempo muerto obtenido anteriormente y la ecuación 3.24, se obtiene el el factor de histéresis.

$$K_{is} = \frac{x_m - \frac{x_d}{2}}{4yT_U} = \frac{5 - \frac{3}{2}}{2.4 \times 6,575} = 0,2218 \frac{psi}{kW \cdot s} \quad (6.2)$$

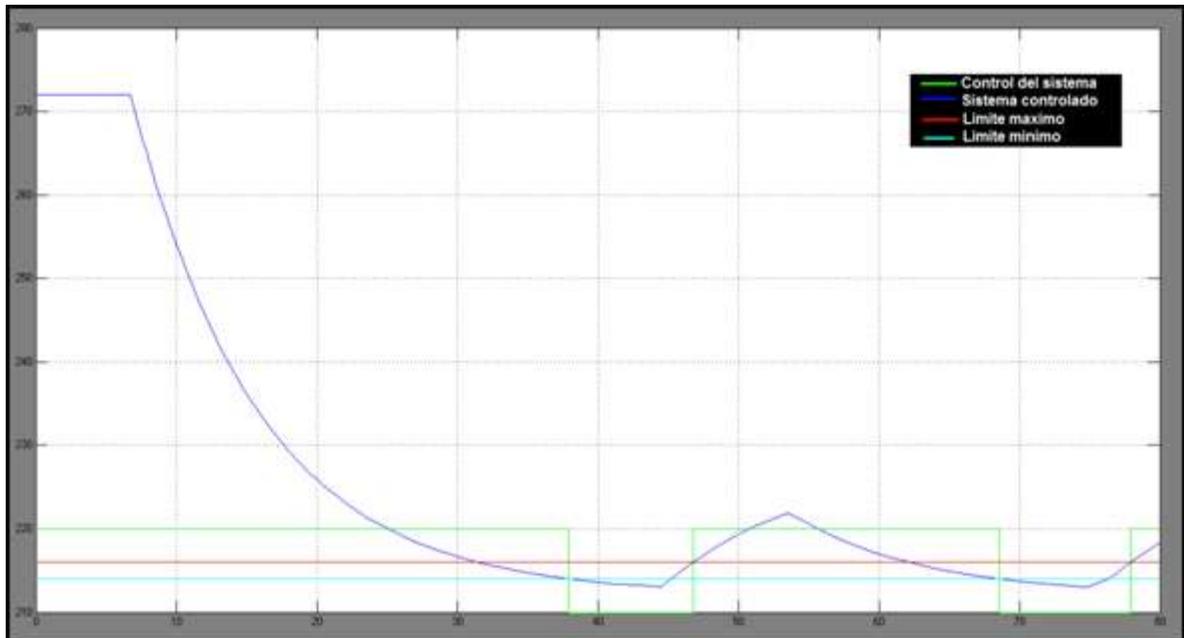


Figura 6.12 Comportamiento del control On-Off sin perturbaciones

Tabla 6.5 Comparación entre tiempos muertos de la planta del condensador

Tiempo muerto de la planta(s)	Tiempo muerto de la planta con el control On-Off(s)	Error(%)
6,75	6,575	2,59

Los valores de la tabla 6.5 tienen un error de diferencia de 2.59% lo que establece que implementar un control de este tipo tiene como característica que el cambio de estado es directamente proporcional al tiempo muerto. Esto se observa en la gráfica cuando la variable controlada sobrepasa algunos de los límites de histéresis. La desviación en el sistema no se ve inmediatamente, sino hasta que, el tiempo transcurrido sea mayor al tiempo muerto. Esto trae la consecuencia que, si se ocupara cambios realmente rápidos en la variable controlada, este tipo de control no es el más adecuado.

Al analizar la ecuación 6.1, se observa que el valor del factor de histéresis del sistema entre más cercano esté a cero, menor será la desviación de la variable controlada una vez propasada algunos de los limites de histéresis. El valor obtenido en la ecuación 6.2 fue de 0.22 psi/kW·s (este valor es bastante cercano a cero por lo que estas desviaciones son bastante aceptables).

En la gráfica de la figura 6.13, se observa el correcto funcionamiento del control On-OFF con histéresis. El sistema se mantiene igual, y solo cambiará de estado si propasa algún límite de operación diferente al anterior. Como se aprecia en la grafica de la figura 6.13, el control trabaja adecuadamente ya que ante estas perturbaciones este control no cambia de estados repentinamente, al menos que propase los límites de histéresis.

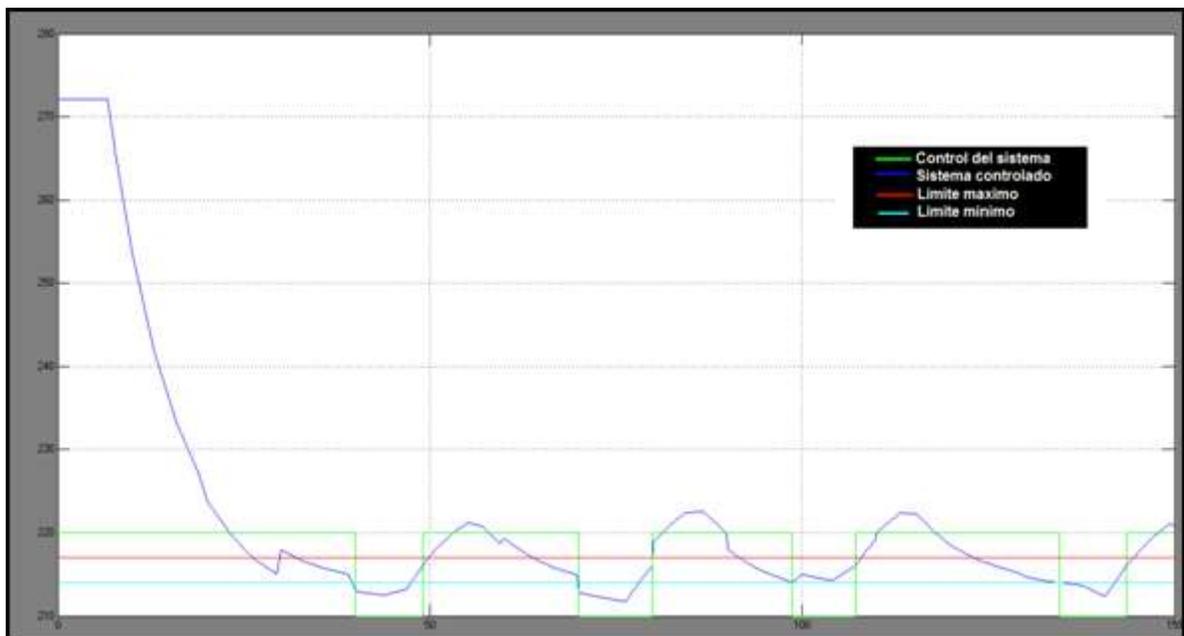


Figura 6.13 Comportamiento del control On-Off ante perturbaciones

Para la figura 6.14 se observa el comportamiento del control On-OFF. La programación diseñada en el PLC trabaja de forma correcta al comportamiento del sistema, si la presión es mayor al límite de histéresis, el sistema enciende los 4

ventiladores, y si la presión es menor, solo se mantiene con 2 encendidos. Se aprecia cómo se mantiene la histéresis del sistema y ésta solo hace el cambio cuando el sistema cambia sus límites. En la gráfica también se observa que el comportamiento de un control On-Off siempre tendrá un comportamiento oscilatorio. En la Figura 6.15 se determina el comportamiento del sistema cuando la salida propasa los límites de las alarmas. Mientras la variable no propase el sistema, se mantendrá encendido y en caso de que se propasen tanto el límite superior como el inferior todo se apagará.

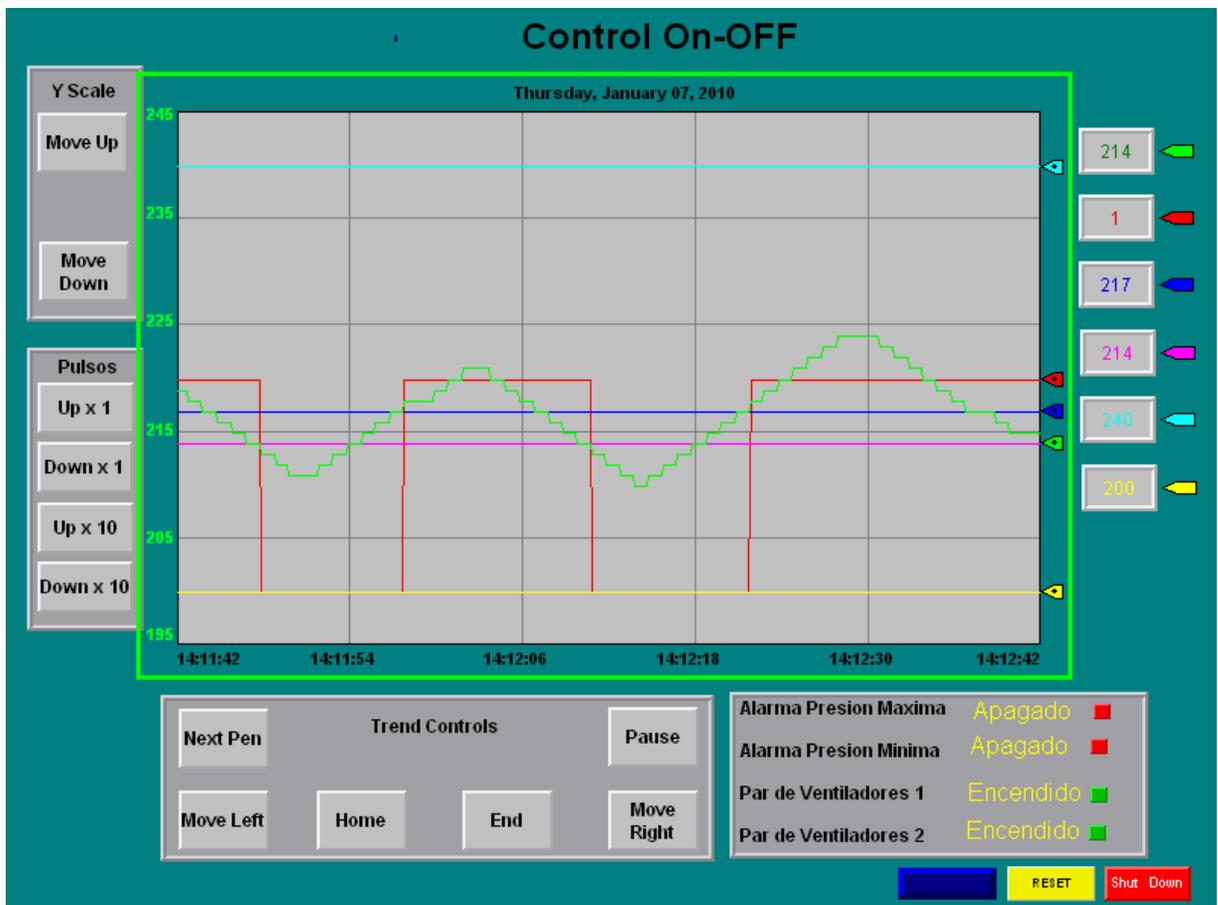


Figura 6.14 Simulación del Control On-Off con histéresis del PLC

Con las simulaciones hechas en Matlab/Simulink se puede comprobar que los diseños realizados de los controladores cumplen con las características esperadas y

logran compensar las plantas. Con lo anterior, se logra completar el objetivo de diseñar compensadores que cumplan con los requerimientos del diseño.

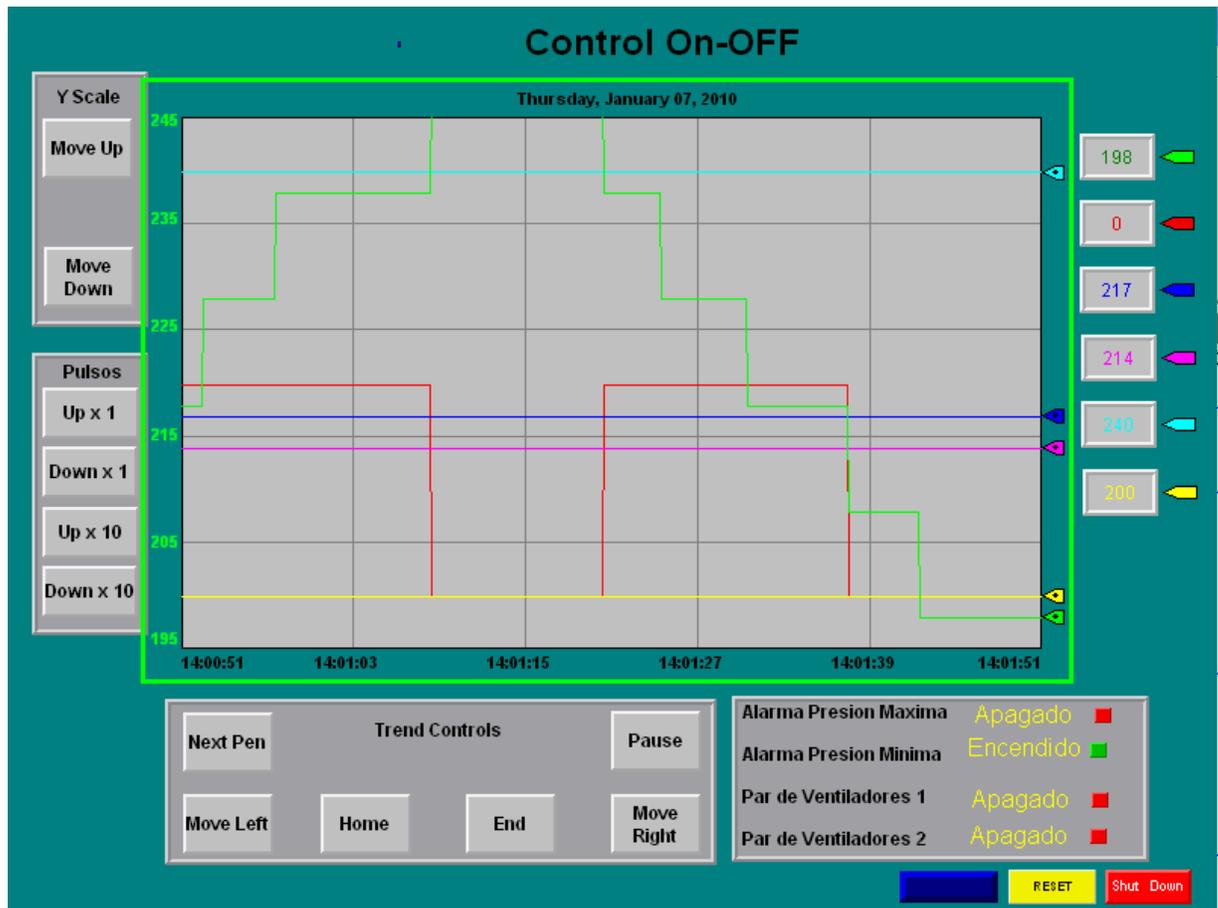


Figura 6.15 Simulación de las alarmas del Control On-Off con Histéresis del PLC

El inicio de los motores del compresor debe ser secuencial, por lo que en la figura 6.16 y en la figura 6.17, se encuentran las simulaciones realizadas para comprobar el correcto funcionamiento. En la Figura 6.16, se da el encendido de la primera bobina del compresor, y se observa que las otras bobinas del compresor 2 no se encienden hasta que el motor 1 esté encendido y pase el tiempo del encendido para el segundo. Una vez que han pasado esos tiempos y las bobinas se han conectado los motores, se encienden como se muestra en la figura 6.17.

Con el punto anterior y las simulaciones hechas en el FactoryTalk y el Control Station, se logra verificar que el funcionamiento de la programación realizada en el PLC. Por lo tanto, se logra completar un objetivo específico y el objetivo general. En el específico se logra verificar que la programación realizada cumple con requerimientos solicitados por la empresa y en el específico se logró comprobar que mediante el Control Station que el compensador hecho en el PLC sí logra compensar la salida con la planta simulada.



Figura 6.16 Simulación de encendido en los compresores con solo un motor compresor



Figura 6.17 Simulación de encendido en los compresores con solo un motor compresor

Finalmente para la verificación del último objetivo específico, el cual se refería al diseño del gabinete de control que se encuentra en los anexos A.4. con el plano diseñado se puede comprobar que éste sigue normas del NEC, las cuáles fueron analizadas, por lo tanto se lograr cumplir con este objetivo.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Un controlador PI, presentó un comportamiento satisfactorio debido a que el comportamiento de la planta es de primer orden. Los valores adecuados para el compensador son de $K_p = 9,79$ y $T_i = 11$.
- La implementación del sistema de control con PLC presento una solución eficiente para el control del chiller, debido que contaba con los módulos de entradas y salidas suficientes para el manejo de señales.
- Al Utilizar controles On-Off no se lograr mantener un error de estado estacionario constante debido a que presenta una oscilación continua.
- El tiempo muerto en una planta va impedir que un sistema con control On-Off, responda de manera rápida, en comparación con un control automático.

7.2 Recomendaciones

- Utilizar variadores de frecuencia mantiene un valor estable a la salida del condensador en los ventiladores.
- Agregar una parte derivativa al compensador para eliminar el sobreimpulso en caso que la empresa lo considere necesario.
- Colocar el valor de presión mínima mayor a 20 psi sobre 0 psi, de esta evitar que el compensador llegue a vacio provocando que deje de funcionar

Capítulo 8. Bibliografía

1. Brenes Quiros, Cesar. El financiero. **Un gallito Centenario** . [En línea] 19 de Abril de 2009. [Citado el: 5 de Setiembre de 2009.] http://www.elfinancierocr.com/ef_archivo/2009/abril/19/estilos1923535.html.
2. Castillo Nieto, Silvia. El financiero. **Gallito tras nuevos mercados**. [En línea] 23 de Julio de 2000. [Citado el: 5 de Septiembre de 2009.] http://www.elfinancierocr.com/ef_archivo/2000/julio/23/negocios1.html.
3. Quiminet.com. **Que es un Chiller**. [En línea] 14 de Diciembre de 2006. [Citado el: 4 de Septiembre de 2009.] http://www.quiminet.com/ar7/ar_%25A5%25C%2503%251F%25DE%2513%2512%259E.htm.
4. Grimm, Nils R. y Rosaler, Robert C. **Manual de diseño de calefacion, Ventilacion y aire acondicionado**. España : McGraw-Hill, 1996.
5. Havrella, Raymond A. **Fundamentos de Calefacion, ventilacion, y acondicionamiento de aire**. Mexico, D.F : McGraw-Hill, 1983.
6. Wikipedia. **Compresor (máquina)**. [En línea] 18 de Enero de 2010. [Citado el: 20 de Enero de 2010.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Compresor_\(m%C3%A1quina\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Compresor_(m%C3%A1quina)).
7. Haines, Roger W. **Sistemas de control para calefacion, ventilacion y aire acondicionado**. Barcelona : Marcombo, S.A, 1974.
8. Wikipedia. **Chlorodifluoromethane**. [En línea] 9 de Julio de 2009. [Citado el: 12 de Diciembre de 2009.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Chlorodifluoromethane>.
9. Interiano, Eduardo. **Control Automatico**. [En línea] [Citado el: 12 de Setiembre de 2009.] <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/>.
10. Smith, Carlos A. y Corripio, Armando B. **Control Automatico de Procesos**. Mexico, D.F : Limusa, 1991.
11. Johnson, Michael A. y Moradi, Hohammad H. **PID Control New Identification and Design Methods**. London : Springer, 2005.
12. **Control por realimentacion o "feedback"**. [En línea] 17 de Septiembre de 2009. [Citado el: 15 de Noviembre de 2009.] http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~con2/CapituloIII_parte1.pdf.
13. Sistemas de control Automatico. **El controlador On-Off (si-no o todo y nada)**. [En línea] [Citado el: 17 de Noviembre de 2009.] <http://168.243.3.2/Academia/Laboratorios/electronica/Sistemas%20de%20Control%20Automatico/guia4CA.pdf>.

Capítulo 9. Apéndices

A.1 Glosario

Allen Bradley: Compañía productora de PLC

Chilled water: enfriador de agua

Compensador: elemento seleccionado para corregir el comportamiento dinámico

Control Station: software de procesos de control para análisis, ajuste y aprendizaje.

CPU: unidad central de procesamiento

gpm: galones por minuto

HART: protocolo de comunicación maestro-esclavo utilizado a nivel industrial

Histéresis: es la tendencia a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generad

HMI: *Interfaz de usuario por sus siglas en idioma inglés, (Human Machine Interface) que se usa para referirse a la interacción entre humanos y máquinas*

HVAC: *Calentamiento, ventilación y acondicionamiento de aire*

MATLAB: *MATrix LABoratory es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (Lenguaje M)*

NEC: National Electric Code

OPC: *(OLE for Process Control) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos*

PID: *Proporcional-Integral-Derivativo*

PLC: *Controlador lógico Programable*

SCADA: *Control, supervisión y adquisición de datos.*

SCP: Scale with Parameters

UMA: manejadora de aire

A.2 Tabla de respuesta ante una entrada escalón

Tabla A.2.1 Valores obtenidos en el condensador ante una entrada escalón de 4.8 KW

Tiempo(s)	Presión(psi)	Tiempo(s)	Presión(psi)	Tiempo(s)	Presión(psi)	Tiempo(s)	Presión(psi)
0	272	22,5	222	45	212	68	212
0,5	272	23	222	45,5	212	68,5	212
1	272	23,5	221	46	212	69	212
1,5	272	24	221	46,5	212	69,5	212
2	272	24,5	220	47	212	70	212
2,5	272	25	220	47,5	212	70,5	212
3	272	25,5	219	48	212	71	212
3,5	272	26	219	48,5	212	71,5	212
4	272	26,5	218	49	212	72	212
4,5	272	27	218	49,5	212	72,5	212
5	272	27,5	218	50	212	73	212
5,5	272	28	217	50,5	212	73,5	212
6	272	28,5	217	51	212	74	212
6,5	272	29	217	51,5	212	74,5	212
7	272	29,5	216	52	212	75	212
7,5	267	30	216	52,5	212	75,5	212
8	264	30,5	216	53	212	76	212
8,5	260	31	216	53,5	212	76,5	212
9	259	31,5	215	54	212	77	212
9,5	256	32	215	54,5	212	77,5	212
10	253	32,5	215	55	212	78	212
10,5	251	33	215	55,5	212	78,5	212
11	250	33,5	215	56	212	79	212
11,5	248	34	214	56,5	212	79,5	212
12	246	34,5	214	57	212	80	212
12,5	244	35	214	57,5	212	80,5	212
13	242	35,5	214	58	212	81	212
13,5	240	36	214	58,5	212	81,5	212
14	239	36,5	214	59	212	82	212
14,5	237	37	214	59,5	212	82,5	212
15	236	37,5	213	60	212	83	212
15,5	235	38	213	60,5	212	83,5	212
16	233	38,5	213	61	212	84	212
16,5	232	39	213	61,5	212	84,5	212
17	231	39,5	213	62	212	85	212
17,5	230	40	213	62,5	212	85,5	212
18	229	40,5	213	63,5	212	86	212
18,5	228	41	213	64	212	86,5	212
19	227	41,5	213	64,5	212	87	212
19,5	226	42	213	65	212	87,5	212
20	225	42,5	213	65,5	212	88	212
20,5	225	43	213	66	212	88,5	212
21	224	43,5	213	66,5	212	90	212
21,5	223	44	212	67	212	90,5	212
22	223	44,5	212	67,5	212	91	212

Tabla A.2.2 Valores obtenidos en el evaporador ante una entrada escalón de 60 lbm/h

Tiempo(s)	Temp(°C)	Tiempo(s)	Temp(°C)	Tiempo(s)	Temp(°C)	Tiempo(s)	Temp(°C)
0	26,53	22,5	6,78	45	4,87	68	4,71
0,5	26,42	23	6,67	45,5	4,87	68,5	4,71
1	26,3	23,5	6,56	46	4,87	69	4,71
1,5	25,6	24	6,46	46,5	4,87	69,5	4,71
2	24,47	24,5	6,37	47	4,85	70	4,71
2,5	23,41	25	6,28	47,5	4,85	70,5	4,71
3	22,51	25,5	6,2	48	4,85	71	4,71
3,5	21,46	26	6,12	48,5	4,85	71,5	4,71
4	20,57	26,5	6,04	49	4,82	72	4,71
4,5	19,72	27	5,97	49,5	4,82	72,5	4,71
5	18,92	27,5	5,9	50	4,82	73	4,71
5,5	18,16	28	5,84	50,5	4,82	73,5	4,71
6	17,44	28,5	5,78	51	4,82	74	4,71
6,5	16,76	29	5,72	51,5	4,8	74,5	4,71
7	16,11	29,5	5,67	52	4,8	75	4,71
7,5	15,5	30	5,62	52,5	4,8	75,5	4,71
8	14,92	30,5	5,57	53	4,8	76	4,71
8,5	14,38	31	5,52	53,5	4,8	76,5	4,71
9	13,86	31,5	5,48	54	4,8	77	4,71
9,5	13,37	32	5,44	54,5	4,8	77,5	4,71
10	12,91	32,5	5,4	55	4,8	78	4,71
10,5	12,47	33	5,36	55,5	4,8	78,5	4,71
11	12,05	33,5	5,33	56	4,8	79	4,71
11,5	11,66	34	5,29	56,5	4,8	79,5	4,71
12	11,29	34,5	5,26	57	4,8	80	4,71
12,5	10,93	35	5,23	57,5	4,8	80,5	4,71
13	10,6	35,5	5,2	58	4,74	81	4,71
13,5	10,29	36	5,18	58,5	4,74	81,5	4,71
14	9,99	36,5	5,15	59	4,74	82	4,71
14,5	9,7	37	5,13	59,5	4,74	82,5	4,71
15	9,44	37,5	5,11	60	4,74	83	4,71
15,5	9,18	38	5,08	60,5	4,74	83,5	4,71
16	8,94	38,5	5,05	61	4,74	84	4,71
16,5	8,72	39	5,04	61,5	4,74	84,5	4,71
17	8,5	39,5	5,03	62	4,74	85	4,71
17,5	8,3	40	5,01	62,5	4,74	85,5	4,71
18	8,11	40,5	4,99	63,5	4,71	86	4,71
18,5	7,92	41	4,98	64	4,71	86,5	4,71
19	7,75	41,5	4,96	64,5	4,71	87	4,71
19,5	7,59	42	4,95	65	4,71	87,5	4,71
20	7,44	42,5	4,94	65,5	4,71	88	4,71
20,5	7,29	43	4,92	66	4,71	88,5	4,71
21	7,15	43,5	4,91	66,5	4,71	90	4,71
21,5	7,02	44	4,9	67	4,71	90,5	4,71
22	6,9	44,5	4,89	67,5	4,71	91	4,71

A.3 Información sobre la empresa/institución

A lo largo de más de 12 años la División de Automatización de empresa ELVATRON S.A desarrolló una variedad interesante de proyectos diferentes, uniendo para tal fin, tecnologías y marcas de clase mundial, con el aporte de ingeniería netamente nacional.

A partir de Octubre de 2004, todo este conocimiento, personal y metodología de trabajo está disponible bajo una nueva compañía denominada SISTEMAS IQ, S.A, cuya misión es el suministro de servicios de Ingeniería en el campo de la automatización, control y proyectos llave en mano.

Los datos de esta empresa, incluyendo los proyectos realizados bajo la razón social de Elvatron S.A. son:

Capital: Costarricense

Número de empleados: 27

Personal Técnico: 90%

Áreas operativas: Integración de sistemas, servicio técnico y entrenamiento.

Especialidad: Integrar sistemas de control e instrumentación electrónicos en maquinaria de manufactura ó industria de proceso, utilizando tecnología de avanzada en el campo de automatización, con desarrollo de ingeniería a nivel local, respetando normas de calidad y seguridad internacionales, y desarrollando paquetes completos "llave en mano" con calidad mundial a costos razonables.

Mercado de trabajo: Industrias de manufactura y proceso como Tabaco, Edificios Inteligentes, Llantas y Hule, Alimentos y Bebidas, Petróleo, Cemento y Generación Eléctrica.

A.4 Planos eléctricos



SISTEMAS IQ
INTEGRACION DE SISTEMAS
TEL. (508) 242-9930, FAX. (508) 290-8475
Email: www.sistemas-iq.com, SAN JOSE, COSTA RICA

PROYECTO: #2799-09

KRAFT FOODS

– SISTEMA CONTROL DEL CHILLER TRANE 80 –

TABLA DE CONTENIDO

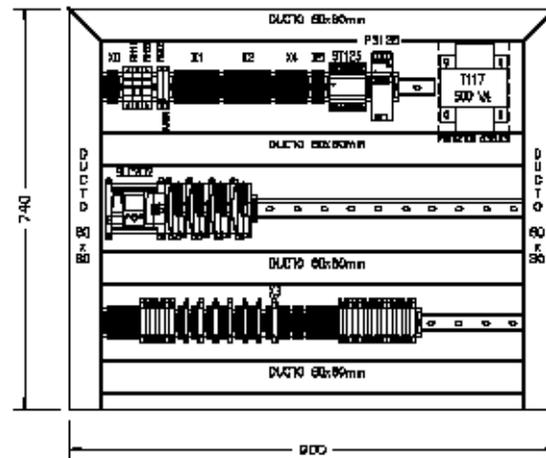
<u>DESCRIPCION</u>	<u>CANTIDAD DE HOJAS</u>
– DISPOSICION DE EQUIPO _____	1
– LISTA DE EQUIPO _____	2
– DIAGRAMAS ELECTRICOS _____	3

NOVIEMBRE 2009

FILE: 071109/TABLA-CONTENIDO

480VAC, 600

YISTA FRONTAL



NOTAS:

- 1- MEDIDAS EN mm. SALVO INDICACION
- 2- ESCALA= 1:10



INTEGRACION DE SISTEMAS
TEL. (02) 342-3930. FAX. (02) 330-0473
E-mail: info@intemas-iq.com, SIQ@IQ.COM, COTA@IQ.COM

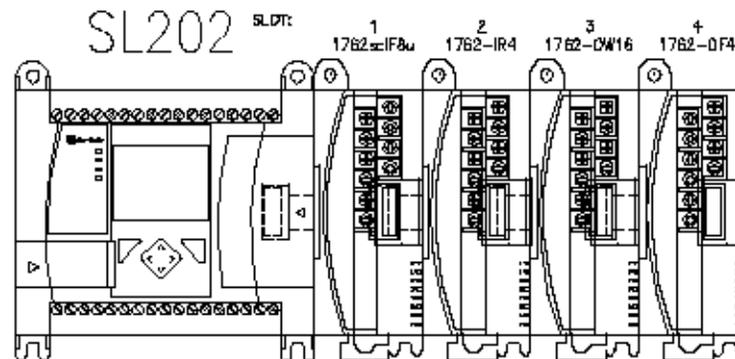
REV.	FECHA	APROBADO

CLIENTE: KRAET FOODS
PROYECTO: 2799-09
DESCRIPCION DE LA PARRA: DISPOSICION DE EQUIPO

INSTALACION:	PLANTA
LOCALIZACION:	PLANTA
PAG: 1	DE: 1

FILE: 2799-09/DE-1

DISTRIBUCION DEL MICROLOGIX 1100




SISTEMAS SQ
 INTEGRACION DE SISTEMAS
 TEL. (504) 342-9930. FAX. (504) 330-0473
 www.sistemas-sq.com, SBN, ASES, CIBTA, NICA

REV.	FECHA	APROB.

CLIENTE: KRAFT FOODS
 PROYECTO: 2799-09
 DESCRIPCION DE LA PARRA: DISTRIBUCION DEL
 MICROLOGIX 1100

INSTALACION:	PLANTA
LOCALIZACION:	PLANTA
PAG:	DE:
1	1

FILE: 071109/d-MICROLOGIX

LISTA DE MATERIALES

POS.	NOMBRE	Nº. DE PARTE	DESCRIPCION	FABRICANTE
01	SLC202	1763-L1B4WA	MICROLOGIX 1100	A-B
02	SLC401	1762ac-FB4	MODULO DE 8 ENTRADAS ANALOGICAS	SPECTRUM
03	SLC508	1762-IR4	MODULO DE 4 ENTRADAS A RTD	A-B
04	SLOC901	1762-DW1B	MODULO DE 16 SALIDAS A RELE	A-B
05	X0	1492-J3	BORNE 2.5mm GRIS (2x)	A-B
06		1492-J3-G	BORNE DE TIERRA 2.5mm (1x)	A-B
07	X1	1492-J3-RE	BORNE 2.5mm ROJO (14x)	A-B
08	X2	1492-J3W	BORNE 2.5mm BLANCO (14x)	A-B
09	X3	1492-J3	BORNE 2.5mm GRIS (26x)	A-B
10		1492-JKD3	BORNE 2.5mm, DESCONEXION (8x)	A-B
11		1492-J3-G	BORNE 2.5mm, TERRA (12x)	A-B
12		1492-H6	BORNE PORTAFUSIBLE(30x)	A-B
13		..	FUSIBLE VIDRIO, 1A, 240 (30x)	..
14	X4	1492-J3B	BORNE 2.5mm AZUL (10x)	A-B
15	X5	1492-J3-G	BORNE 2.5mm. TERRA (3x)	A-B
16	FU206	1492-H6	BORNE PORTAFUSIBLE (1x)	A-B
17		..	FUSIBLE VIDRIO, 2A, 240 (1x)
18	FU210	1492-H6	BORNE PORTAFUSIBLE (1x)	A-B
19		..	FUSIBLE VIDRIO, 3A, 240 (1x)
20	FL404	1492-H6	BORNE PORTAFUSIBLE (1x)	A-B
21		..	FUSIBLE VIDRIO, 1A, 240 (1x)
22	FU115	CHM20	BASE PORTAFUSIBLE MODULAR, 2 POLOS, 10x38	BUSSMANN
23		FUS10X38-2A	FUSIBLE 10X38, 2A (2x)
24	FU125	CHM10	BASE PORTAFUSIBLE MODULAR, 2 POLOS, 10x38	BUSSMANN
25		FUS10X38-2A	FUSIBLE 10X38, 2A (2x)
26	PS128	160BKL600	AC/DC DINRAIL MOUNT COMPACT POWER SUPPLY, 60W	A-B
27		100-DR1	RIEL DIN, HIERRO, 1Mt, (3x)	A-B
28		1492-EA35	FINAL PEQUEÑO PARA 1492 (...x)	A-B
29		1492-EBU3	TAPA FINAL/SEPARADOR DE 2.6MM A 10MM P/1492 (...x)	A-B
30		DEKAFK 5 PW 1-50	NUMERACION PARA BORNES 10 TIRAS DEL 1 AL 50, WDU 2.5	WEIDMUELLER
31		1492-CJ510	JUMPER BAR PARA 10 BORNES 2.5mm2, (...x)	A-B
32		DUCTO 60X80	DUCTO PLASTICO DE 60x80mm, 2 Mts. LARGO (3x)	LEGRAND
33		102/30	TUBITO PLASTICO 100 UDS., 14-16 AWG, 30mm	GRAFOPLAST
34		102/15	TUBITO PLASTICO 100 UDS., 14-16 AWG, 15mm	GRAFOPLAST
35		140/15	100UDS. ETIQUETAS ADHESIVAS	GRAFOPLAST
36		117M	TIRITAS DE 24u. PARA ROTULACION DE CABLES	GRAFOPLAST
37		H05V-K-1X1R	TOP CABLE FLEXIBLE, EQUIVALENTE A 18AWG, 1mm2, ROJO	SIESA
38		H05V-K-1X1B	TOP CABLE FLEXIBLE, EQUIVALENTE A 18AWG, 1mm2, BLANCO	SIESA
39		H05V-K-1X1A	TOP CABLE FLEXIBLE, EQUIVALENTE A 18AWG, 1mm2, AZUL	SIESA
40		H05V-K-1X1AV	TOP CABLE FLEXIBLE, EQUIVALENTE A 18AWG, 1mm2, AMAR./VERDE	SIESA
41	SLC711	1762-DF4	MODULO DE 4 SALIDAS ANALOGICAS	A-B

RLE: 071100/L-EQUIPOS



	NOMBRE	FECHA
DIBUJO:	CAmergor	15/11/09
APROBADO:	Inq.A.Nuñilo	15/11/09
REV.	FECHA	APROBADO

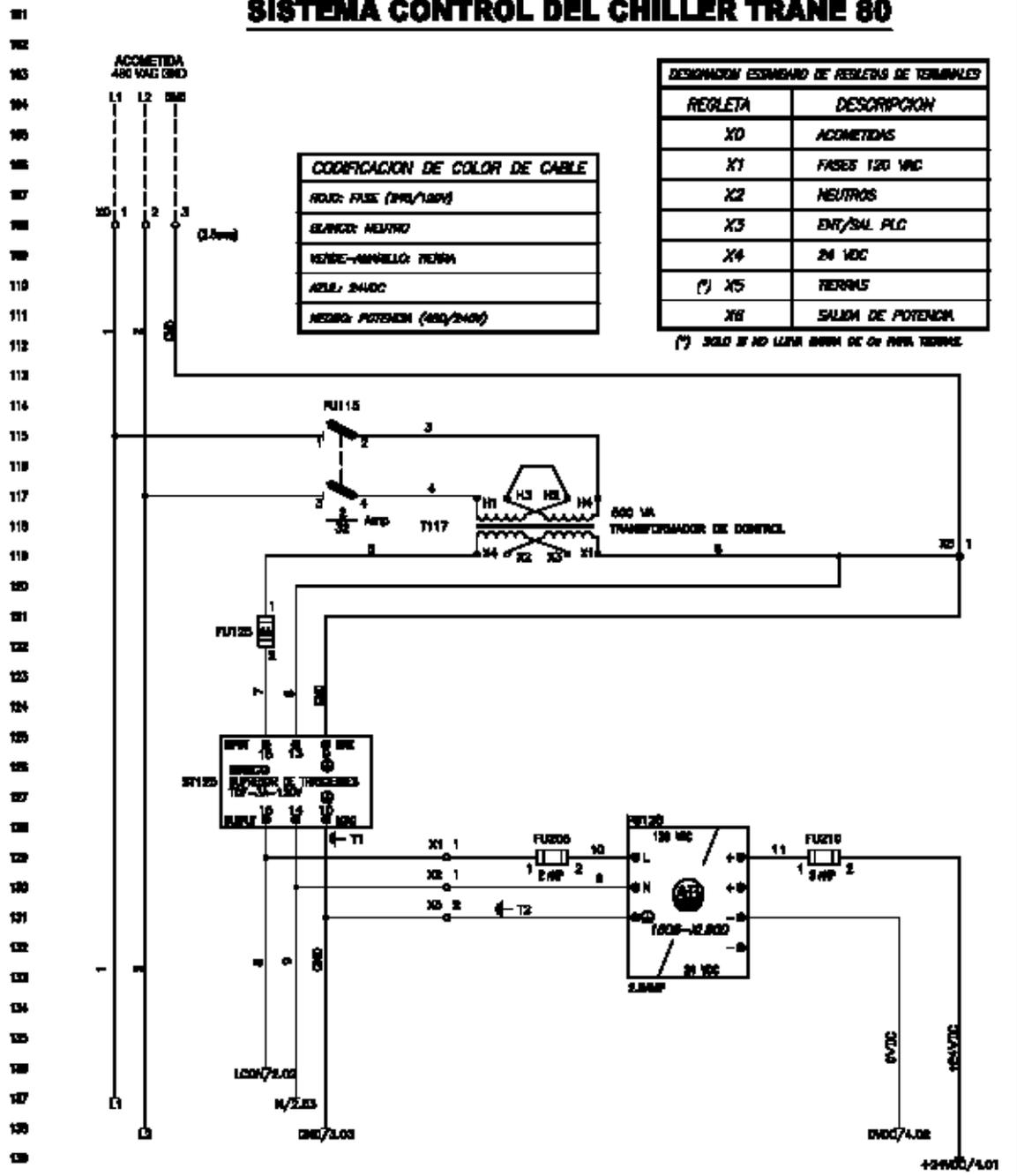
CLIENTE: KRAFT FOODS

PROYECTO: 2799-09

DESCRIPCION DE LA PAGINA: LISTA DE MATERIALES

INSTALACION:	PLANTA
LOCALIZACION:	PLANTA
PAG:	DE:
1	1

SISTEMA CONTROL DEL CHILLER TRANE 80

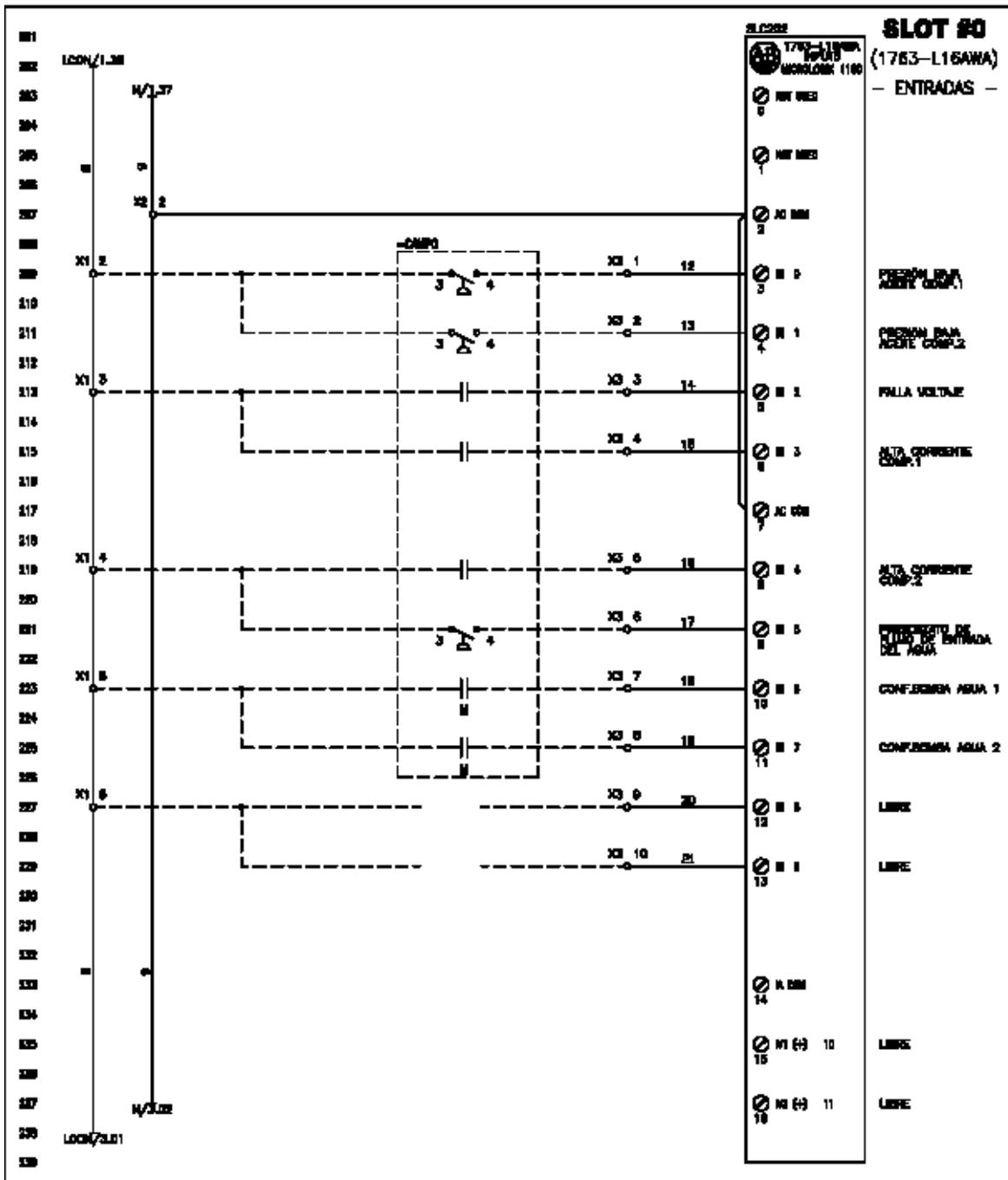


CODIFICACION DE COLOR DE CABLE	
ROJO:	FASE (3PH/480V)
BLANCO:	NEUTRO
VERDE-AMARILLO:	TERRA
AZUL:	24VDC
NEGRO:	POTENCIA (240V/240V)

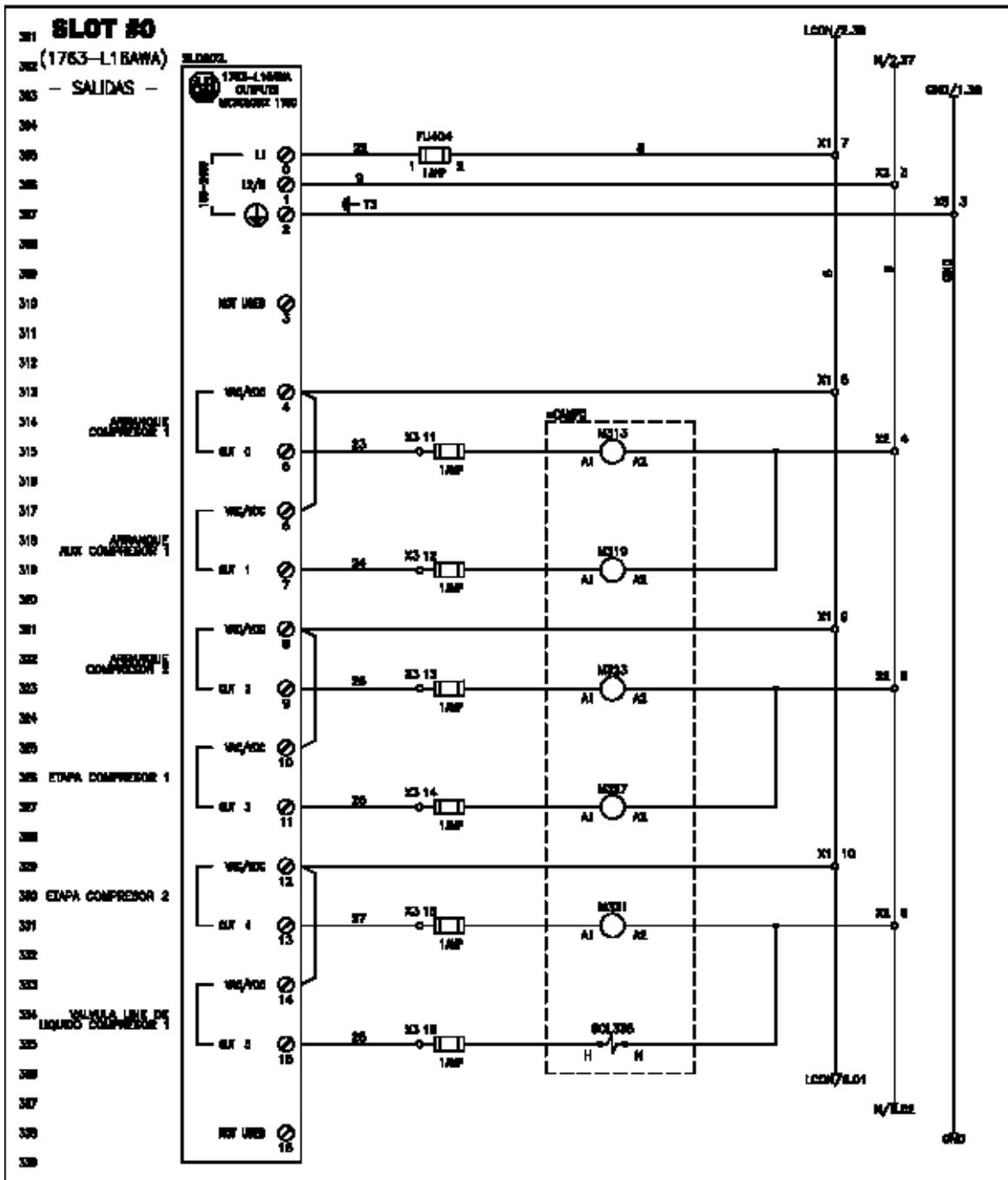
DENOMINACION ESTANDAR DE REGLETA DE TERMINALES	
REGLETA	DESCRIPCION
X0	ACOMETIDAS
X1	FASES 120 VAC
X2	NEUTROS
X3	ENT/SAL. PLC
X4	24 VDC
(*) X5	TERRAS
X6	SALIDA DE POTENCIA

(*) SOLO SI NO LLEVA BARRA DE ORO PARA TIERRAS

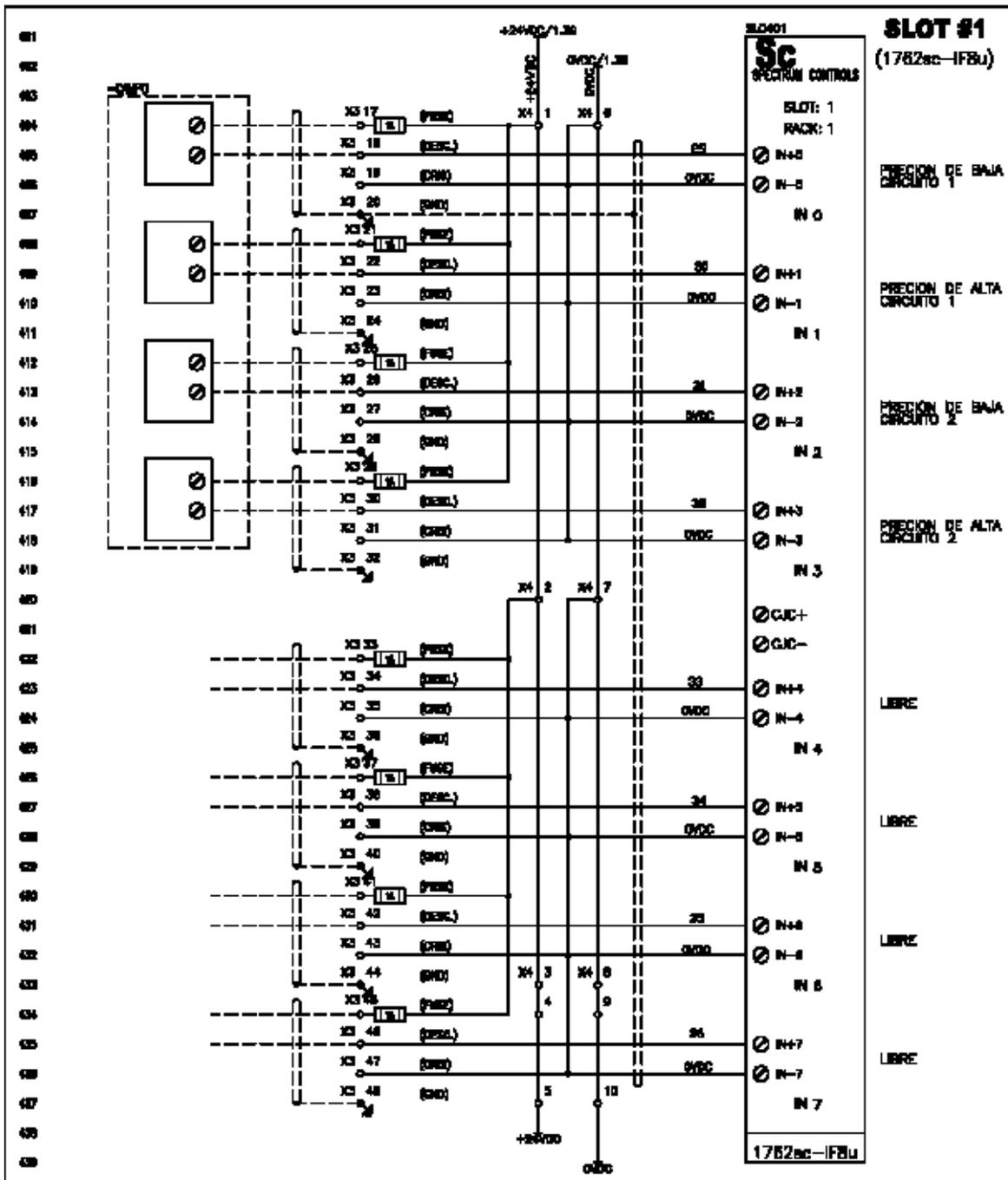
 SISTEMAS IQ SISTEMAS DE ENERGIAS TEL. (505) 242-4026, FAX (505) 242-0478 Email: sio@siosistemas-iq.com, SIO IQ, CORP. INC.	NOMBRE: _____ DISEÑO: C. Mosquera APROBADO: Ing. A. Marín	FECHA: 15/11/09 15/11/09	CLIENTE: KRAFT FOODS PROYECTO: 2799-09	INSTALACION: PLANTA LOCALIZACION: PLANTA	
	DESCRIPCION DE LA PAGINA: ACOMETA FERRONIL			PAG: 1 / DE: 7	
	REV. _____	FECHA _____	APROBADO _____		
	REV. _____	FECHA _____	APROBADO _____		



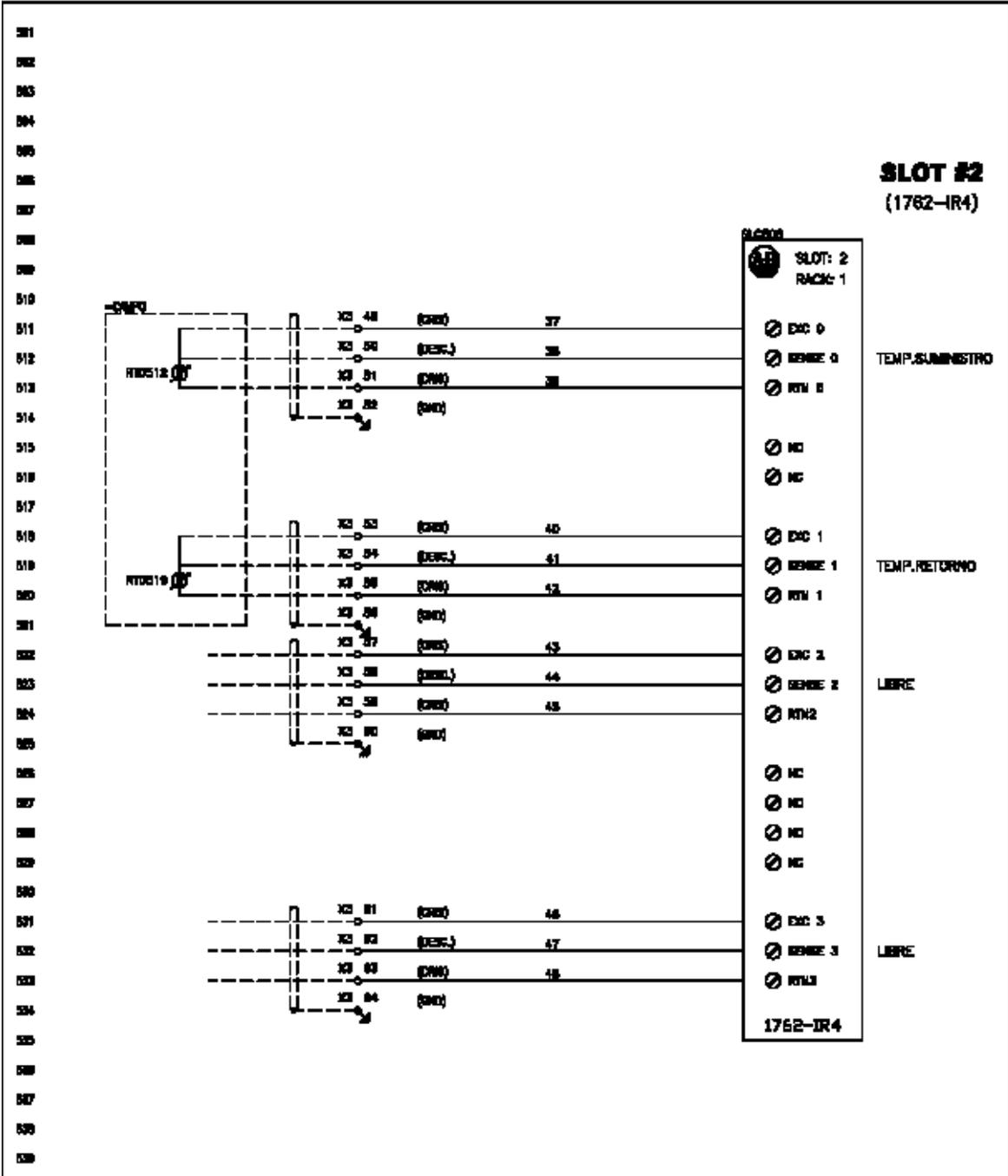
 <p>SISTEMAS IQ SISTEMAS DE EMERGENCIAS TEL. (505) 242-4026, FAX (505) 242-4478 Email: info@sistemas-iq.com, SA 2002, CORP. MEX</p>	<table border="1"> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FECHA</th> </tr> <tr> <td>DESEÑO: C. Amador</td> <td>15/11/09</td> </tr> <tr> <td>APROBADO: Ing. A. Marín</td> <td>15/11/09</td> </tr> <tr> <td>REV. FECHAS</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REV.</td> <td>FECHA</td> <td>APROBADO</td> </tr> </table>	NOMBRE	FECHA	DESEÑO: C. Amador	15/11/09	APROBADO: Ing. A. Marín	15/11/09	REV. FECHAS		REV.	FECHA	APROBADO	CLIENTE: KRAFT FOODS PROYECTO: 2799-09 DESCRIPCION DE LA PAGINA: MERLOCOM 1800 CON 10 ENTRADAS DIGITALES A 120V Y 11 ENTRADAS ANALOGICAS A SALIDA A RELE	INSTALACION: PLANTA LOCALIZACION: PLANTA FAG: 2 / DE: 7
	NOMBRE	FECHA												
	DESEÑO: C. Amador	15/11/09												
	APROBADO: Ing. A. Marín	15/11/09												
REV. FECHAS														
REV.	FECHA	APROBADO												



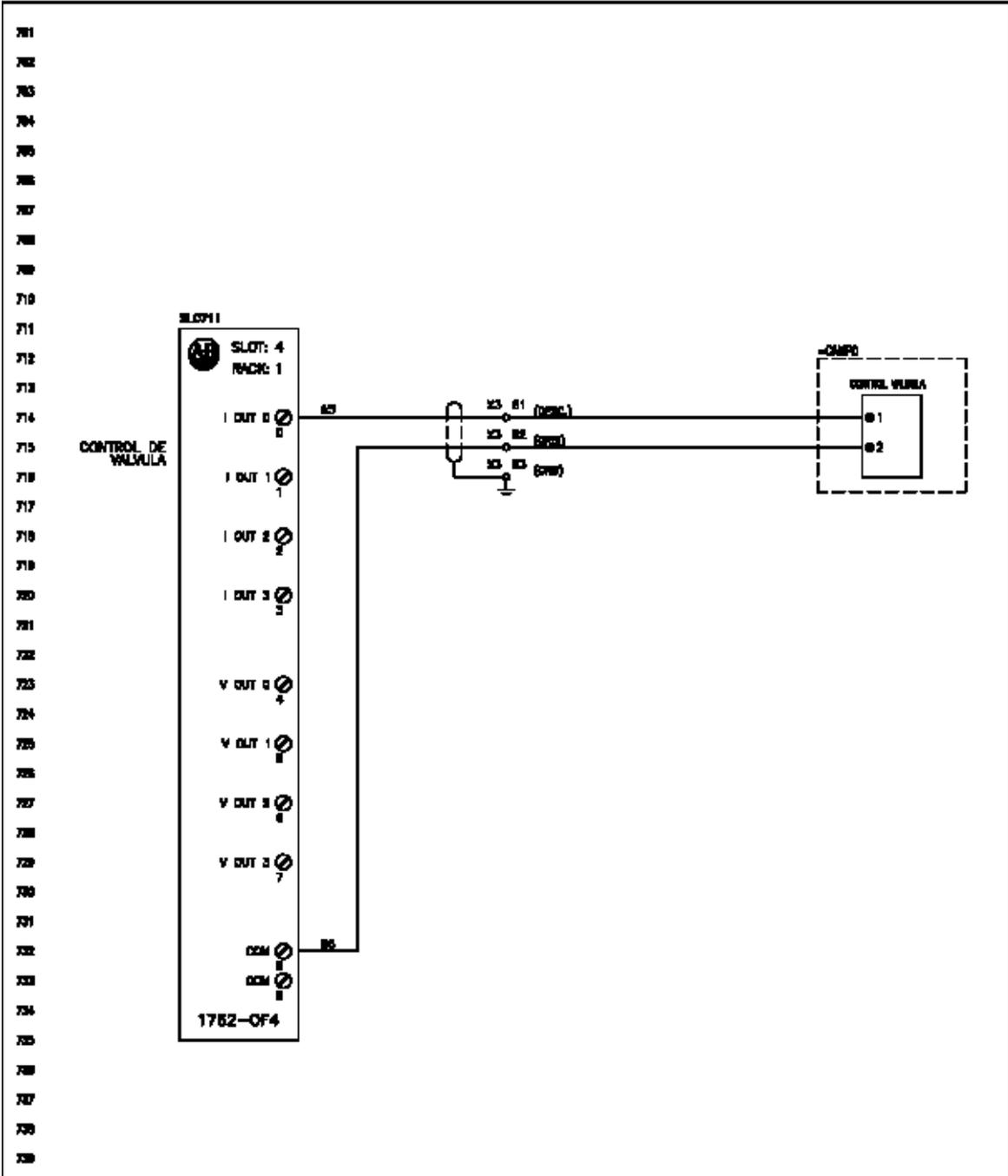
<p>SISTEMAS IQ ENTONCES DE ENERGIA TEL. (046) 240-4024, FAX (046) 240-4478 Email: www.sistemas-iq.com, SA 200, CARR 90A</p>	<p>CLIENTE: KRAFT FOODS</p>	<p>INSTALACION: PLANTA</p>								
	<p>PROYECTO: 2799-09</p>	<p>LOCALIZACION: PLANTA</p>								
	<p>DESCRIPCION DE LA PAGINA: MERLODOM 1800 CON 10 ENTRADAS DOBLES A 120V Y 2 ENTRADAS ANALOGICAS SALIDA A RELE</p>	<p>FPG: 3 / DE: 7</p>								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>REV.</th> <th>FECHA</th> <th>APROBADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	REV.	FECHA	APROBADO						
REV.	FECHA	APROBADO								



 <p>SISTEMAS IQ ESTACION DE SERVIDOR TEL. (505) 242-8426, FAX (505) 242-8428 Email: ventas@sis-q.com, SA@IQ.COM, CDS@IQ.COM</p>	NOMBRE: _____ DISEÑO: C/Margar 15/11/09 APROBADO: Ing. A. Morillo 15/11/09 REV. FECH. _____	CLIENTE: KRAFT FOODS PROYECTO: 2799-09 DESCRIPCION DE LA PAGINA: MÓDULO DE 8 ENLACES ANALÓGICOS SLOTT #1 (1752ac-IFBu)	INSTALACION: PLANTA LOCALIZACION: PLANTA PAG: 4 / DE: 7
	REV. FECH. APROBADO	DESCRIPCION DE LA PAGINA: MÓDULO DE 8 ENLACES ANALÓGICOS SLOTT #1 (1752ac-IFBu)	INSTALACION: PLANTA
	REV. FECH. APROBADO	DESCRIPCION DE LA PAGINA: MÓDULO DE 8 ENLACES ANALÓGICOS SLOTT #1 (1752ac-IFBu)	INSTALACION: PLANTA
	REV. FECH. APROBADO	DESCRIPCION DE LA PAGINA: MÓDULO DE 8 ENLACES ANALÓGICOS SLOTT #1 (1752ac-IFBu)	INSTALACION: PLANTA



 <p>SISTEMAS IQ ESTACION DE SERVIDOR TEL. (505) 242-9139, FOL. (505) 242-9478 Email: ventas@sis-q.com, SA 200, CORP. 104</p>	<table border="1"> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FECHA</th> </tr> <tr> <td>DELIC: C. Mosquera</td> <td>15/11/09</td> </tr> <tr> <td>AFICHO: Ing. A. Marín</td> <td>15/11/09</td> </tr> <tr> <td>REV. FECH.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REV.</td> <td>FECHA</td> <td>AFICHO</td> </tr> </table>	NOMBRE	FECHA	DELIC: C. Mosquera	15/11/09	AFICHO: Ing. A. Marín	15/11/09	REV. FECH.		REV.	FECHA	AFICHO	CLIENTE: KRAFT FOODS PROYECTO: 2799-09 DESCRIPCION DE LA PAGINA: MÓDULO DE 4 SERVIDORES A RED SLOT #2 (1762-IR4)	INSTALACION: PLANTA LOCALIZACION: PLANTA PAG: 5 / DE: 7
	NOMBRE	FECHA												
	DELIC: C. Mosquera	15/11/09												
	AFICHO: Ing. A. Marín	15/11/09												
REV. FECH.														
REV.	FECHA	AFICHO												



 SISTEMAS IO SISTEMAS DE EMERGENCIAS TEL. (505) 5240-9034, FAX (505) 5240-9035 www.sistemas-io.com, SAN JOSE, COSTA RICA		NOMBRE	FECHA	CLIENTE: KRAFT FOODS	INSTALACION:
	DELLA:	C/Moraga	15/11/09		PLANTA
	AFICHO:		15/11/09	PROYECTO: 2799-09	LOCALIZACION:
	REV. FE-				PLANTA
	REV.	FECHA	AFICHO	DESCRIPCION DE LA PAGINA: MÓDULO DE 4 SALIDAS ANALÓGICAS SLOV4 (1762-OF4)	FAG:
				7	7

A.5 Hojas de datos



PRESSURE

STAINLESS STEEL PRESSURE TRANSMITTER PSS2 SERIES

DESCRIPTION

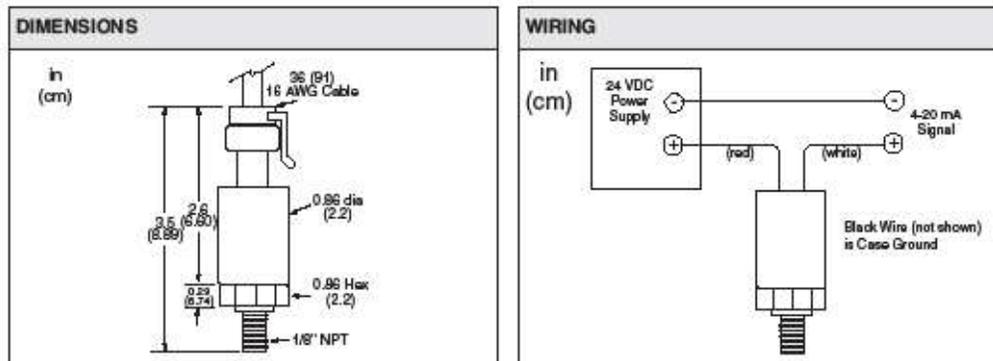
The Kele PSS2 Series Stainless Steel Pressure Transmitter is highly accurate and compact, which makes it ideal for HVAC, building automation, and process gauge pressure applications. A splash-proof, Packard-type electrical connector is provided for ease of installation. Eleven standard ranges are available for a wide variety of applications.

FEATURES

- *Splash-proof, plug-in electrical connector*
- *For steam, water, glycol, refrigerant, and more*
- *4-20 mA output*
- *304L/316L stainless steel wetted parts*
- *Wide range of pressures*
- *High overpressure capability*



SPECIFICATIONS	
Supply voltage	8-30 VDC
Accuracy	
Models \geq 75 psi	<0.5% of span
Models \leq 50 psi	<1.0% of span
Thermal effects	-40° to 221°F (-40° to 105°C), <0.5% FS
Stability (one year)	<0.25% of span
Response time	<1 ms
Output	
Signal	4-20 mA
Max load	800 Ω @ 24 VDC
Overpressure	
Proof	3x range
Burst	5x range
Operating temp	-40° to 221°F (-40° to 105°C)
Wetted parts	304L/316L stainless steel
Connections	
Pressure	1/8" MNPT, 316 stainless steel
Electrical	Splash-proof Packard connector, 16 AWG cable, 36" length
Enclosure dimensions	5.11"H x 5.11"W x 2.95"D (13.0 x 13.0 x 7.5 cm)
Weight	4.4 oz (125 g) with 36" cable
Warranty	1 year



TRAE+ Series

Thermal Expansion Valves

The TRAE Plus series is a large capacity valve designed for refrigeration, air conditioning, heat pump, and chiller applications.

Features

- Stainless steel power element eliminates corrosion and prevents valve failure
- Suitable for Bi-Flow applications
- Replaceable power element and cage assembly for full serviceability
- Double balanced port design improves operation and stability over wide loads and evaporator temperature ranges
- Square body with straight-thru connections
- Solid copper connections
- External superheat adjustment
- Large diaphragm provides superior stability
- Permanent inlet strainer



Options

- Cages (For available cage kits, see page 26.)

Specifications

- Maximum working pressure: 250 psig
- Torque Power Assembly: 375 - 425 in. lb.

Nomenclature example: TRAE+ 30 HC 10 FT 7/8 x 1 1/8 ODF S/T

TRA	E	+	30	H	C	10 FT	7/8 x 1 1/8	ODF	S/T
Valve Series	Equalizer	Replaceable Components	Capacity Nominal Rating in Tons	Refrigerant Code	Charge Code	Capillary Tube Length	Inlet x Outlet Connection Sizes	Connection Type	Configuration
Double Balanced Port Design	E=External 1/4"SAE	Cage and Power Assembly	(See nominal capacity table below)	+F = R-12 +H = R-22 +M = R-134a +N = R-407C *P = R-507 *R = R-502 *S = R-404A	C = medium temp CA = heat pump W(MOP) = press. limiting Z = low temp	10 FT (std)	5/8 x 7/8 7/8 x 1 1/8 1 1/8 x 1 1/8	ODF = solder (Only)	S/T = straight-thru (Only)

+ = R-12 and R-134a are interchangeable refrigerant charges
 * = R-507, R-502 and R-404A are interchangeable refrigerant charges
 • = R-22 and R-407C are interchangeable refrigerant charges

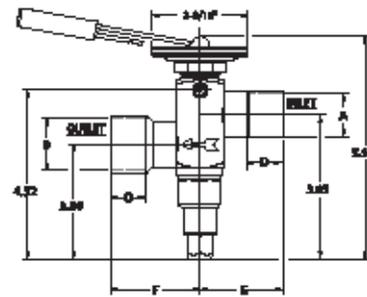
TRAE+ Series – Nominal* Capacity Table in Tons (kW)

R-12	R-134a	R-22/R-407C	R-507/R-404A/ R-502
7 1/2 (27)	9 (32)	10 (35)	8 (28)
10 (35)	13 (46)	15 (53)	12 (42)
12 (42)	14 (50)	20 (71)	14 (50)
18 (64)	22 (78)	30 (106)	20 (71)
25 (88)	30 (106)	40 (142)	30 (106)

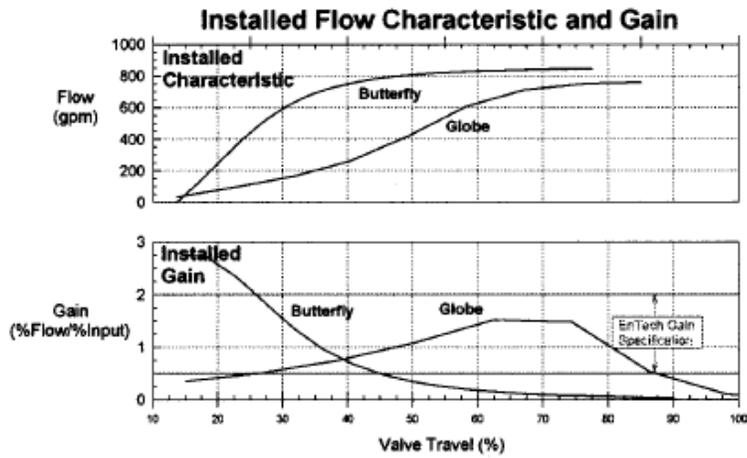
All capacities shown are at 100°F condensing, 40°F evaporator temperature.
 *See Extended Capacity Tables for ratings at a wide range of conditions per ARI standard 750.

TRAE+ Dimensional Data (in)

TRAE Valve Type	Nominal Inlet (B)	Sizes (ODF) Outlet (E)	Inlet		Inlet	
			A	C	D	F
TRAE+ 10-40 Tons	5/8	7/8	1.57	0.50	2.09	0.75
	5/8	1-1/8	1.57	0.50	2.21	0.91
	7/8	7/8	2.09	0.75	2.09	0.75
	7/8	1-3/8	2.09	0.75	2.21	0.91
	7/8	1-3/8	2.09	0.75	2.39	0.97
	1-1/8	1-1/8	2.21	0.91	2.21	0.97
1-1/8	1-3/8	2.21	0.91	2.39	0.97	



2004PC-117 (02/16)



VALVE RESPONSE TIME			
	STEP SIZE	T(d) SEC.	T63 SEC.
ENTECH SPEC. 4" VALVE SIZE			
Valve A (Fisher V150HD/1052(33)/3610J)			
VALVE ACTION / OPENING	2	0.25	0.34
VALVE ACTION / CLOSING	-2	0.50	0.74
VALVE ACTION / OPENING	5	0.16	0.26
VALVE ACTION / CLOSING	-5	0.22	0.42
VALVE ACTION / OPENING	10	0.19	0.33
VALVE ACTION / CLOSING	-10	0.23	0.46
Valve B			
VALVE ACTION / OPENING	2	5.61	7.74
VALVE ACTION / CLOSING	-2	0.46	1.67
VALVE ACTION / OPENING	5	1.14	2.31
VALVE ACTION / CLOSING	-5	1.04	2
VALVE ACTION / OPENING	10	0.42	1.14
VALVE ACTION / CLOSING	-10	0.41	1.14
Valve C			
VALVE ACTION / OPENING	2	4.4	5.49
VALVE ACTION / CLOSING	-2	NR	NR
VALVE ACTION / OPENING	5	5.58	7.06
VALVE ACTION / CLOSING	-5	2.16	3.9
VALVE ACTION / OPENING	10	0.69	1.63
VALVE ACTION / CLOSING	-10	0.53	1.25
NR = No Response			

Especificación técnica

Sensor de temperatura con transmisor integrado para aplicaciones industriales, MBT 3560

Características



- Diseñado para su uso en entornos industriales severos, donde se necesita un equipo fiable, preciso y robusto
- Encapsulado de acero inoxidable resistente al ácido (AISI 316L)
- Señales de salida: entre 4 y 20 mA o ratiométricas
- Una amplia selección de conexiones de proceso y eléctricas
- Diseño ultracompacto
- Rango de temperaturas: -50 °C - +200°C

Pedido estándar MBT 3560

- Conexión eléctrica DIN 43650-A, Pg 9
- Tubo de protección de \varnothing 8 mm
- Elemento Pt 1000, EN 60751, Categoría B
- Conexión de proceso G1/4A

Longitud de inserción [mm]	Conexión eléctrica	Salida del transmisor	Ajuste del transmisor [C°]	Longitud de extensión [mm]	Nº de código
50	2 hilos	entre 4 y 20 mA	de 0 a 100	Ninguna	084Z4030
100				Ninguna	084Z4031
150				Ninguna	084Z4032
200				Ninguna	084Z4033
250				Ninguna	084Z4034
50	2 hilos	entre 4 y 20 mA	de 0 a 200	33	084Z4035
100				33	084Z4036
150				33	084Z4037
200				33	084Z4038
250				33	084Z4039

Vaina para el programa MBT 3560 estándar

Longitud de inserción [mm] MBT 3560	Longitud de inserción de la vaina [mm]	Conexión de proceso	Tubo de protección [mm]	Nº de código
50	37.5	G1/4	ø11	084Z7258
100	87.5			084Z7259
150	137.5			084Z7260
200	187.5			084Z7261
250	237.5			084Z7262

Datos técnicos
Especificaciones principales

Conexiones de presión	Véase página 3
Rangos de medición	Cualquier combinación entre -50°C y +200°C
Intervalo mínimo	25°C
Señales de salida	4-20 mA - ratiométricas
Conexiones eléctricas	Véase página 4

Rendimiento

Precisión	< ±0,5 % FS (tip.) < ±1 % FS (máx.)	
Tiempos de respuesta	Agua 0,2 m/s	
	$t_{90} = 10$ seg.	$t_{95} = 30$ seg.
	Aire 1 m/s	
	$t_{90} = 95$ seg.	$t_{95} = 310$ seg.
Carga máxima del tubo de protección	100 bares	

Especificaciones eléctricas

	Señal de salida nominal (protección contra cortocircuitos)	
	4-20 mA	ratiométricas
Tensión de alimentación [U], protección contra polaridad	10 a 30 V c.c.	4,75 a 8 V c.c. 5 V c.c. (Nom.)
Consumo de corriente de alimentación	–	< 4 mA a 5 V c.c.
Dependencia de la tensión de alimentación	< ±0,05% FS/ 10 V	–
Limitación de corriente	30 mA	–
Impedancia de salida	–	< 25 ohm
Carga [R.]	$R_1 < (U_1 - 10) / (0,02A)$ ohm	$R_1 > 5$ kohm a 5 V c.c.

Condiciones de trabajo

Temperatura del medio (máx. 120°C sin extensión)	entre -50°C y +200°C	
Temperatura en el equipo electrónico ¹⁾	entre -40°C y +85°C	
Rango de temperaturas de transporte	de -50°C a 85°C	
EMC - Emisión	EN 61000-6-3	
EMC - Inmunidad	EN 61000-6-2	
Resistencia vibraciones	Sinusoidal 15,9 mm-pp, 5 Hz-25Hz	
	4 g, 25 Hz - 2 kHz	IEC 60068-2-6
	Aleatoria 7,5 g _{rms} , 5Hz - 1 kHz	IEC 60068-2-34, IEC 60068-2-36
Resistencia impactos	Impacto 500 g/ 1 ms	IEC 60068-2-27
	Calda libre	IEC 60068-2-32
Encapsulado (según las conexiones eléctricas)	Véase página 4	

Características mecánicas

Materiales:	
Piezas en contacto con el medio	W.no. 1.4571 (AISI 316 Ti)
Protección	W.no. 1.4404 (AISI 316 L)
Elemento sensor de medición	Fijo
Peso (según el diseño)	entre 0,1 y 0,15 kg

¹⁾ La temperatura del equipo electrónico depende de la temperatura del medio, de la longitud de la extensión, de la temperatura ambiente y de la velocidad del aire.