



**DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN
SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE CON BOMBEO
PRIMARIO VARIABLE DE AGUA FRÍA CON CAPACIDAD DE 500
TONELADAS DE REFRIGERACIÓN PARA UNA ENTIDAD
EDUCATIVA DE EDUCACIÓN SUPERIOR**

ÁLVARO ANDRÉS TROCCOLI ESCOBAR

CODIGO. 0925425

Universidad del Valle, sede Meléndez

Facultad de Ingenierías

Escuela de Ingeniería Mecánica

Santiago de Cali, Colombia

2018



**DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN
SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE CON BOMBEO
PRIMARIO VARIABLE DE AGUA FRÍA CON CAPACIDAD DE 500
TONELADAS DE REFRIGERACIÓN PARA UNA ENTIDAD
EDUCATIVA DE EDUCACIÓN SUPERIOR**

ÁLVARO ANDRÉS TROCCOLI ESCOBAR

CÓDIGO. 0925425

Proyecto de Grado presentado como requisito para optar por el título de:

INGENIERO MECÁNICO

Director del trabajo de grado:

JOSÉ ISIDRO GARCÍA MELO, PhD.

Universidad del Valle, sede Meléndez

Facultad de Ingenierías

Escuela de Ingeniería Mecánica

Santiago de Cali, Colombia

2018

DEDICATORIA

A Dios por todas sus bendiciones, y permitirme conocer personas maravillosas durante mi formación profesional.

A mi abuela Nelly por su apoyo incondicional durante todos estos años de formación y cariño brindado.

A mi madre Viviana por su amor.

A mi esposa por su apoyo y cantaleta.

A todos mis maestros y amigos que durante toda la carrera aportaron a mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad del Valle por permitirme la formación profesional y a adquirir grandes amigos.

Gracias al profesor José Isidro García, por la oportunidad y confianza que tuvo en mí, por permitirme poder desarrollar éste proyecto. A todos mis compañeros, por su amistad, colaboración y consejos.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2. JUSTIFICACIÓN	12
1.3. OBJETIVOS	13
1.4.1. Objetivo general	13
1.4.2. Objetivos específicos.....	13
1.4. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	13
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor	15
2.2. Sistema de enfriamiento secundario tipo chiller	17
2.3. Depósitos térmicos	17
2.3. Modelado de sistemas empleando el lenguaje UML	18
2.3.1. Diagrama de casos de uso y su representación.....	19
2.3.2. ¿Cómo aplicar los casos de uso?	20
2.3.3. Análisis y establecimiento de los requisitos del sistema	20
2.4. Diagramas	21
2.5. Automatización	21
2.6. Sistemas centrales (agua helada).....	21
2.7. Aire acondicionado	22
2.8. Automatización industrial	23
2.9. Antecedentes de otras investigaciones.....	23
3. CARACTERIZACIÓN DE REQUERIMIENTOS FUNCIONALES.....	25
3.1. Evaluación de desempeño sistema actual	25

3.2.	Descripción del sistema propuesto	27
3.3.1.	Características de sistema de control del chiller	28
3.3.2.	Modos de operación	29
3.3.3.	Requisitos mínimos funcionales del sistema de refrigeración.	32
3.3.4.	Definición de variables a medir	34
4.	PLANTEAMIENTO DE UNA ARQUITECTURA PARA EL SISTEMA.	36
4.1.	Arquitectura del sistema	36
4.1.1.	Arquitectura electrónica	37
4.1.2.	Arquitectura mecánica	38
4.1.3.	Arquitectura comunicación.....	39
4.1.4.	Funcionalidad de cada elemento	40
4.2.	Estrategia de control.....	40
4.2.1.	Diagrama de estados.....	40
4.2.2.	Lógica de control	41
4.2.3.	Interfaz gráfica.....	52
5.	COMPONENTES DE LA ESPECIFICACIÓN PLANTEADA.	54
5.1.	Selección del chiller.	54
5.2.	Selección de otros equipos.	55
5.3.	Descripción del sistema de control.	57
6.	EVALUACIÓN DE LA ESTRATEGIA IMPLEMENTADA	60
3.3.	Mediciones del sistema anterior.....	62
3.4.	Mediciones del sistema propuesto.....	63
3.5.	Comparación de sistema anterior y propuesto.....	64
7.	CONCLUSIONES.....	66
7.1.	Conclusiones.....	66
7.2.	Trabajos futuros.....	67

8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
9.	ANEXOS	70

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: [5]	13
Ilustración 2 Componentes básicos de un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: [5].	14
Ilustración 3 Esquema de un diagrama de Caso de Uso. Fuente: [11].	18
Ilustración 4 Diagrama de casos de uso. Fuente: Autor	28
Ilustración 5. Diagrama de conexión del sistema de enfriamiento central propuesto. Fuente: Autor.	32
Ilustración 6 Esquema de distribución de áreas a refrigerar y valores de configuración (Temperatura y Caudal). Fuente: Autor.	34
Ilustración 7 Esquema general del sistema. Fuente: Autor.	35
Ilustración 8 Ampliación esquema del sistema de control, (a) vista global, (b) señales a procesar. Fuente: Autor.	36
Ilustración 9 Arquitectura electrónica. Fuente: Autor.	37
Ilustración 10 Arquitectura mecánica. Fuente: Autor.	37
Ilustración 11 Arquitectura de comunicación. Fuente: [21].	38
Ilustración 12 Diagrama de estados general del sistema de enfriamiento. Fuente: Autor.	39
Ilustración 13 Estado configuración de variables (a) sistema 1, (b) sistema 2. Fuente: Autor.	41
Ilustración 14 Alarma general. Fuente: Autor.	42
Ilustración 15 Alarma de la torre de enfriamiento. Fuente: Autor.	42
Ilustración 16 Alarma de la bomba de condensación. Fuente: Autor.	43
Ilustración 17 Alarma de la bomba de agua fría. Fuente: Autor.	43

Ilustración 18 Lógica para el cálculo de la presión. Fuente: Autor.	44
Ilustración 19 Lógica de encendido del Chiller. Fuente: Autor.	45
Ilustración 20 Lógica para el encendido de equipos. Fuente: Autor.	45
Ilustración 21 Lógica para el control de las válvulas bypass. Fuente: Autor.	46
Ilustración 22 Lógica de válvulas de aislamiento. Fuente: Autor.	46
Ilustración 23 Lógica para el control de velocidad de las bombas de agua fría. Fuente: Autor.	47
Ilustración 24 Lógica de bombas de agua fría. Fuente: Autor.	48
Ilustración 25 Lógica de bombas de condensación. Fuente: Autor.	49
Ilustración 26 Lógica de torres de enfriamiento. Fuente: Autor.	49
Ilustración 27 Lógica para el control del ventilador. Fuente: Autor.	50
Ilustración 28 Interfaz del software. 1. Entradas internas. 2. Entradas externas. 3. Lógica de control (sub-programas). 5. Salidas internas. 6. Salidas externas.	52
Ilustración 29 Interfaz gráfica, (a) Sistema de agua fría, (b) Sistema de condensación. Fuente: Autor.	53
Ilustración 30. Comparativos de eficiencias de Chillers. Fuente: Autor	53
Ilustración 31. Planta de tratamiento de agua.	58
Ilustración 32. PLC implementado	59
Ilustración 33. Bombas de agua de alimentación del ChillerY por ultimo, en Ilustración 34 se presenta el Chiller implementado.	59
Ilustración 34. Chiller instalado.	60
Ilustración 35. Comparativo energético por tonelada de refrigeración entre el sistema antiguo y el nuevo.	63

Índice de tablas

Tabla 1 Procedimiento de diseño. Fuente: Autor	11
Tabla 2 Resumen demanda. Fuente: Autor.	24
Tabla 3 Condiciones de diseño interior y exterior. Fuente: Autor	25
Tabla 4.Requerimientos mínimos necesarios para el funcionamiento del sistema de refrigeración. Fuente: Autor.	32
Tabla 5 Valores de caudal y temperatura a controlar. Fuente: Autor.	34
Tabla 6 Funcionalidad de cada elemento. Fuente: Autor.	38
Tabla 7 Tabla para el cálculo de k. Fuente: [5]	44
Tabla 8. Tabla comparativa entre Chiller de distintas marcas. Fuente: Autor	52
Tabla 9. Algunos de los componentes principales del sistema de refrigeración. Fuente: Autor	54
Tabla 10 Toma de datos sistema anterior. Fuente: Autor.	61
Tabla 11. Toma de datos sistema propuesto. Fuente: Autor	62

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Considerado variables como la temperatura, presión o humedad relativa, entre otras, se generan condiciones propicias para la elaboración de productos, o garantizar parámetros sostenibilidad para personas, lugares o maquinaria [2]. En la actualidad en este tipo de sistemas se presentan una gran variedad de aplicaciones en diversos campos de la industria.

En las ofertas de los sistemas de climatización centralizados los enfriadores de agua (chillers) son uno de los elementos frecuentemente empleados. El principio de funcionamiento de los chillers se basa en el bombeo de agua helada hacia los locales, habitaciones, oficinas, aulas, donde se desea climatizar, en los que, por medio de unidades terminales, por ejemplo, Fan-Coil, umas, minisplit, se establece intercambio de calor entre el aire del lugar y el agua helada. Posteriormente, el agua retorna hacia las unidades enfriadoras, siendo nuevamente enfriada y reenviada hacia los lugares a climatizar. Existen diversas configuraciones de unidades enfriadoras de agua dependiendo de diversos factores, tales como: las características del local a climatizar, la disponibilidad y costo del agua, así como las tarifas de energía eléctrica en el lugar de la aplicación, entre otras [1].

En el área de hábitat, uno de los principales avances tecnológicos es el diseño y construcción de edificios inteligentes, abordajes de soluciones automáticas que permiten al usuario obtener ventajas en el ahorro de energía, ajustes de variables en un menor tiempo y con mayor eficiencia [3]. Considerando el aporte en el consumo de energía que ofrecen los edificios, este abordaje se torna de interés. Por ejemplo, en los Estados Unidos, los edificios consumen más del 70% del total de la energía eléctrica generada y más del 30% del total de la energía consumida en el país [3]. Adicionalmente, estas instalaciones presentan un aporte significativo en a utilización de recursos naturales y la generación de dióxido de carbono (CO₂). En este sentido, los edificios son la principal fuente de generación de CO₂, por encima del transporte y la industria. Por ejemplo, en Estados Unidos los edificios generan un 39% del total de emisiones de CO₂ y consumen el 40% de materias primas a nivel global y 13% de agua potable, sin contar los miles de toneladas diarias de desechos que producen [3].

Los beneficios de construir un edificio de alto desempeño no sólo se reflejan en el medio ambiente y en sus ocupantes, sino también a nivel económico con ahorros a mediano y largo plazo. Según estudios del USGBC2, un edificio verde puede alcanzar ahorros en energía eléctrica entre 25 - 50%, y un 40% de ahorro en consumo de agua potable. Estos ahorros representan un aumento en el retorno de la inversión de un 6,6%, con reducción en los costos de operación de 8 - 9% [3].

En este sentido, este trabajo aborda la problemática definir una estrategia de control para un sistema de acondicionamiento de aire con bombeo primario variable de agua fría con capacidad de 500 toneladas de refrigeración adaptable a un predio inteligente de una entidad educativa de educación superior.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, los sistemas de enfriamiento, combinan avanzada tecnología de computación, comunicación, instrumentación, entre otras. En este contexto, la creciente demanda por controles de alta calidad unido a estrictos requerimientos de seguridad, para sistemas de este tipo, hace extremadamente esencial la aplicación de métodos formales en la programación de PLC's [4]. Debido a la flexibilidad estructural que presentan los actuales sistemas de enfriamiento con una arquitectura distribuida, es fundamental un claro entendimiento y planteamiento de soluciones que conduzcan a una adecuada especificación de los procesos distribuidos. De forma que aseguren el funcionamiento del sistema y eviten las graves consecuencias, económicas y de seguridad, que pueden ser originadas por una deficiente especificación. Así, mediante el planteamiento de una arquitectura que estructure los requerimientos funcionales de un sistema se pueden obtener mejores especificaciones de los procesos. Adicionalmente, se simplifica el abordaje de los problemas de diseño y el análisis del sistema desde un enfoque de integración a otros sistemas.

Este proyecto integra las actividades de una infraestructura mecánica, eléctrica e hidráulica, requeridas para la sustitución de la actual planta de enfriamiento del edificio principal de una entidad educativa de formación superior, con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema de enfriamiento reduciendo los costos asociados al consumo de energía del sistema actual.

1.3. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Diseño de una estrategia de control para un sistema de acondicionamiento de aire con bombeo primario variable de agua fría con capacidad de 500 toneladas de refrigeración para una entidad educativa de educación superior.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los requerimientos funcionales y restricciones del sistema usando técnicas de mapeo y trabajo de campo.
- Plantear una arquitectura de una solución a los requisitos planteados usando una estrategia distribuida.
- Especificar los componentes principales de la configuración planteada.
- Evaluar la estrategia implementada por medio de consumo energético por tonelada de refrigeración

1.4. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Para el desarrollo de una estrategia de control se consideró el detalle y análisis de diversos temas, que comprendieron desde la identificación del proyecto considerando sus principales impactos, como también la posibilidad de un avance tecnológico del cual se verá beneficiada la industria. Por tanto, fue de importancia, desarrollar una metodología que organizara las actividades a realizar de manera que garantice el alcance de los objetivos planteados. Tal como se expresan en los objetivos específicos, el proyecto se desarrolló así:

Tabla 1 Procedimiento de diseño. Fuente: Autor

Aplicación	Entregable	Recursos
<i>Caracterizar los requerimientos funcionales y restricciones del</i>	Ubicación espacial de los equipos que conforman la	Personal para recorrido y visualización de espacio,

<i>sistema usando técnicas de mapeo y trabajo de campo</i>	actualización del sistema, consumos eléctricos y otros	recolección de información eléctrica para equipos nuevos.
<i>Plantear una configuración de una solución a los requisitos planteados usando una estrategia distribuida</i>	Documento con la estrategia del proyecto para el cumplimiento de los requisitos del sistema	Equipos de programación computacional para el desarrollo, y pruebas de la estrategia.
<i>Especificar los componentes principales de la configuración planteada</i>	Documentación de los equipos que se seleccionaran para la reforma del sistema	Personal para la verificación y análisis de documentación de equipos, tiempo para la selección de los equipos idóneos y que cumplan con las especificaciones de espacio y consumos para el mejor funcionamiento del sistema
<i>Evaluar la estrategia implementada por medio de consumo energético por tonelada de refrigeración</i>	Documentación con todos los análisis obtenidos	Haber realizado los pasos anteriores

2. MARCO TEÓRICO

En este apartado del documento se presentan los conceptos teóricos relevantes que soportaron este proyecto de grado. Así, inicialmente, se muestran conceptos del área térmica. A continuación, se define el ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Seguidamente, se presenta el sistema de enfriamiento secundario tipo Chiller. Luego, se ilustra el concepto de depósitos térmicos. Los conceptos son los relacionados con las herramientas de modelado UML. Finalmente, se expone la metodología de modelado utilizada.

2.1. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El termino refrigeración, como parte de un sistema de climatización, usualmente se refiere a un sistema de compresión de vapor en el cual una sustancia química cambia alternativamente de líquido a gas (evaporándose, de esta mane absorbiendo calor y generando un efecto refrigerante). Este ciclo consiste en cuatro etapas, las cuales se presentan en la Ilustración 1 [5]:

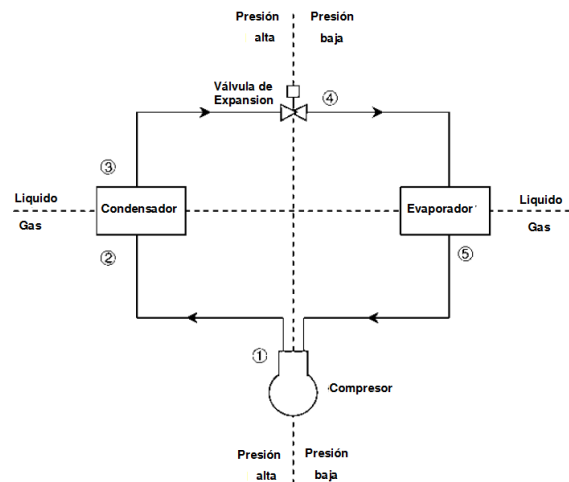


Ilustración 1 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: [5]

- **Compresión:** un gas a baja presión se comprime, al aumentar su presión consumiendo energía mecánica. Con el incremento de la presión viene un aumento de la temperatura.

- *Condensación:* el gas a alta presión y temperatura es enfriado por un aire o agua que actúan como sumidero del calor y condensando el gas manteniendo la presión alta.
- *Expansión:* el líquido a alta presión fluye a través de un orificio de una válvula de expansión, reduciendo la presión.
- *Evaporación:* el líquido a baja presión absorbe el calor de la región a refrigerar y se evapora en forma de gas o vapor. Este gas a baja presión fluye hacia el compresor y el proceso se repite.

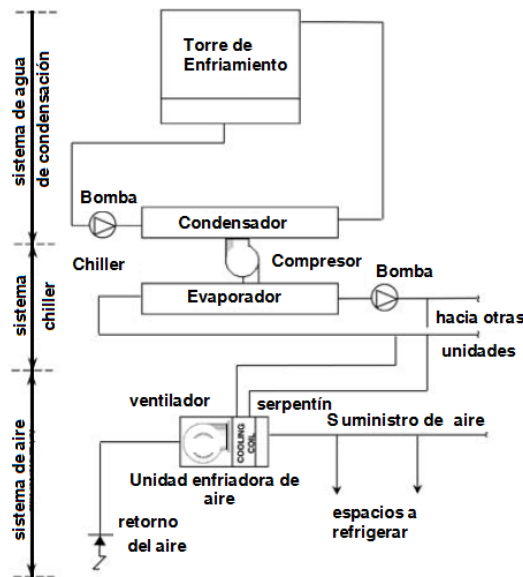


Ilustración 2 Componentes básicos de un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: [5].

Como se muestra en la Ilustración 2, el sistema de refrigeración de compresión de vapor se compone de cuatro elementos que realizan los cuatro pasos del ciclo de refrigeración. El *compresor* eleva la presión del gas refrigerante inicialmente de baja presión. El *condensador* es un intercambiador de calor que enfría el gas a alta presión para que cambie a la fase líquida. La *válvula de expansión* controla la relación de presión, y por lo tanto velocidad de flujo, entre las regiones de alta y de baja presión del sistema. El *evaporador* es un intercambiador de calor que calienta el líquido de baja presión, haciendo que el cambio de fase de líquido a vapor (gas) [5].

2.2. Sistema de enfriamiento secundario tipo chiller

Actualmente, existen dos tipos fundamentales de sistemas de refrigeración diseñados para satisfacer los requerimientos de refrigeración de edificaciones: 1) sistemas de expansión directa, en los cuales hay un intercambio directo entre el aire de la edificación y el refrigerante, y, 2) los sistemas que utilizan agua a baja temperatura como medio de intercambio del calor entre el aire circúndate y el refrigerante.

En la industria de climatización, el sistema que produce agua a baja temperatura, para fines de refrigeración, es conocido como *chiller* y consiste, en esencia, de un compresor, un evaporador y un condensador; todo contenido en una unidad cuyo medio de condensación puede ser agua o aire.

Un sistema de refrigeración tipo *chiller* está diseñado para recoger el exceso de calor de una edificación y expulsarlo al medio exterior. Este sistema puede emplear el ciclo de refrigeración por compresión de vapor o el ciclo de absorción. El calor extraído por el *chiller* debe ser expulsado a la atmosfera, esto se puede realizar empleando enfriamiento por aire, un proceso donde el calor es transferido directamente del refrigerante al aire del ambiente, o por refrigeración con agua, un proceso que emplea agua para tomar el calor del refrigerante y luego expulsarlo a la atmosfera. Los sistemas con agua ofrecen ventajas sobre los que emplean aire, incluyendo sistemas de menor tamaño, vida más prolongada y mejores eficiencias [5].

2.3. Depósitos térmicos

El objetivo de los depósitos térmicos es el almacenamiento de agua refrigerada o hielo para reducir la demanda de energía de refrigeración consumida durante períodos de alta demanda, a través del desplazamiento de consumo de energía de refrigeración a los períodos de baja demanda. Esto, reduce las cargas eléctricas, particularmente, la demanda energética.

Aparte del desplazamiento del consumo de energía de refrigeración de los períodos de alta demanda a los períodos de baja demanda, puede haber reducción en el consumo de energía de refrigeración, con energía térmica. Estos sistemas se emplean, además, para la generación de reservas de energía térmica valiéndose de agua refrigerada o hielo. Estas reservas se usan para suplir una carga de refrigeración en sistemas cuya carga nominal

sea menor que la carga en tiempos de alta demanda. Hay actualmente tres tecnologías para los sistemas de almacenamiento térmico: agua, hielo y sales eutécticas. Estas tecnologías pueden variar significativamente en términos de tamaño, eficiencia, fiabilidad y coste [5][6].

2.3. Modelado de sistemas empleando el lenguaje UML

El UML es un lenguaje de modelado compuesto por un conjunto de diagramas para especificar, visualizar, construir y documentar los procedimientos de un proceso o sistema [7]. Como un lenguaje, el UML es un medio para la comunicación. Permite comunicar sobre un tema, el sistema que se esté discutiendo, incluyendo su entorno o contexto. En cuanto a modelado, el UML permite la formulación de un modelo del sistema a partir de diferentes puntos de vista. El modelo captura un conjunto de ideas o abstracciones sobre el tema, incluida la información esencial necesaria para la comprensión del sistema y excluir cualquier información irrelevante o incidentales que puedan dificultar su comprensión.

En cuanto a las especificaciones, se usa el UML para comunicar lo que se requiere de un sistema, y cómo un sistema satisface sus requerimientos. Considerando los sistemas de visualización, se puede usar el UML para comunicar visualmente la dinámica del sistema. En relación a la implementación, podemos usar el UML para guiar la construcción del sistema físico, similar a un plano [7].

El UML lleva al diseñador a través del ciclo de vida de diseño, a partir de la descripción proporcionada por los usuarios o expertos hacia el producto final. Se conserva la convergencia y la claridad en el diseño mediante la prescripción de un conjunto de pasos que generan un modelo de evolución del sistema y facilitar el examen riguroso de este modelo. Por lo tanto, la aplicación de UML por diferentes personas con habilidades diferentes resultada en diseños finales comparables [8].

En cuanto a los sistemas de documentación, se puede usar el UML para documentar el conocimiento del sistema en todo su proceso del ciclo de vida de desarrollo en lugar de considerar la documentación como una engorrosa idea de último momento. El UML facilita especificar, visualizar, entender y documentar un problema, capturar, comunicar y utilizar

el conocimiento en la solución del problema, y especificar, visualizar, construir y documentar la solución [7].

El procedimiento de modelado UML se inicia con el estudio de los casos de uso que son descripciones escritas de cuáles son los objetivos y cómo el trabajo se lleva a cabo [9]. El estudio de los casos de uso permite al diseñador de reconocer diferentes elementos claves del sistema (objetos en UML terminología) [8]. El diagrama de casos de uso da el punto de entrada para analizar los requisitos del sistema, y el problema a solucionar [10].

2.3.1. Diagrama de casos de uso y su representación.

Los casos de uso son estructuras que ayudan a los diseñadores a trabajar en conjunto con los usuarios para determinar la forma en que se usará un sistema. Con un conjunto de casos de uso, se puede hacer un bosquejo de un sistema en términos de los que los usuarios quieren de éste [11].

Los casos de uso se pueden imaginar como una colección de situaciones respecto a la utilización de un sistema. Cada escenario describe una secuencia de eventos. Cada secuencia se inicia con una persona o sistema. A las entidades que inician secuencias se le llama actores.

La importancia de los casos de uso radica en que permiten el desarrollo de sistemas que funcionan de acuerdo con lo que demandan los usuarios, a través de la comprensión de la forma en que el sistema debería comportarse. De esta forma, permite un mejor establecimiento de los requisitos de un sistema.

En la representación, hay un actor que inicia un caso de uso y otro que recibirá algo de valor de este caso. La representación gráfica de un caso de uso es una elipse, y una figura humana representa un actor. El actor que inicia se encuentra a la izquierda del caso de uso; aquel que recibe, a la derecha. El nombre del actor aparece debajo de él. El nombre del caso de uso aparece al interior o debajo de la elipse. Un alineamiento asociativo, línea sólida, conecta un actor con el caso de uso y representa la comunicación entre el caso de uso y el actor. Se emplea un rectángulo con el nombre del sistema en algún lugar de su interior, para representar el sistema y sus confines. El rectángulo envuelve los casos de uso del

sistema. La esquematización de un diagrama de caso de uso se presenta en la Ilustración 3.



Ilustración 3 Esquema de un diagrama de Caso de Uso. Fuente: [11].

2.3.2. ¿Cómo aplicar los casos de uso?

El procedimiento general, para la aplicación de los casos de uso, sigue una secuencia de pasos detallados a continuación [11].:

Se inicia con diálogos y entrevistas a los clientes (usuarios, expertos), donde se le pedirá que indiquen todo lo que se hará con el sistema. Basándose en estas respuestas, se conformará un conjunto de necesidades a suplir por el sistema y un conjunto candidato de casos de uso. Posteriormente, es importante describir cada caso de uso y elaborar el diagrama de casos de uso. Por último, dado que cada caso de uso es una colección de escenarios y cada escenario es una secuencia de pasos, se listan cada uno de los casos de uso aclarando su contexto en el sistema, es decir:

- El actor que inicia el caso de uso
- Las condiciones previas para el inicio del caso de uso
- Pasos en el escenario
- Condiciones posteriores
- El actor que se beneficia de dicho caso de uso

2.3.3. Análisis y establecimiento de los requisitos del sistema

Los requisitos técnicos de un sistema son los parámetros necesarios durante el funcionamiento de un equipo para suplir las necesidades de los actores (usuarios). Estos parámetros se establecen a partir de un análisis de los casos de uso y las necesidades que disponen estos, es decir, cada uno de los casos de uso, se analiza desde un punto de vista técnico y se establecen los puntos de operación de los diferentes sistemas empleados para satisfacer las necesidades de los usuarios.

Estos requerimientos deben ser de un nivel de detalle suficiente para permitir a los diseñadores obtener un sistema que satisfaga esos requisitos, y a los evaluadores, probar si el sistema satisface esos requisitos. Los requerimientos de un sistema son los puntos de operación de sus componentes, que se establecen en unidades de medida de velocidad, temperatura, presión, longitud, caudal, voltaje, corriente, etc.

2.4. Diagramas

Los diagramas de estado son una técnica conocida para describir el comportamiento de un sistema. Describen todos los estados posibles en los que puede entrar un objeto particular y la manera en que cambia el estado del objeto, como resultado de los eventos que llegan a él. En la mayor parte de las técnicas orientadas a objetos, los diagramas de estado se dibujan para una sola clase, mostrando el comportamiento de un solo objeto durante todo su ciclo de vida [12]

2.5. Automatización

La automatización es la facultad que poseen algunos procesos físicos para desarrollar las actividades de operación y funcionamiento en forma autónoma, es decir, por cuenta propia [13].

2.6. Sistemas centrales (agua helada).

Estos sistemas se caracterizan por tener equipos de refrigeración centralizados y comunes en todos los ambientes, siendo el agua (se conoce como helada por su baja temperatura) el medio utilizado para el enfriamiento y des humidificación del aire. El agua es procesada centralmente por un equipo conocido como enfriador o chiller.

Para cumplir su objetivo utiliza un sistema de tuberías y bombas, a través de los serpentines (evaporadores) de la UMA'S, las cuales están ubicadas ya sea en el interior o fuera del ambiente o conjunto de locales.

Este tipo sistema es utilizado generalmente cuando se requieren grandes capacidades de

refrigeración. Básicamente consta de una unidad o varias unidades enfriadoras donde cada una está constituida por compresores, condensador, evaporador y válvulas de expansión. El evaporador es un serpentín por dentro de cuyos tubos, circulan el refrigerante y exteriormente el agua, es aquí donde se lleva a cabo el proceso de intercambio de calor. El agua del enfriador circula a lo largo de las tuberías de las UMA's y/o FanCoils, el aire interior desplazado por el ventilador, pasa a través de los serpentines en donde (el aire) disminuye su temperatura.

Este sistema también permite una gran individualidad a los ambientes locales acondicionados, ya que el área servida por cada UMA's y/o FanCoil, es acondicionado independientemente y por lo tanto el control de temperatura y humedad responde a las condiciones particulares de este espacio.

El sistema de agua central de aire acondicionado es recomendable en edificios con gran número de ambientes y con horarios y condiciones de ocupación distinta, como son hoteles, centros comerciales, edificios de oficina, entre otros [14].

2.7. Aire acondicionado

Un sistema de aire acondicionado debe proporcionar en un ambiente, condiciones adecuadas de temperatura, humedad, movimiento del aire, calidad del aire, ventilación y nivel acústico. Todo esto lleva a la consecución por parte de los ocupantes de dicho ambiente de la sensación de confort.

Cualquier sistema de aire acondicionado consta básicamente de los siguientes componentes (existiendo diferentes tipos de cada componente y combinaciones muy variadas de dos o más de ellos) [14]:

- Equipo de refrigeración: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador; elementos pertenecientes al ciclo estándar de refrigeración por “compresión de vapor”, usado ampliamente con el fin de producir el enfriamiento necesario para el acondicionamiento del aire.
- Equipo de disipación de calor a la atmósfera.
- Equipo de manejo de aire.
- Equipo de suministro y distribución del aire (ductos, difusores, rejillas, etc.)

2.8. Automatización industrial

En síntesis, la automatización industrial se puede entender como la facultad de autonomía o acción de operar por sí solo que poseen los procesos industriales y donde las actividades de producción son realizadas a través de acciones autónomas, y la participación de fuerza física humana es mínima y la de inteligencia artificial, máxima. Hay que recordar que éste es un producto de la inteligencia natural, pero su manifestación en los sistemas de control es mediante la programación en los distintos tipos de procesadores, por lo que es artificial [13].

2.9. Antecedentes de otras investigaciones

Los sistemas de acondicionamiento térmico han sido utilizados ampliamente en diferentes edificaciones. En industrias, hogares e instituciones educativas, entre otras, se han planteado soluciones encaminadas a mejorar el confort térmico. A continuación, listan algunos de los trabajos encontrados, que contribuyen al desarrollo de este proyecto.

En [15], se contempla el control y la supervisión de los equipos de aire acondicionado e iluminación, ubicación en el edificio administrativo de Avon Cosmetics de Venezuela. El aire acondicionado de este edificio está formado por un sistema central, el cual consta de dos unidades enfriadoras de aire, tres unidades manejadoras de aire (UMAs) y sesenta fancoils. Adicional al sistema central, se tienen trece unidades SPLIT y dos unidades tipo compacto.

En [16] se muestra el hardware y software, necesarios para el funcionamiento automatizado y programable, de las instalaciones con miras al logro de obtener un eficaz mantenimiento preventivo, prolongar la vida útil y el ahorro de energía.

En el proyecto se desarrolló un sistema de monitoreo que permite al usuario interactuar con todos los dispositivos instalados en campo y de difícil acceso, ya sea del chiller y de las unidades manejadoras de aire - UMA, estos dispositivos serán visualizados desde un cuarto de control. El sistema de control permite al usuario modificar las variables permitidas para alcanzar el confort solicitado. El sistema centralizado de monitoreo y control están basados el software Metasys propio de la marca Johnson Controls con una arquitectura local de

entradas y salidas, conformada por un controlador maestro y nueve controladores esclavos. El proyecto concluyó que el sistema automatizado de Chillers provee de ventajas de eficiencia energética.

En el proyecto presentado en [17] se realiza la instalación y adecuación de 2 paneles de control y 10 sensores de temperatura para los 10 salones del 4 piso Del Edificio J de la UPB Bga, con el fin de complementar el control de la temperatura no solo para la biblioteca y el auditorio sino también para el 4 piso del Edificio J de la UPB se controló el ángulo de apertura de las válvulas ubicadas en los ductos del aire acondicionado de las salas a monitorear según las temperaturas registradas por cada sensor.

En [18], proyecto desarrollado en la Universidad del Valle, se abordó los conceptos básicos acerca de los sistemas de enfriamiento, los sistemas distribuidos e igualmente las temáticas relacionadas a las herramientas que se utilizaron, como las redes de Petri coloreadas, los casos de uso del UML y la herramienta de modelado y simulación CPN TOOLS. Posteriormente, se obtuvieron las necesidades y requisitos del sistema. Luego, se plantea una estructura de distribución del sistema y el sistema de comunicación de dicha estructura. Seguidamente, se define un procedimiento de modelado empleando las redes de Petri coloreadas. Paso seguido, se sigue el procedimiento de modelado previo y se modela el sistema. Finalmente, se valida dicho modelo empleando el método de simulación, siguiendo unos escenarios establecidos y se exponen y describen los resultados encontrados. El estudio de este trabajo fue una guía para el desarrollo de este proyecto.

3. CARACTERIZACIÓN DE REQUERIMIENTOS FUNCIONALES.

La entidad de educación superior desarrolló un proyecto para la actualización del sistema central de agua fría que suple el aire acondicionado en oficinas, auditorios, biblioteca y restaurante.

Se requiere un control centralizado de todo el sistema de climatización incluyendo la planta de agua fría, bombas, y torre de enfriamiento con sus respectivas válvulas de control y variadores de frecuencia en los motores de las unidades manejadoras para lograr su optimización. Para este proyecto se consideraron equipos que cumplan con el estándar 55 de ASHRAE versión para Colombia para el confort térmico [19].

Este capítulo consta de dos secciones. En la primera se presenta la evaluación del sistema actual de refrigeración y en la segunda sección se presenta la descripción del sistema de refrigeración que reemplazará el sistema anterior, se definen las características del sistema de control, sus modos de operación, requisitos mínimos funcionales y las variables a medir.

3.1. Evaluación de desempeño sistema actual

Con el fin de evaluar el desempeño de la planta centralizada de agua fría usada para refrigerar distintas áreas de los edificios de la entidad, e identificar alternativas para el reemplazo de equipos antiguos del sistema de refrigeración, se realizó un análisis del estado actual del sistema de refrigeración, el cual consideró lo establecido en los estándares 52, 55, 62 y 90 de ASHRAE para verificar las condiciones de calidad del aire, confort térmico, aire exterior, uso racional de energía y cuidado del medio ambiente, en las instalaciones de la entidad educativa de educación superior, respectivamente [14], [19]. Para un clima tropical húmedo como el que prevalecen en la región se especifican las siguientes condiciones: temperatura $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa $55\% \pm 5\%$, velocidades del aire del orden de 0.5 m/s (100 fpm).

Para el análisis se contó con la información suministrada por los operarios de los equipos y por mediciones en campo en distintas épocas del año, con el fin de compararlas con el valor

de la capacidad nominal del sistema central de agua fría. De igual forma se realizó el estudio del consumo energético actualizado según información entregada por la entidad y su perfil de ocupación durante el año. Se analizaron los datos de los últimos tres años, encontrando que cerca del 60% del consumo de energía eléctrica corresponde sistema de refrigeración. Este sistema de refrigeración consta de dos chillers condensados por aire marca Carrier, de la serie 30GX de 216 TR cada uno para un total de 432 TR, conectados con un sistema primario secundario. En la Tabla 2 se presenta un sumario de los espacios que deben refrigerar y su demanda de extracción. De acuerdo con los valores nominales descritos se identificó que el sistema actual tiene un factor de diversidad del orden de 0.6, esto indica que el sistema de refrigeración al tener disponible solo 432TR solo puede suplir el 60% de la demanda de los servicios instalados de 725 TR. Un análisis detallado de esta evaluación se presenta en [20].

Tabla 2 Resumen demanda. Fuente: Autor.

Espacios	Cantidad de equipos	Capacidad [TR]
Piso 1 y 2	15	213
Piso 3 y 4	17	316
Sótano	10	198
Total	42	726
Áreas con demanda variable		[TR]
Comedor y Auditorios		198
Áreas con demanda constante		[TR]
Laboratorios		170
Oficinas		358
Total demanda permanente		528
Capacidad nominal disponible [TR]		432
Factor de diversidad nominal		60%

En la Tabla 3 se muestran las condiciones requeridas para las áreas del sistema central y datos climáticos, para las condiciones actuales de Cali. Los datos mostrados están dados para una altura de 975 metros sobre el nivel del mar.

Tabla 3 Condiciones de diseño interior y exterior. Fuente: Autor

Condiciones	Bulbo seco	Bulbo húmedo	% RH	Punto de rocío	Granos por libra
Exterior	92	76	50	70,5	124
Interior	75	63	55	57.7	81

3.2. Descripción del sistema propuesto

Considerando la operación del *chiller* expuesta en apartados anteriores, el sistema propuesto está compuesto de tres ciclos: de evacuación, de refrigeración, y de carga.

El ciclo de carga se encarga de extraer el calor del sitio a refrigerar empleando una mezcla de agua y glicol, que fluye a través de un circuito de tuberías en el sitio anteriormente nombrado.

El ciclo central o de refrigeración: este ciclo se encarga de extraer el calor absorbido en el ciclo de carga. Por este ciclo fluye un agente refrigerante.

Ciclo de evacuación: este permite evacuar el calor transmitido en el condensador al agua que circula por medio de una bomba. Este calor es transferido al medio ambiente por medio de una torre de enfriamiento.

El sistema de refrigeración posee un conjunto de sensores usados para el control y regulación del funcionamiento del dispositivo. Estos sensores se encuentran distribuidos a lo largo de los diferentes ciclos y se encargan de medir y registrar los valores de las variables físicas involucradas en el proceso de refrigeración (temperatura, presión, caudal y nivel).

Para definir el lugar de instalación de los equipos nuevos se consideraron aspectos como: espacios permitidos, posibles obstrucciones (conductos eléctricos, tuberías contra incendios, vigas, columnas, paredes, techos, aislamientos acústicos, entre otros), capacidad portante de la losa y capacidad eléctrica disponible, servicio de agua, características arquitectónicas del espacio, desagües, facilidades de control, requerimientos de vibraciones, áreas críticas para la localización de los equipos y facilidad para el traslado, y mantenimiento de los mismos.

Para realizar el gerenciamiento de todo el sistema se requirió un sistema de control centralizado, con el panel de control incorporado al chiller. Se requería, además, que el sistema contara con un conjunto de sensores usados para el control y regulación del funcionamiento del dispositivo. Estos sensores se encuentran distribuidos a lo largo de los diferentes ciclos y se encargan de medir y registrar los valores de las variables físicas involucradas en el proceso de refrigeración (temperatura, presión, caudal y nivel). Además, se requiere que el sistema controle las válvulas de flujo de agua existentes y garantizar una temperatura en cada espacio de 24°C considerando los horarios de funcionamiento de las instalaciones de la universidad. La señal para accionar la bomba de agua fría será la temperatura del agua fría de retorno 6-12°C y para la bomba de agua de condensación y ventilador de la torre, la temperatura de accionamiento será 29 °F.

3.3.1. Características de sistema de control del chiller

El control de planta de agua fría, deberá monitorear y controlar el chiller de forma autónoma o a través del software para secuenciarlo. El software secuenciador del chiller, deberá ser capaz de realizar las siguientes estrategias de control:

- Sistema de calendarización: el software secuenciador iniciará el sistema del chiller, basado en un calendario de 7 días, con encendido y apagado de bombas; debe contar con una pantalla con comunicación Bacnet MSTP que se pueda instalar en cualquier parte del lazo de comunicación para facilitar labores de monitoreo en la planta de agua helada.
- El sistema también deberá inicializarse en respuesta a una señal binaria proveniente de una fuente externa, tal como el sistema de control del edificio.
- La planta de chillers deberá arrancar, en respuesta a un encendido adecuado, a un retraso en la noche o a un requerimiento especial de cualquiera de las manejadoras de aire del sistema.
- Secuenciador de chiller: el software secuenciador de chiller iniciará y detendrá el sistema de bombeo de agua y los chiller, de acuerdo a la carga del sistema.
- Cuando el sistema de agua helada esté habilitado, el sistema de control de los chiller realizará la siguiente secuencia: a. iniciar el sistema de bombeo de agua helada. b. iniciar el bombeo de agua helada en el chiller y probar su flujo a través del evaporador. c. arrancar el chiller primario después de haber confirmado el flujo de agua helada.

3.3.2.Modos de operación

Se estableció la operación bajo dos modos principales de funcionamiento, manual y automático. El modo manual comprende el funcionamiento a través de la intervención de un operario. El modo automático plantea un funcionamiento auto-regulado del sistema con intervención humana mínima. En el documento se ofrece una especial atención al modo automático, ya que se considera que es el modo de funcionamiento donde se centra la importancia de este trabajo de grado, la automatización del sistema de refrigeración.

El modo automático comprende tres modos principales: modo ocupado, modo desocupado y modo nocturno. En el modo ocupado el sensor de temperatura registra valores por encima de los establecidos, el modo desocupado, un valor de temperatura se establece dentro de los rangos requeridos, Además, posee un modo de operación nocturna, ver Ilustración 4. En la Tabla 5 se presentan los valores establecidos para cada modo.

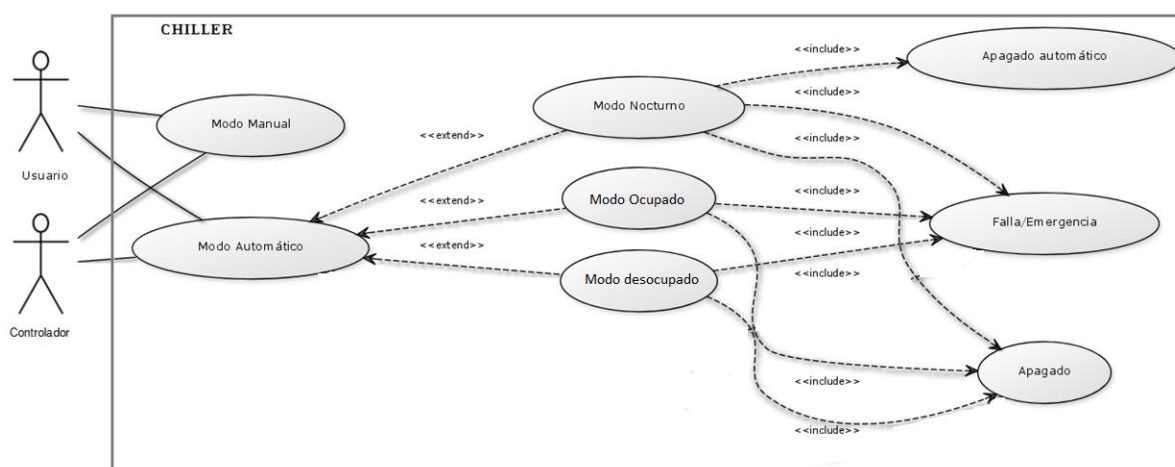


Ilustración 4 Diagrama de casos de uso. Fuente: Autor

Caso de uso “modo manual”

- *Actor que inicia el caso de uso:* (operario) o sistema de control del chiller.
- *Condiciones previas al inicio del Caso de Uso:* Existencia de una solicitud de activar el modo manual
- *Actividades en el caso de uso:* Posterior a la activación de este modo, se inicia el funcionamiento del sistema, se verifican los niveles de agua de la torre de enfriamiento y del tanque de glicol, se posicionan las válvulas de control, se abren las respectivas válvulas solenoides, se enciende la bomba de la torre, seguido por el ventilador de la misma, luego

la bomba de glicol, después el compresor y por último se regula el sistema de manera manual.

- *Condiciones posteriores al término del caso de uso:* el sistema se encuentra en funcionamiento manual, disponible a cambio de modo.
- *Actor que se beneficia del caso de uso:* usuario.

Caso de uso “modo automático”

- Actor que inicia el caso de uso: usuario.
- Condiciones previas al inicio del caso de uso: solicitud de operación automática.
- Actividades en el caso de uso: seguido de la selección del modo automático, se selecciona modo particular de operación automático.
- Condiciones posteriores al término del caso de uso: el sistema se encuentra habilitado a la selección de un modo particular de operación.
- Actor que se beneficia del caso de uso: chiller.

Caso de uso “modo nocturno”

- Actor que inicia el caso de uso: usuario (operario) o sistema de control del Chiller.
- Condiciones previas al inicio del caso de uso: no hay hielo en los bancos después de las 8 Pm o existe una solicitud manual de generación de hielo.
- Actividades en el caso de uso: posterior a la activación de este modo; se inicia el funcionamiento del sistema, se verifican los niveles de agua de la Torre de Enfriamiento y del tanque de glicol, se posicionan las válvulas de control, se abren las respectivas válvulas solenoides, se enciende la bomba de la torre, seguido por el ventilador de la misma, luego la bomba de glicol, después el compresor y por último se regula el sistema de manera automática.
- Condiciones posteriores al término del caso de uso: sistema operando en la generación de hielo, habilitado para apagar manualmente o automáticamente (auto-apagado)
- Actor que se beneficia del caso de uso: chiller

Caso de uso “modo desocupado”

- Actor que inicia el caso de uso: usuario (operario) o sistema de control del Chiller.
- Condiciones previas al inicio del caso de uso: Solicitud manual o automática de operación en carga.

- Actividades en el caso de uso: seleccionado el modo, el ventilador de suministro permanecerá apagado y la válvula de enfriamiento permanecerá cerrada.

El ventilador de suministro permanecerá apagado cuando la UMA se encuentre en modo de No Ocupación, el enclavamiento para Paro/Auto esté abierto. La válvula de enfriamiento será cerrada si el ventilador de suministro está apagado o el sensor de espacio falló.

- Condiciones posteriores al término del caso de uso: sistema en operación, habilitado para el cambio de modo.
- Actor que se beneficia del caso de uso: usuario

Caso de uso “modo ocupado”

- Actor que inicia el caso de uso: usuario (operario) o sistema de control del Chiller.
- Condiciones previas al inicio del caso de uso: existencia de una solicitud de este modo, ya sea de forma manual o automática
- Actividades en el caso de uso: el ventilador de suministro operará de acuerdo al sensor diferencial de presión mientras la válvula de enfriamiento se modulará para mantener la temperatura del aire de descarga. El punto de ajuste de la temperatura del aire de descarga, será automáticamente reseteado por el sensor de temperatura de espacio.

El ventilador de suministro operará de acuerdo al sensor diferencial de presión cuando la UMA esté en modo de Ocupación. La válvula de enfriamiento se modulará para mantener la temperatura de descarga de aire en el punto de ajuste de descarga de enfriamiento.

- Condiciones posteriores al término del caso de uso: sistema en operación, habilitado para el cambio de modo.
- Actor que se beneficia del caso de uso: usuarios.

Caso de uso “apagado”

- Actor que inicia el caso de uso: usuario (manualmente) o el Chiller (Automático).
- Condiciones previas al inicio del caso de uso: existencia de una solicitud de este modo, ya sea de forma manual o automática
- Actividades en el caso de uso: se apaga el sistema siguiendo un procedimiento dependiendo del modo en el que se encuentre anteriormente.
- Condiciones posteriores al término del caso de uso: sistema fuera de funcionamiento.
- Actor que se beneficia del caso de uso: chiller.

Caso de uso “falla/emergencia”

- Actor que inicia el caso de uso: chiller (automáticamente)
- Condiciones previas al inicio del caso de uso: existencia de una solicitud automática de este modo.
- Actividades en el caso de uso: inicio de auto-apagado del sistema e informe de la emergencia o falla.
- Condiciones posteriores al término del caso de uso: sistema apagado y falla informada.
- Actor que se beneficia del caso de uso: usuario y chiller.

Caso de uso “auto-apagado”

- Actor que inicia el caso de uso: chiller.
- Condiciones previas al inicio del caso de uso: hielo producido.
- Actividades en el caso de uso: inicio del apagado del modo nocturno.
- Condiciones posteriores al término del caso de uso: sistema apagado.
- Actor que se beneficia del caso de uso: chiller.

3.3.3.Requisitos mínimos funcionales del sistema de refrigeración.

Para la definición de los requisitos de dicho sistema se establecieron las estrategias de control, con las cuales operara el sistema, de cada uno de los modos de operación; se calcularon los valores de las variables que dominan la dinámica de los procesos, valores que deberían tener dichas variables durante la operación del dispositivo.

En la Ilustración 5 se muestra el diagrama de conexión del sistema de enfriamiento central propuesto. En el diagrama se identifican todos los componentes del sistema, incluyendo los chillers, bombas y torre de enfriamiento con su unidad de tratamiento de agua. Las líneas azules y rojas el recorrido del suministro de agua fría y su retorno; las líneas violeta y cian indican el recorrido y retorno del flujo de condensación. En la Tabla 4 se detallan los elementos que constituyen el sistema de refrigeración, en dicha tabla no se detallaron elementos tales como las tuberías y elementos de ajuste; solo se tuvieron en cuenta los elementos que manipulan la dinámica de los procesos y aquellos que registran las variables

del sistema, ya que serán los elementos principales al momento de abordar el modelado del chiller.

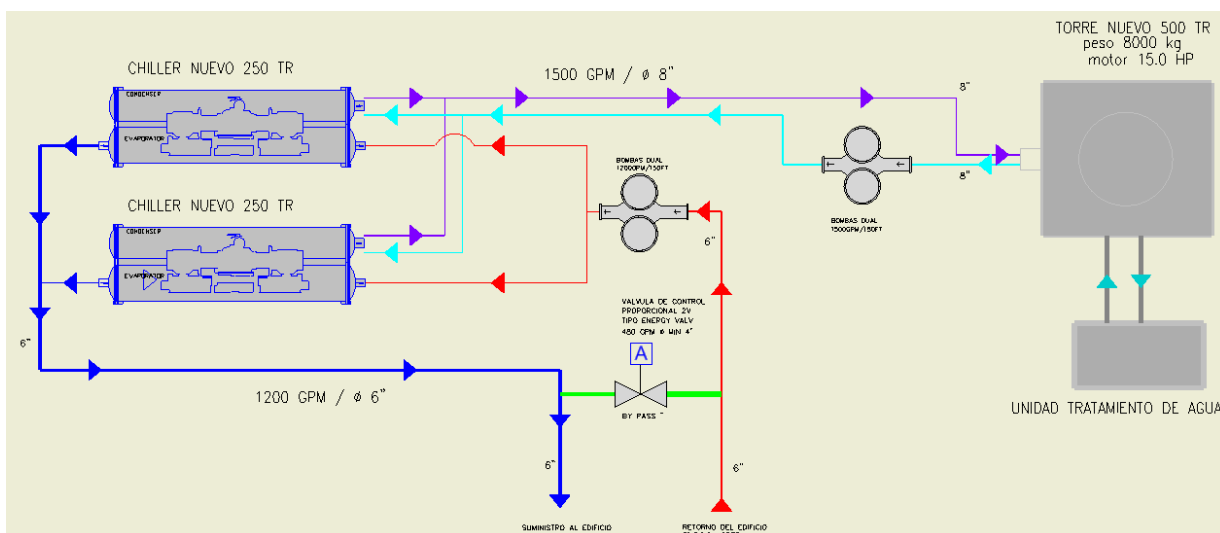


Ilustración 5. Diagrama de conexión del sistema de enfriamiento central propuesto. Fuente: Autor.

Tabla 4. Requerimientos mínimos necesarios para el funcionamiento del sistema de refrigeración. Fuente: Autor.

REQUERIMIENTOS MÍNIMOS NECESARIOS		
EQUIPO	CANTIDAD	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MÍNIMAS
Chiller	2	- Capacidad en toneladas de refrigeración: 250 TR Reales. - Tipo de condensación: Por agua. - Tipo de refrigerante: 134 A. - Válvulas de expansión electrónicas. - Caudal de agua: 1200 GPM. - Consumo de energía: 0,68 Kw/TR. - Voltaje: 460V/3 Fases/ 60 Hz. - Temperatura de agua entrando al evaporador: 12°C - Temperatura de agua saliendo del evaporador: 6°C - Temperatura de agua entrando al condensador: 29°C - Temperatura de agua saliendo del condensador: 35°C
Bomba de condensación	1	- Caudal: 1500 GPM. - Caída de presión: 50 pies. - Tensión de alimentación: 460 V AC, trifásica, 60 Hz. - Con Variador de velocidad.
Bomba sistema de agua fría.	1	- Caudal: 1200 GPM. - caída de presión: 50 pies. - tensión de alimentación: 460 V AC, trifásica, 60Hz. - con variador de velocidad.
Torres de enfriamiento	1	- Caudal: 1500 GPM. - Tensión de alimentación: 460 V AC, trifásica, 60 Hz. - Cantidad: dos torres. - deben ser seleccionadas con una temperatura de bulbo húmedo de 75 °F y la temperatura de agua a la salida de las torres debe ser de 85° F, es decir la misma de la entrada al condensador del chiller. - El nivel de ruido debe ser inferior a 65 dB

Tuberías de agua y aislamiento		Deberá ser PVC de alta presión, Schedule 40. Alternativamente se pueden ofrecer tubería en polipropileno o poli buteno, siempre y cuando cumplan con las normas y se ofrezcan primero las tuberías de PVC. Las tuberías de agua fría deben ser en aisladas con poliuretano enchaquetado en lámina de aluminio de 0.5 mm.
Elementos y equipos eléctricos.		Todos los tableros o envoltentes, conductores, elementos de protección, mando y control, equipos, requeridos para el desarrollo del proyecto, deben cumplir con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE, y la norma técnica NTC2050
Sistema de control de la planta de enfriamiento.		Todos los equipos que hacen parte de la planta de enfriamiento, deberán ser controlados, monitoreados y configurados a través de un controlador, programable, con protocolo abierto Bacnet/ IP y este controlador debe ser accesible vía Web, con un navegador como el Google Chrome por ejemplo. Este controlador debe poder ser integrado a la plataforma de automatización de la Universidad, Andover Continuum de Schneider Electric, para efecto de monitoreo de los equipos, estado de prendido y apagado, programación de horarios de funcionamiento y visualización de las principales alarmas que pueda generar el sistema y que se consideren críticas para la integridad y operación del mismo. Las características de control antes mencionadas de la planta de enfriamiento, no deben requerir de ningún software especializado para la programación, administración y control de la totalidad de la planta de enfriamiento

3.3.4. Definición de variables a medir

En la Ilustración 6 se presenta el esquema de distribución de sistema de refrigeración y las zonas a refrigerar, se observan las temperaturas y caudales de cada área, ver también Tabla 5. En los Anexo 1 y Anexo 2 se presentan la disposición de los Instrumentos de regulación de fluidos y sensores para el sistema de agua fría y de condensación, respectivamente, estos sistemas se presentaron en la Ilustración 5.

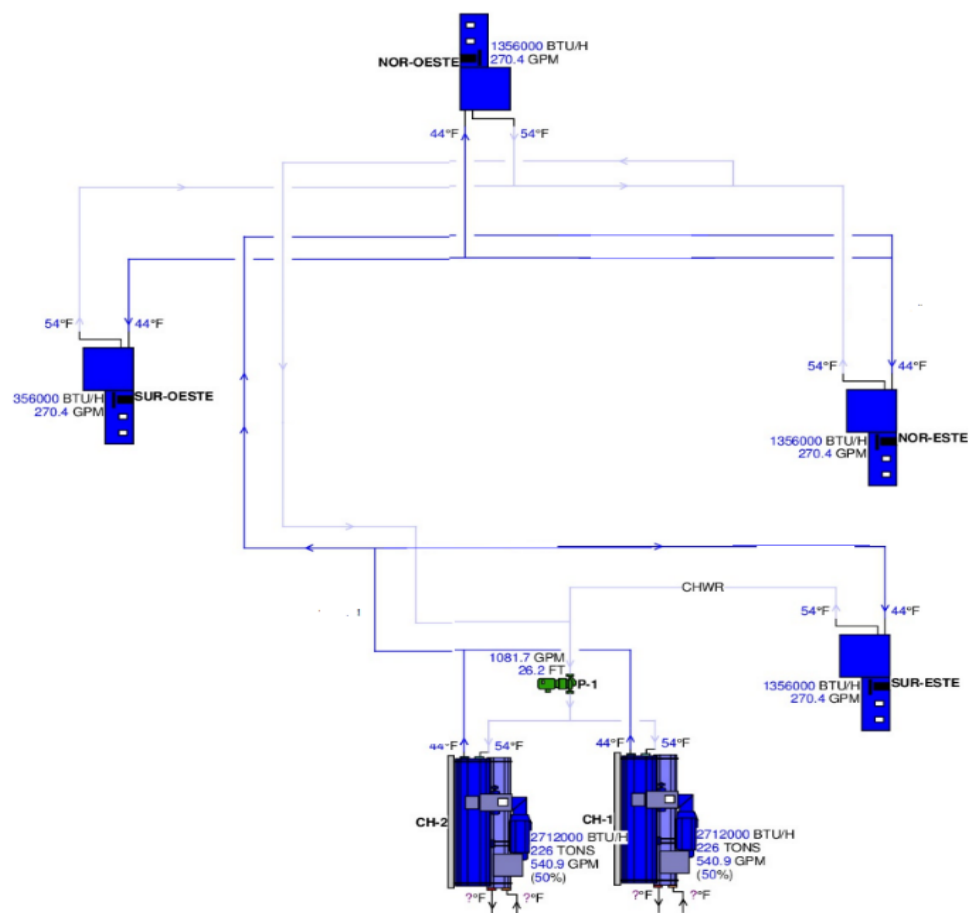


Ilustración 6 Esquema de distribución de áreas a refrigerar y valores de configuración (Temperatura y Caudal). Fuente: Autor.

Tabla 5 Valores de caudal y temperatura a controlar. Fuente: Autor.

Lugar	Caudal [GPM]	Temperatura entrada [°C]	Temperatura Salida [°C]
Chiller 1	540,9	Varía con el consumo de los edificios	6
Chiller 2	540,7		6
Edificio Noroeste	270,4	6	Varía con el consumo de los edificios
Edificio Noreste	270,4	6	
Edificio Suroeste	270,4	6	
Edificio Sureste	270,4	6	

4. PLANTEAMIENTO DE UNA ARQUITECTURA PARA EL SISTEMA.

En este capítulo se presentan los resultados referentes al segundo objetivo específico. En esta etapa se implementó la estrategia de control. De igual manera se programaron los equipos seleccionados para cumplir con todas las especificaciones del sistema.

Este sistema de enfriamiento está gobernado por un sistema de control para mejorar la operación, logrando las condiciones requeridas y minimizando el consumo de energía y por consiguiente mitigando el impacto en el medio ambiente.

4.1. Arquitectura del sistema

En la Ilustración 7 se presenta un esquema general del sistema completo, el cual está conformado por el sistema de control y el sistema a controlar o de refrigeración, se pueden observar las señales de entrada y de salida de cada uno, donde, al sistema de control se le brinda un suministro eléctrico, al igual que al sistema de refrigeración, el cual envía en comunicación en ambos sentidos señales al sistema de control y como respuesta genera señales físicas, asociadas a las variaciones de caudal, temperatura, presión y humedad.

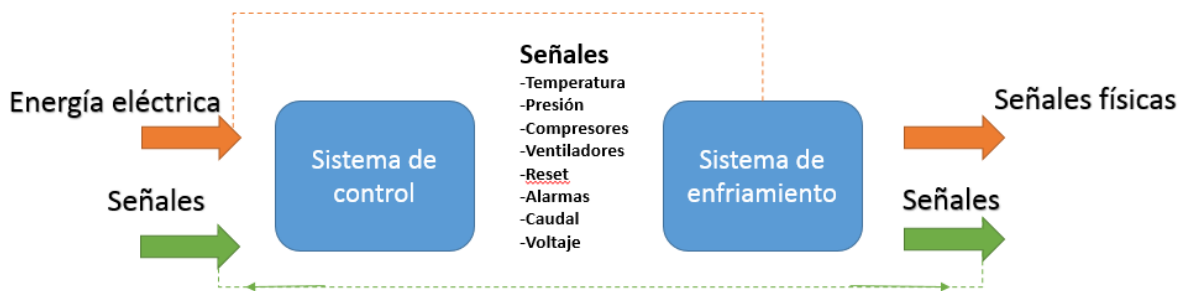
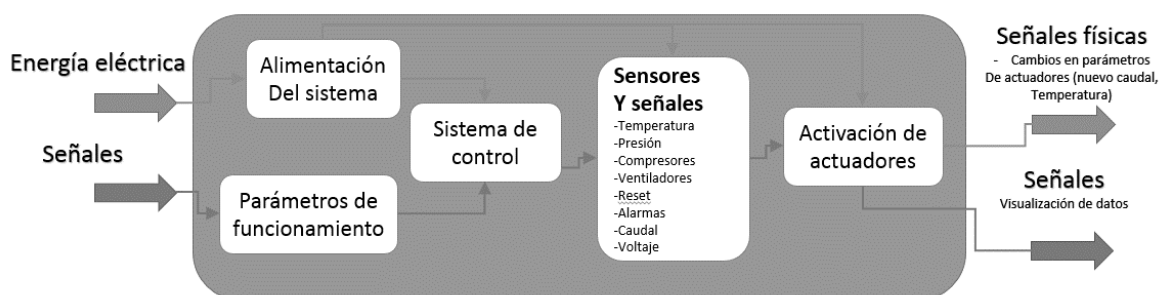


Ilustración 7 Esquema general del sistema. Fuente: Autor.

En la Ilustración 8 se presenta un detalle del esquema de la Ilustración 7, donde se observa el flujo de información y señales. La disposición de los elementos que conforman el sistema de enfriamiento se aprecia en la Ilustración 5. La línea punteada muestra las señales a procesar por el sistema de control, dichas señales son las de encendido (condiciones iniciales: temperatura ambiente y temperatura inicial del proceso), mediante las cuales se

regula el funcionamiento del chiller; la línea continua es la energía que el proceso necesita y las señales físicas que acciona.



(a)



(b)

Ilustración 8 Ampliación esquema del sistema de control, (a) vista global, (b) señales a procesar.
Fuente: Autor.

4.1.1.Arquitectura electrónica

La arquitectura presentada la Ilustración 9 detalla las funciones de cada uno de los elementos dispuestos en el bloque de sistema de control (PLC) y señales y sensores (sensores de caudal, presión y temperatura, válvulas, protecciones eléctricas, switches y filtros) de la Ilustración 8. En la columna de la izquierda se presenta los sensores y dispositivos de medición, en la columna de la derecha señala el objetivo de las mediciones de las variables, una línea representa la relación entre ellos.

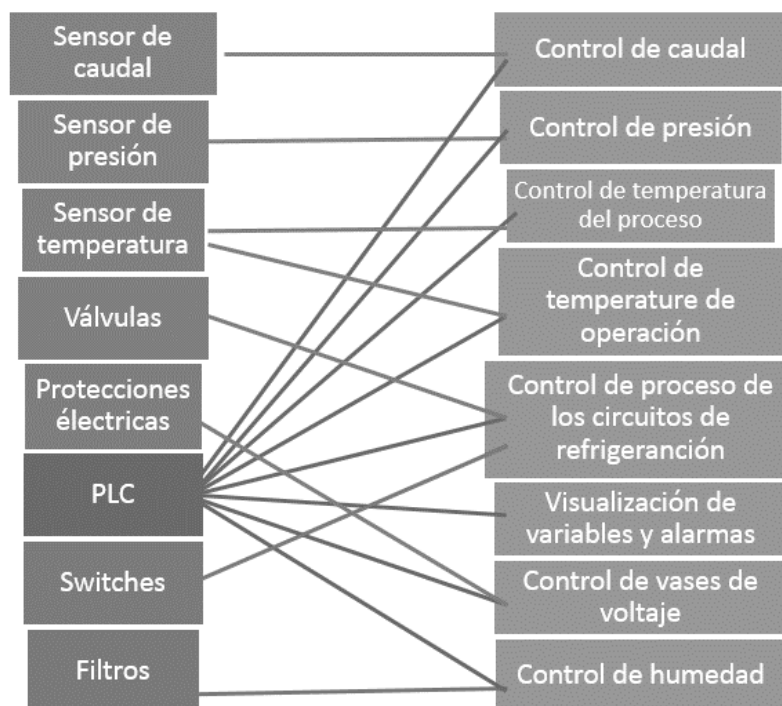


Ilustración 9 Arquitectura electrónica. Fuente: Autor.

4.1.2.Arquitectura mecánica

En la Ilustración 10 se presenta un esquema que relaciona de las funciones involucradas en el sistema de enfriamiento y los componentes del sistema mecánico encargados de realizarlas.

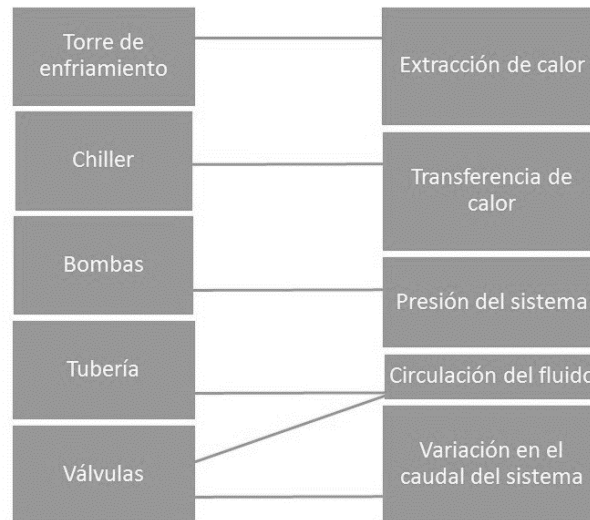


Ilustración 10 Arquitectura mecánica. Fuente: Autor.

4.1.3.Arquitectura comunicación

Considerando los requisitos del sistema con relación al monitoreo y control general del sistema, se hace necesario considerar una arquitectura para la comunicación entre dispositivos. En la Ilustración 11 se presenta la arquitectura de comunicación para el monitoreo y control de señales, donde se observa que el PLC encargado de gestionar las señales del sistema puede comunicarse a otros equipos para la supervisión, mediante una interfaz gráfica, que será descrita en una sección posterior.

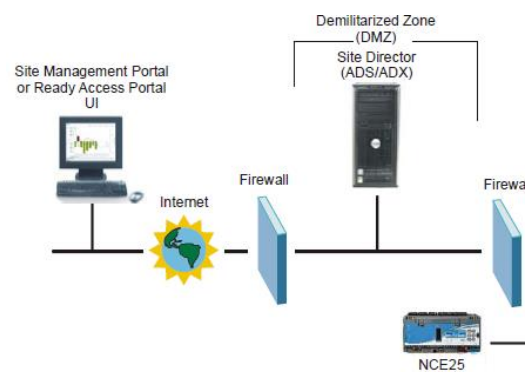


Ilustración 11 Arquitectura de comunicación. Fuente: [21].

4.1.4. Funcionalidad de cada elemento

En la Tabla 6 se presenta un detalle de los elementos que conforman el sistema tanto de control como de refrigeración y su función dentro del sistema.

Tabla 6 Funcionalidad de cada elemento. Fuente: Autor.

Elementos físico	Función
Red eléctrica	Proporciona la energía eléctrica del sistema.
PLC	Controlador lógico programable, es el elemento encargado de procesar y controlar el ciclo de refrigeración del chiller
Sensores	Suministran la información que es procesada por el PLC
Válvulas	Controla el caudal del fluido de trabajo.
Protecciones eléctricas	Controla la calidad de la energía eléctrica, protege cargas trifásicas contra sobre y subtensión, asimetría angular, asimetría modular, falta de fase y secuencia de fase.
Switches	Permiten el paso de corriente a los diferentes componentes electromecánicos del Chiller
Filtros	Protegen el sistema de refrigeración contra la humedad, las partículas sólidas y los ácidos.
Tubería	Medio físico encargado de transportar el gas refrigerante por todo el circuito de refrigeración.
Bombas	Generan el diferencial de presión para desplazar el fluido de trabajo a lo largo del circuito del sistema de refrigeración.
Torre de enfriamiento	Proporciona la superficie donde el líquido a enfriar transfiere el calor al ambiente.

4.2. Estrategia de control

A continuación, se detalla la estrategia de control desarrollada para el sistema de enfriamiento, el cual se diseñó de acuerdo a las especificaciones y requerimientos definidos anteriormente.

4.2.1. Diagrama de estados

En esta sección se presenta una descripción conceptual de la estrategia de control, mediante el diagrama de estados, mostrado en la Ilustración 12.

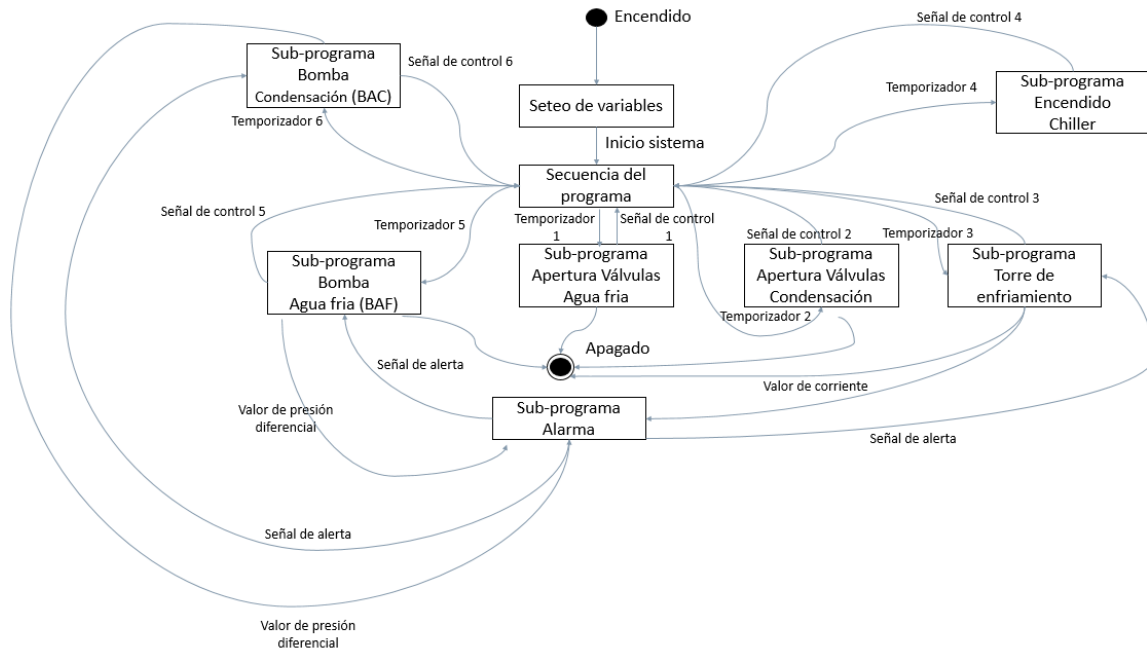


Ilustración 12 Diagrama de estados general del sistema de enfriamiento. Fuente: Autor.

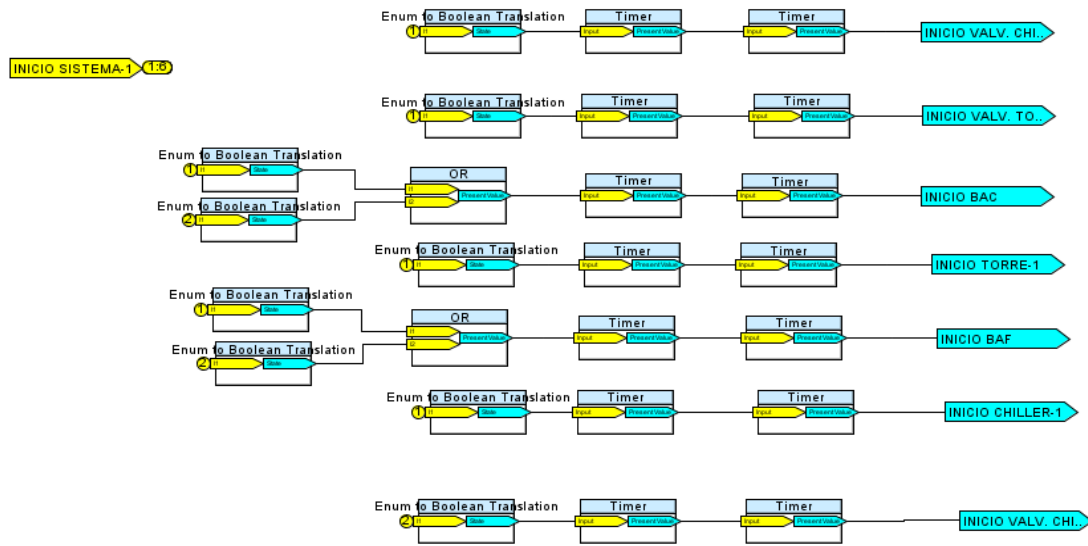
Se muestra que el sistema cuenta con una configuración inicial de las variables y cada estado corresponde a un sub-programa para cada elemento del sistema de enfriamiento, el cual interviene en el sistema al iniciarse un temporizador distinto para cada uno de los elementos. Estos a su vez realimentan de información al estado de secuencia del programa. Se observa además que existe un estado de alarma para la torre de enfriamiento y las bombas de agua y condensación. En la siguiente sección se mostrará en detalle el programa de control realizado.

4.2.2. Lógica de control

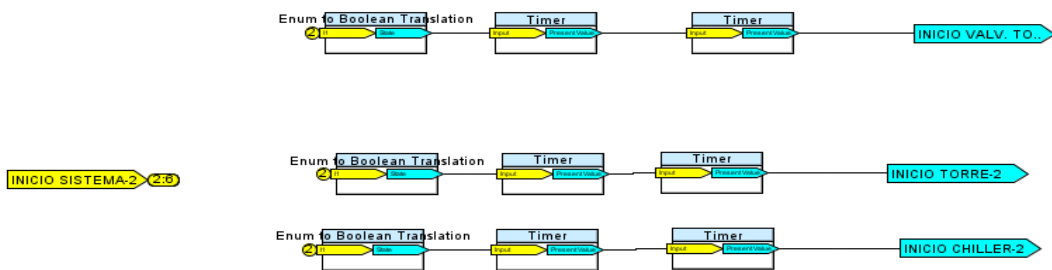
En programa se realizó con diagramas de bloques, el cual considera los nueve estados mostrados en el diagrama de estados de la sección anterior.

Una vez encendido el sistema de enfriamiento, este inicia con el estado de configuración de variables (SETPOINT), ver Ilustración 13.

Sub-programa configuración de variables



(a)



(b)

Ilustración 13 Estado configuración de variables (a) sistema 1, (b) sistema 2. Fuente: Autor.

Programa de encendido secuencial de los Equipos.

Entradas de inicio sistema comandadas por horario.

Secuencia:

1. Inicio subprograma apertura de válvulas de corte agua fría después t1 segundos de confirmar el inicio sistema.
2. Inicio subprograma apertura de válvulas de corte condensación después t2 segundos de confirmar el inicio sistema.
3. Inicio subprograma torre enfriamiento (te) después t3 segundos de confirmar el inicio sistema.
4. Inicio subprograma encendido chiller después t4 segundos de confirmar el inicio sistema.

5. Inicio subprograma bombas de agua fría (baf) después t5 segundos de confirmar el inicio sistema.
6. Inicio subprograma bombas de condensación (bac) después t6 segundos de confirmar el inicio sistema.

Sub-programa alarma

Subprograma el cual agrupa todas las alarmas de los equipos y crea una alarma general, los equipos que cuentan con alarma son las torres de enfriamiento y las bombas de agua fría y condensación. En la Ilustración 14 se presenta la lógica de control de la Alarma General. Esta función se encarga de integrar las tres alarmas de los equipos mencionados anteriormente.

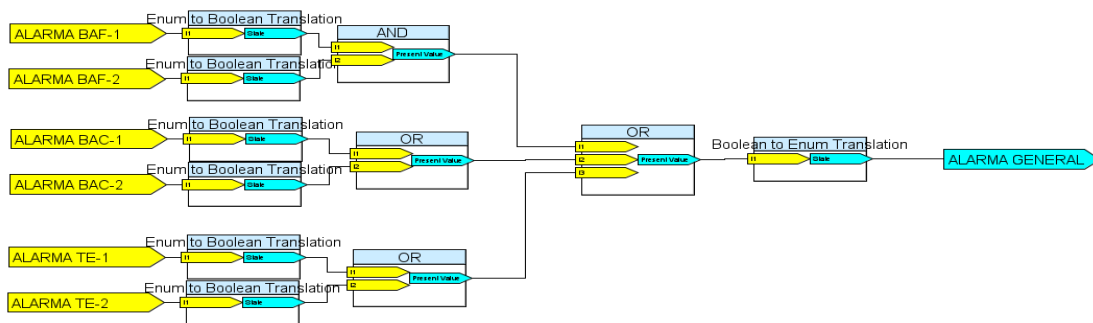


Ilustración 14 Alarma general. Fuente: Autor.

Alarma torre: función para confirmar el funcionamiento de la torre de enfriamiento. Un interruptor de corriente (status torre) confirma que el ventilador está encendido cuando hay flujo de corriente en él motor. Se realiza una comparación entre el interruptor y el comando de inicio, y si después de determinado tiempo el interruptor no se ha activado envía la salida de alarma, ver ilustración 15.

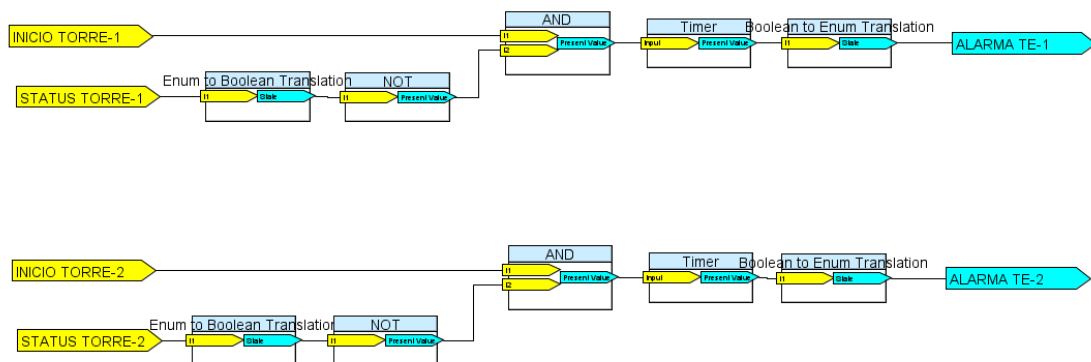


Ilustración 15 Alarma de la torre de enfriamiento. Fuente: Autor.

Alarmas BAC: función para confirmar el funcionamiento de la bomba de Condensación. Un interruptor de presión diferencial (status BAC) confirma que la bomba está encendida, cuando hay movimiento de agua o diferencial de presión entre la entrada y salida de la bomba. Se realiza una comparación entre el interruptor y el comando de inicio, y si después de determinado tiempo el interruptor no se ha activado activa la salida de alarma, ver ilustración 16.

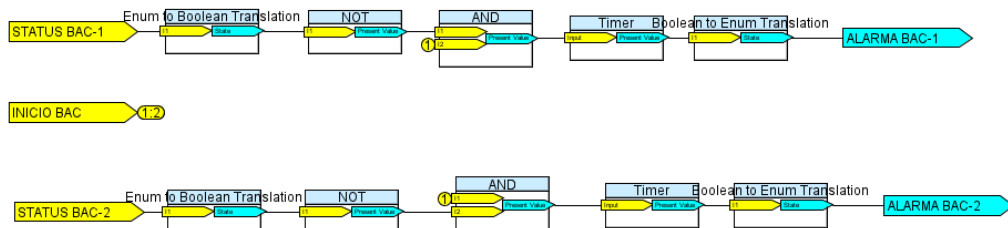


Ilustración 16 Alarma de la bomba de condensación. Fuente: Autor.

Alarma BAF: función para confirmar el funcionamiento de la bomba de Agua Fría. Un interruptor de Presión diferencial (STATUS BAF) confirma que la bomba está encendida cuando hay movimiento de agua o diferencial de presión entre la entrada y salida de la Bomba. se realiza una comparación entre el interruptor, el comando de inicio y la señal de confirmación de acuerdo a la programación horaria de la bomba, y si después de determinado tiempo el interruptor no se ha activado envía la salida de alarma, ver Ilustración 17.

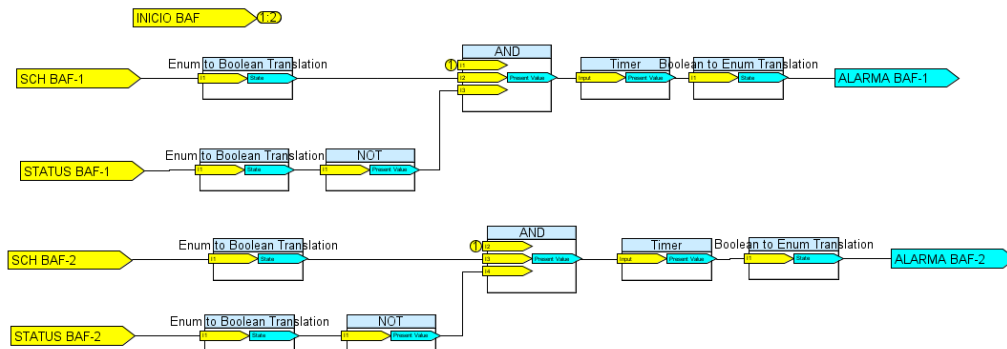


Ilustración 17 Alarma de la bomba de agua fría. Fuente: Autor.

Sub-programa encendido chiller

Este sub-programa cuenta con una función para el cálculo de caudal, convierte una señal de corriente a caudal de acuerdo a la expresión (1). Donde, q es el caudal volumétrico, I es la corriente en mA y K es un factor en GPM/mA, ver Tabla 7.

$$q = (I - 4) * K \quad (1)$$

Tabla 7 Tabla para el cálculo de k . Fuente: [5]

Sch 40 Plastic Pipe Per ASTM-D-1785					
Pipe Size	Height "H"	Pulse Output		Current Output	
		K-FACTOR PULSES/ U.S. Gallon	K-FACTOR PULSES/LITER	K-FACTOR GPM/mA	K-FACTOR LPM/mA
1.5	5.537	56.55	14.941	9.691	36.68
2	5.482	38.16	10.082	16.05	60.76
2.5	5.391	28.37	7.495	24.57	93.01
3	5.317	18.09	4.779	35.38	133.9
3.5	5.258	13.25	3.501	47.38	179.4
4	5.199	10.07	2.661	61.12	231.5
5	5.075	6.13	1.620	96.25	364.4
6	4.950	4.07	1.075	139.1	526.6
8	4.715	2.20	0.581	241.3	913.4
10	4.465	1.32	0.349	380.6	1441
12	4.231	0.89	0.235	540.6	2046

La lógica de control se muestra en la Ilustración 18.

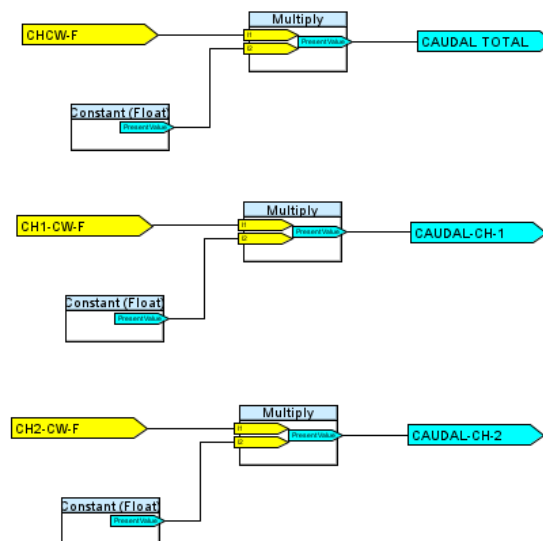


Ilustración 18 Lógica para el cálculo de la presión. Fuente: Autor.

En la Ilustración 19 se muestra la secuencia de arranque y paro Chiller, confirma si las bombas de agua frías y condensación están encendidas y la señal de encendido Chillers está activa.

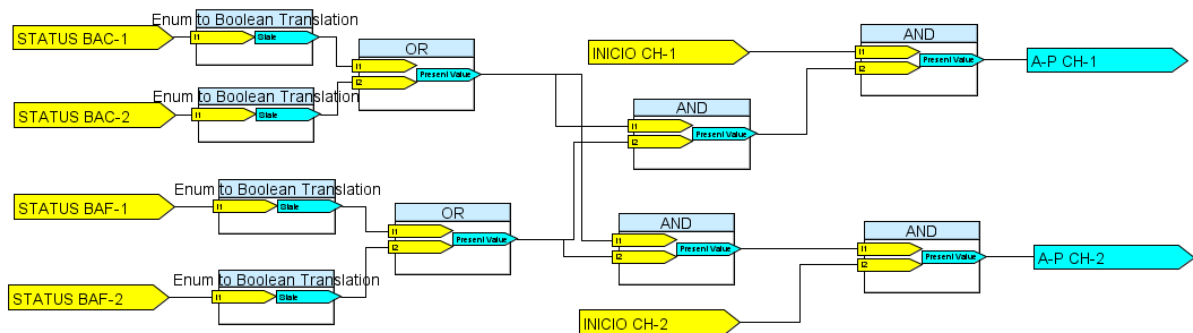


Ilustración 19 Lógica de encendido del Chiller. Fuente: Autor.

Sub-programa secuencia del programa

En la Ilustración 20 se presenta la lógica para el encendido de equipos, se integran los distintos temporizadores para el encendido de cada uno de los equipos e integra las señales de las alarmas.

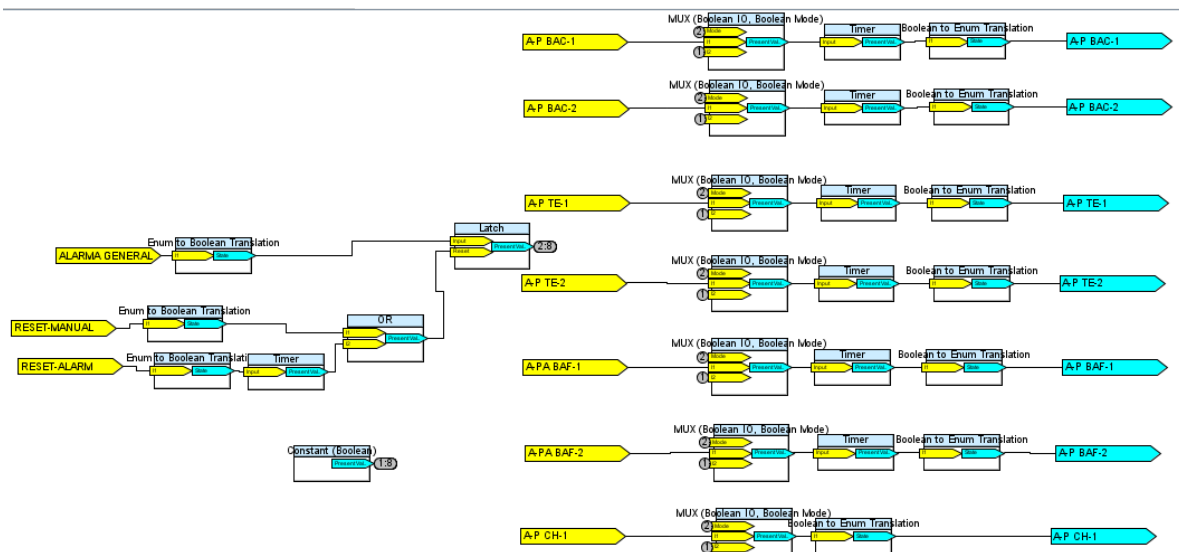


Ilustración 20 Lógica para el encendido de equipos. Fuente: Autor.

Válvula bypass: función PID que controla la válvula bypass dependiendo de la retroalimentación del sensor de la caudal y el setpoint deseado. Solo se habilita cuando cualquiera de los chillers está en funcionamiento, ver ilustración 21.

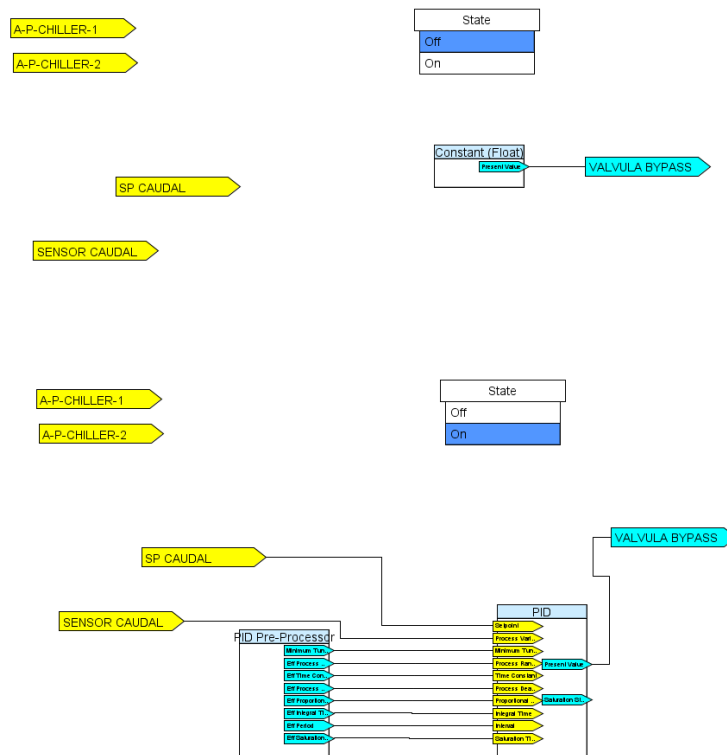


Ilustración 21 Lógica para el control de las válvulas bypass. Fuente: Autor.

Válvulas de aislamiento: Encendido secuencial de las válvulas de aislamiento, la lógica es similar para las válvulas de los chiller y las torres, ver Ilustración 22.

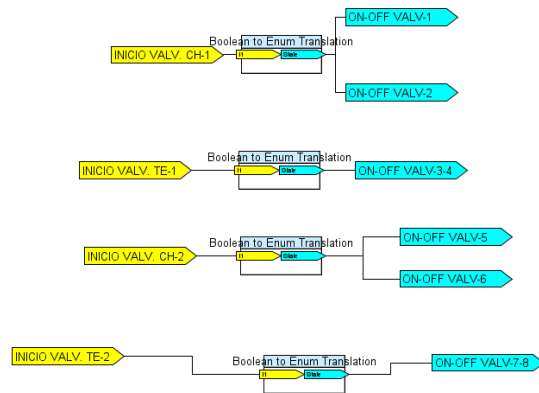


Ilustración 22 Lógica de válvulas de aislamiento. Fuente: Autor.

Sub-programa apertura de válvulas de agua fría

Sub-programa que activa la función PID que controla la velocidad de la Bombas dependiendo de la retroalimentación del sensor de Presión y el Setpoint deseado. Solo se habilita cuando cualquiera de las Bombas está en Funcionamiento, ver Ilustración 22. La lógica para las bombas de condensación es similar.

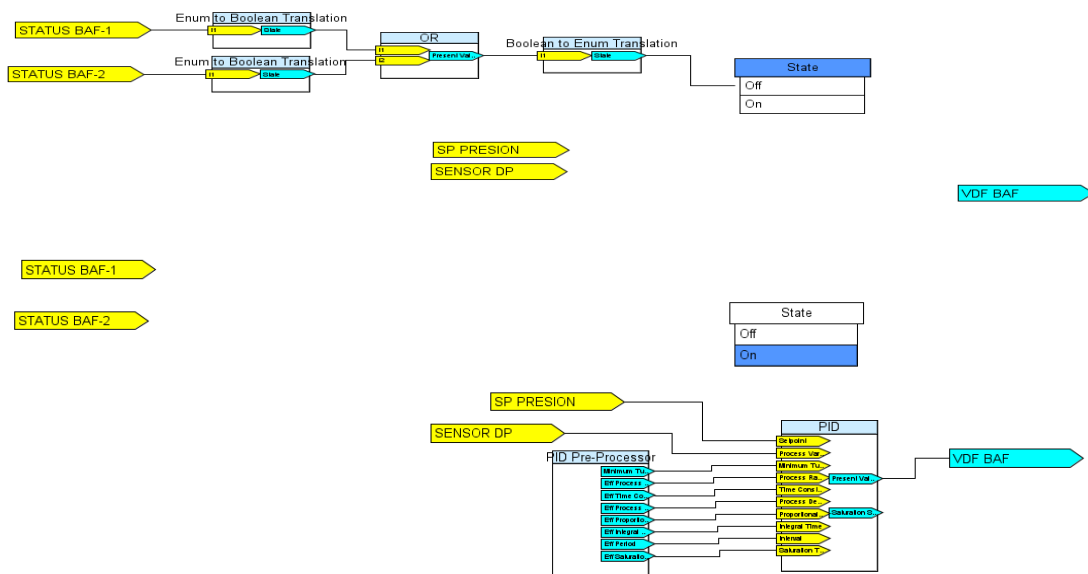


Ilustración 23 Lógica para el control de velocidad de las bombas de agua fría. Fuente: Autor.

Sub-programa apertura de bombas de agua fría

Secuencia para arranque y paro de las bombas de agua fría, confirma si las bombas están encendidas y la señal de Encendido Chillers está activa, ver Ilustración 24.

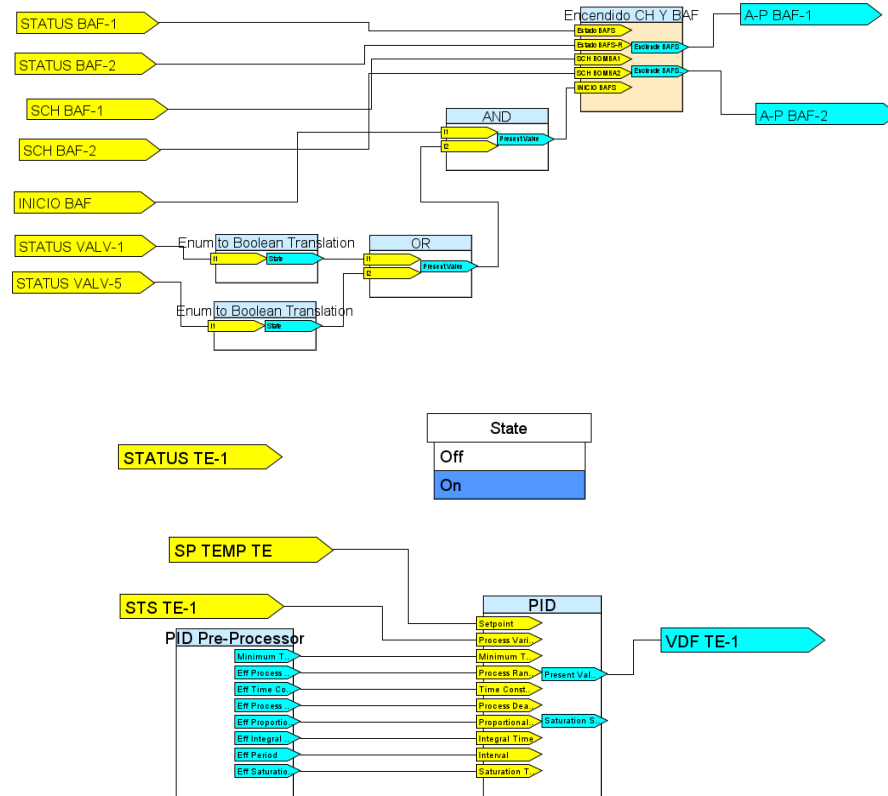


Ilustración 24 Lógica de bombas de agua fría. Fuente: Autor.

Sub-programa apertura de bombas de condensación

Secuencia para arranque y paro Bomba Condensación, confirma si las bombas de condensación están encendidas y la señal de encendido Chillers está activa, ver Ilustración 25.

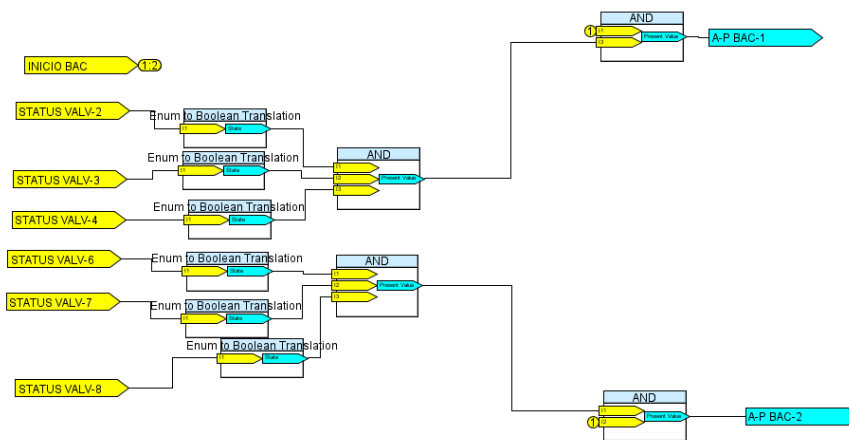


Ilustración 25 Lógica de bombas de condensación. Fuente: Autor.

Sub-programa apertura de torre de enfriamiento

Secuencia para arranque y paro de las torres de enfriamiento, confirma si cualesquiera de las bombas de condensación están encendidas y la señal de encendido de las torres está activa, ver ilustración 26.

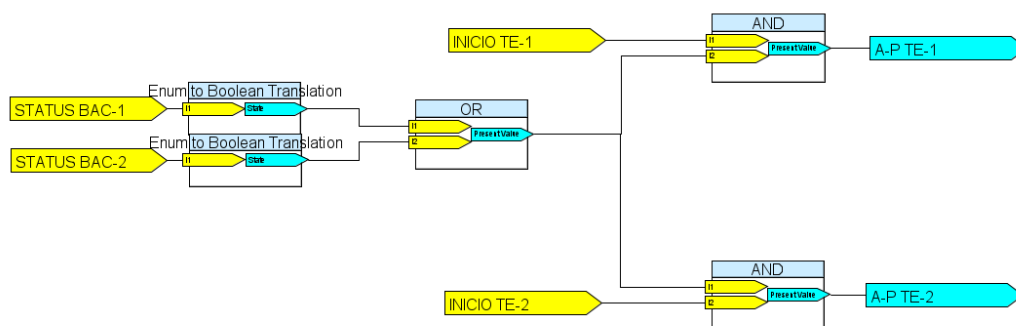


Ilustración 26 Lógica de torres de enfriamiento. Fuente: Autor.

VDF TE-1-2: función PID que controla la velocidad del ventilador de la torre dependiendo de la retroalimentación del sensor de temperatura en el suministro de agua de condensación y el setpoint deseado. Solo se habilita cuando cualquiera de las torres está en funcionamiento, ver ilustración 23.

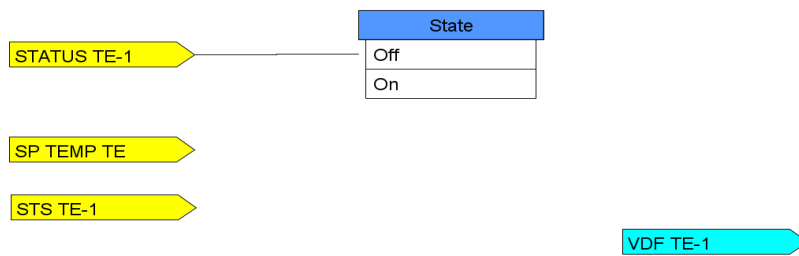


Ilustración 27 Lógica para el control del ventilador. Fuente: Autor.

Estructura del programa

En la ilustración 28 se muestra la estructura principal de la lógica de control, cada numeración se relaciona de la siguiente manera: 1. Entradas internas. 2. Entradas externas. 3. Lógica de control (sub-programas). 5. Salidas internas. 6. Salidas externas. Por ejemplo, la variable inicio del sistema – 1 setea los valores iniciales de operación, momento en el que el sistema queda a la espera alguna señal externa para ejecutar cualquiera de los modos de operación programados para el sistema de enfriamiento. Estas variables externas son recibidas por la lógica de control, cada uno de estos programas corresponde a los subprogramas mostrados desde la ilustración 13 hasta la ilustración 28. En el área 3 de la ilustración 28 se observa los distintos subprogramas de seteo (derecha) los subprogramas de ejecución (medio) y las salidas de los subprogramas. Estas a su vez permitirán la ejecución de las salidas tanto internas como externas para el funcionamiento del sistema.

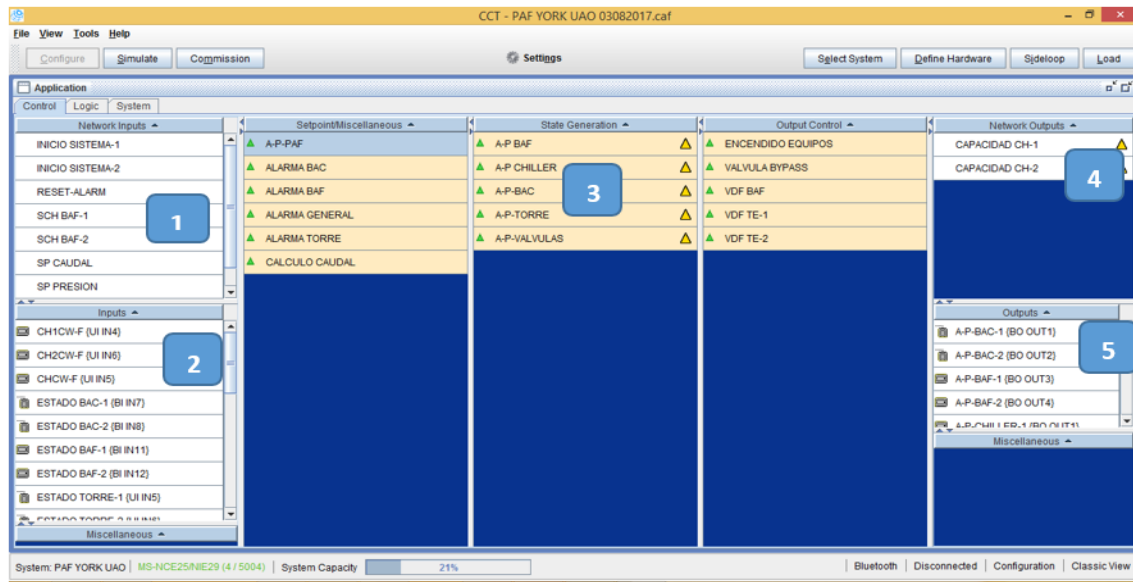
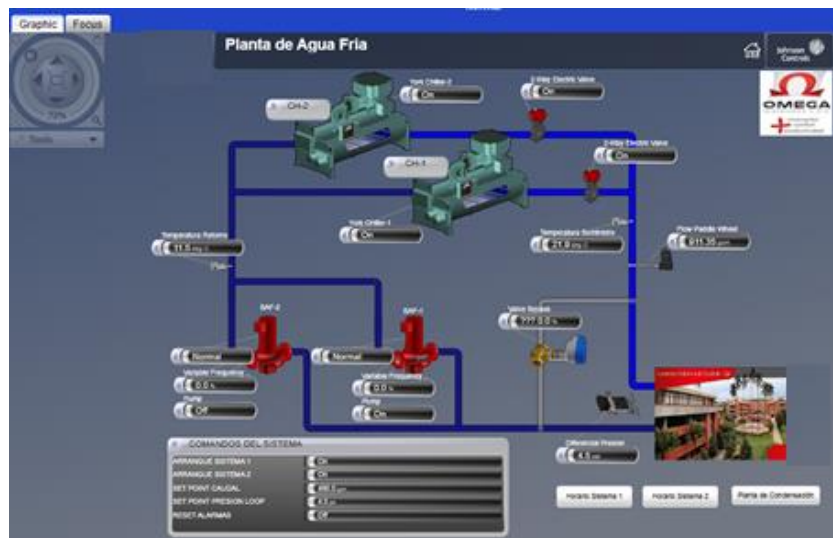


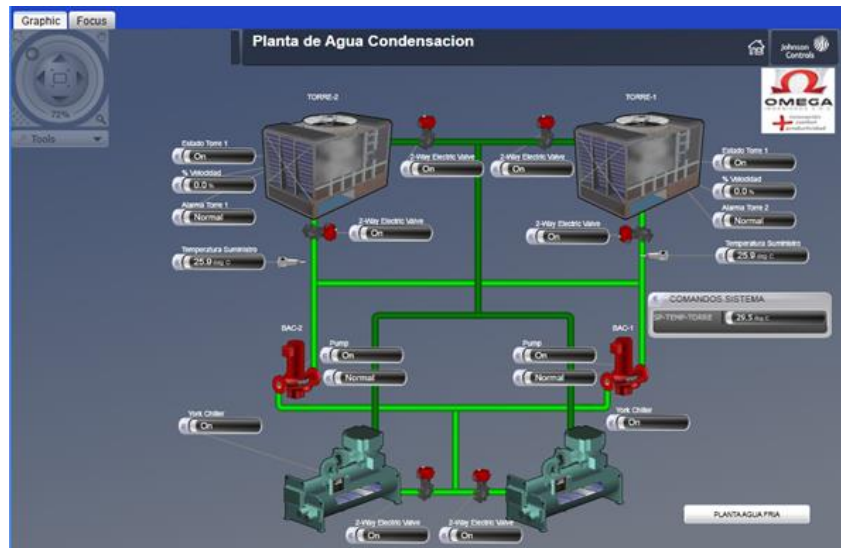
Ilustración 28 Interfaz del software. 1. Entadas internas. 2. Entradas externas. 3. Lógica de control (sub-programas). 4-5. Salidas internas y Salidas externas.

4.2.3. Interfaz gráfica

En la Ilustración 24 se presentan las interfaces diseñadas para monitorear y controlar desde un computador el sistema agua fría (a) y sistema de condensación (b), considerando la arquitectura de comunicación descrita en Ilustración 11. Se puede observar la distribución de sensores y válvulas, además de los chillers, las torres de enfriamiento y sus valores de configuración.



(a)



(b)

Ilustración 29 Interfaz gráfica, (a) Sistema de agua fría, (b) Sistema de condensación. Fuente: Autor.

5. COMPONENTES DE LA ESPECIFICACIÓN PLANTEADA.

En este capítulo se presenta la definición de la operación del sistema, identificación e instalación de los elementos mínimos que permiten una operación de los equipos que hacen parte de la actualización de la planta de agua helada como Chiller, torres de enfriamiento, bombas, etc.

5.1. Selección del chiller.

Para la selección del chiller se hizo una tabla comparativa de los equipos ofertados por las diferentes empresas. Fueron cuatro equipos ofertados, los cuales cumplían los requerimientos mínimos de funcionamiento. De estos equipos se compararon las eficiencias, capacidades y consumo energético, según la información brindada por los proveedores (Ver Tabla 8).

Tabla 8. Tabla comparativa entre chiller de distintas marcas. Fuente: Autor

Referencia	York		Carrier		TRANE		DAIKIN	
	Capacidad	Eficiencia	Capacidad	Eficiencia	Capacidad	Eficiencia	Capacidad	Eficiencia
100%	250	0,6542	256,1	0,644	250	0,624	247,1	0,6107
90%	225	0,6285	230,49	0,619			222,4	0,5391
80%	200	0,6084	204,88	0,575			197,7	0,4569
75%					187,5	0,592	185,3	0,4259
70%	175	0,593	179,27	0,55			173,0	0,3981
60%	150	0,5836	153,66	0,529			148,3	0,351
50%	125	0,582	128,05	0,511	125	0,57	123,6	0,3123
40%	100	0,5938	102,44	0,524			98,8	0,305
30%	75	0,6288	76,83	0,562			74,1	0,3
25%					62,5	0,618	61,8	0,289
20%	50	0,6107	51,22	0,703			49,4	
	Notas		Notas		Notas		Notas	
	2 Compresor Tornillo VSD		1 Compresor Tornillo VSD		1 Compresor Tornillo VSD		1 Compresor Tornillo	
	Refrigerante R134A		Refrigerante R134A		Refrigerante R134A		Refrigerante R134A	
	Condicion Estandar		Condicion Estandar		Condicion Estandar		Condicion Estandar	
	Consumo 163.6 Kw		Consumo 165 Kw		Consumo 156 Kw		Consumo 152.2 Kw	
	Variador de Frecuencia		Variador de Frecuencia		Variador de Frecuencia		N/A	
	Rodamientos		Rodamientos		Rodamientos		Rodamientos	
	USA		CHINA		USA		CHINA	

Se construyó un gráfico comparativo con ayuda de estos datos, para evaluar el comportamiento de la eficiencia de cada equipo y concluir una selección adecuada (ver Ilustración 25)

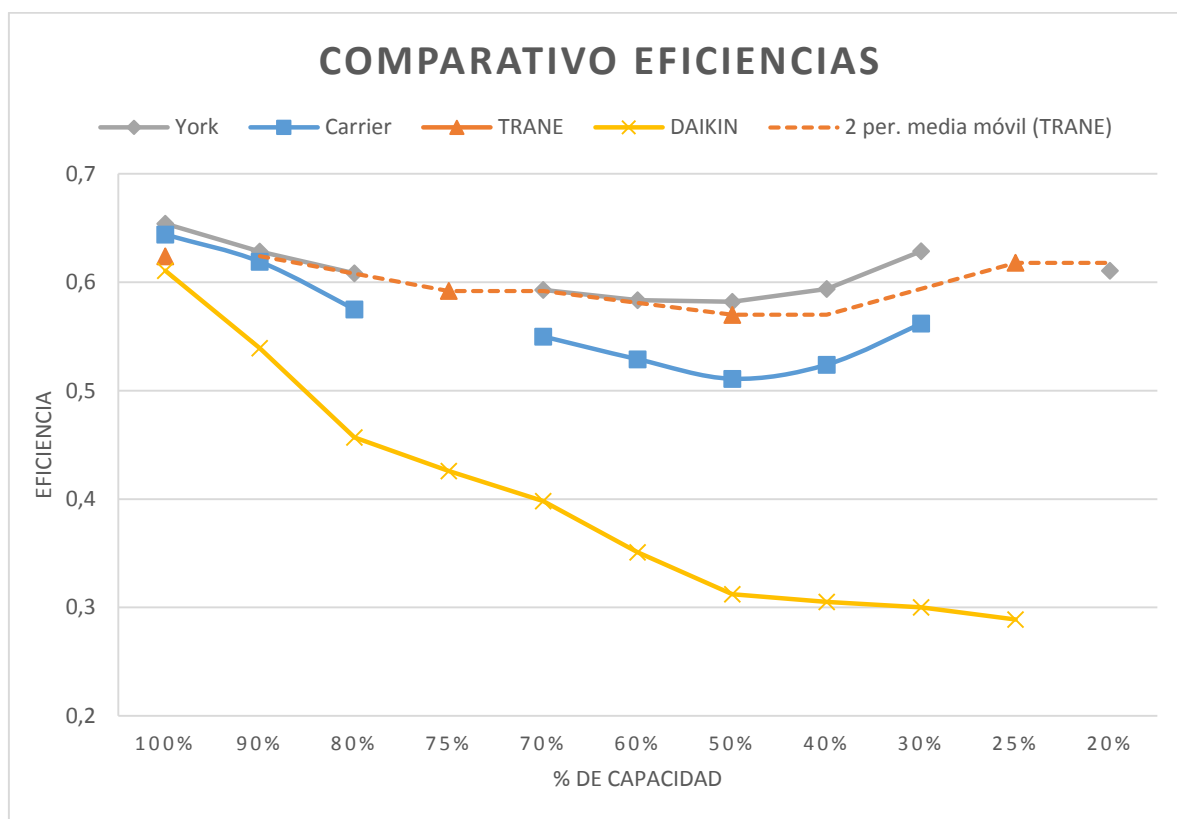


Ilustración 30. Comparativos de eficiencias de chillers. Fuente: Autor

En la Ilustración 30 se identificó que el equipo que cumple los requerimientos y tiene el mayor rendimiento ante las condiciones de operación, es el ofrecido por la empresa York. Los equipos de las empresas Trane y Carrier, se consideraron como opciones, pero para el primero, el proveedor no dio a conocer un amplio rango de valores con respecto a la capacidad vs eficiencia, por lo que no se pudieron comparar completamente. El segundo, tiene un mayor consumo de energía, para una eficiencia más baja. Como consecuencia, el equipo seleccionado fue el propuesto por la empresa York.

5.2. Selección de otros equipos.

En la Tabla 9 se observan la descripción de los equipos seleccionados para la instalación del sistema de enfriamiento en la entidad educativa de educación superior. La metodología

empleada fue similar a la empleada en la subsección 5.1 para la selección del Chiller. Se presentan los elementos seleccionados (ver Tabla 9).

Equipo Seleccionado	Descripción	Características técnicas	Imagen de referencia
Bomba TP 150-200/4 A-F-B-BAQE	Bomba de una etapa, acoplamiento cerrado y voluta con puertos de aspiración y descarga en línea de idéntico diámetro	Velocidad para datos de bomba: 1765 rpm Caudal real calculado: 1530 GPM US Altura resultante de la bomba: 52.1 ft Diámetro real del impulsor: 218 mm	
Bomba TP 150-440/4 A-F-B-BAQE	Bomba de una etapa, acoplamiento cerrado y voluta con puertos de aspiración y descarga en línea de idéntico diámetro.	Velocidad para datos de bomba: 1770 rpm Caudal real calculado: 1250 GPM US Altura resultante de la bomba: 130.5 ft Diámetro real del impulsor: 293 mm	
Torres de enfriamiento FWS-350-15	Torre de enfriamiento tipo paquete de tiro inducido y contraflujo	Caudal: 1560 GPM, - alimentación: 460 V AC, 60 Hz Nivel de ruido: 60 dB	Tensión de 
Difusor de succión	Un difusor de succión instalado entre el tubo de succión y la brida de succión	Presión máx. 175 psi 250 psi Temp. Máx de líquido 150 °F 248 °F	
Válvula combinada	Una válvula de combinada instalada entre el tubo de descarga y la brida de descarga de la bomba	Presión máx. 175 psi 250 psi Temp. Máx de líquido 150 °F 248 °F	
Sistema antivibratorio BMF 100 R - 500	Amortiguadores híbridos con topes de movimiento. Composición combinada de acero y polímeros	K Elástica: 502112 N Carga máxima: 640 Kg Frecuencia propia: 9,95 Hz Flecha: 14,3 mm	

Tabla 9. Algunos de los componentes principales del sistema de refrigeración. Fuente: Autor

5.3. Descripción del sistema de control.

El sistema de control tiene el siguiente funcionamiento de acuerdo al listado de ítems que se describen a continuación:

- Control de campo Jhonson controls NCE de 18 puntos, con capacidad de comunicación BACnet MS/TP y BACnet IP.
- Transformador de control para el NCE de 120-24VAC
- Interruptor diferencial de presión para agua, con rango de medición 0-10PSI
- Relés con sus bases a 24VAC contactos SPDT.
- Interruptores de Corriente SPLT,
- Medidor de caudal de agua de tipo turbina simple, con su kit de instalación.
- Transmisor diferencial de presión para agua, rango 0-50PSI.
- Transmisores de temperatura para inmersión en agua con sensor resistivo a 1k, vástago hasta 6”.
- Tablero de control con muletilla de 3 posiciones fijas, pilotos, soportería, canaleta, bornes, Breaker de maniobra, fusibles, bornera fusible y conexiones internas.

En el tablero de control quedara posicionado el controlador de campo NCE a la espera del estado de la muletilla de 3 posiciones fijas, ya que esta cumple la función de dar las opciones al usuario de como desea maniobrar la planta; manual, automático y un estado de apagado. Cuando el usuario elije la opción automática, entra en operación el controlador con todos sus sensores y señales de control conectados. El controlador NCE por medio de su conector BACnet IP llevara la información que tiene a su disposición a un servidor que la universidad disponga para desplegar la interfaz gráfica desarrollada exclusivamente para su planta. El usuario en esta interfaz podrá ver y ajustar variables directas del comportamiento actual de la planta, tales como; estados, puntos de ajustes, mediciones, fallas y horarios.

A continuación, una breve descripción de las entradas y salidas del controlador, las cuales serán la información que lleve el controlador a la interfaz de usuario para apreciar en el software y complementar las gráficas.

El NCE tiene como entradas:

- 1) Interruptores diferenciales de presión, los cuales cumplen la función de indicar el estado de las bombas (tanto suministro como de condensación).
- 2) Interruptores de corriente, los cuales tiene como función indicar el estado de los motores de las torres de enfriamiento.
- 3) Transmisor medidor de caudal de agua tipo turbina simple, tiene como función medir la velocidad del agua, este dato por medio de un cálculo aritmético programado en el software del controlador permite conocer el caudal de agua suministrado al sistema.
- 4) Transmisor diferencial de presión de agua con rango 0-50PSI, este medidor se debe conectar al 75% de la longitud total de la red de tubería, ya que su función es medir la presión de agua hasta dicho punto del recorrido para asegurar que le esta llegando agua fría a los equipos más alejados de la red. Además de identificar si existe fuga o taponamiento de la red debido a las variaciones de presión que se puedan presentar (fuga caída de presión, taponamiento sobre presión en la red).
- 5) Transmisores de temperatura de tipo resistivo 1K con bulbo de inmersión de 6", estos se insertarán a la entrada del Chiller (temperatura de llegada al enfriador), luego de la bomba de suministro (temperatura de salida de agua fría hacia el sistema), entrada de la torre de enfriamiento (temperatura del agua de llegada que viene del sistema para enfriar).

El motor de control de red (NCE)

Combina las capacidades de un supervisor de red y conectividad de red del Protocolo de Internet de un Network Automation Engine (NAE) con conectividad de entradas y salidas y capacidades de control digital de un Field Equipment Controller (FEC). Proporciona una solución de diseño efectivo para integrar plantas centrales y manejadoras de aire en las redes Metasys.

El NCE tiene como salidas las siguientes señales de control:

- 1) Encendido y apagado de las bombas de condensación de agua fría
- 2) Señal de control para el variador de frecuencia de las bombas de condensado
- 3) Encendido y apagado de los motores de la torre de enfriamiento

- 4) Señal de control para el variador de frecuencia de los motores de la torre de enfriamiento.
- 5) Encendido y apagado de las bombas de suministro de agua fría
- 6) Señal de control para el variador de frecuencia de las bombas de suministro de agua fría
- 7) Encendido y apagado del Chiller.
- 8) Señal de control para la válvula Bypass.

Protocolo de comunicación BACnet

Es un protocolo de comunicación de datos para la automatización de edificios y redes de control. Desarrollado bajo los auspicios de la Sociedad Americana de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), BACnet es un estándar americano nacional, una norma europea, una norma nacional en más de 30 países, y una norma ISO global. El protocolo está apoyado y mantenido por el estándar ASHRAE Permanente del Comité del Proyecto 135.

6. EVALUACIÓN DE LA ESTRATEGIA IMPLEMENTADA

En este capítulo se presentan los resultados referentes al cuarto objetivo específico. En esta etapa, se muestra el análisis de todos los resultados obtenidos en las etapas anteriores y las pruebas realizadas al sistema, se documentan y realizan los comentarios y sugerencias necesarios.

A continuación, se presentan fotos del sistema instalado. En la Ilustración 31 se presenta la planta de tratamiento de aguas instalada.



Ilustración 31. Planta de tratamiento de agua.

En Ilustración 32 se observa el PLC implementado para el control del sistema de refrigeración.



Ilustración 32. PLC implementado

En Ilustración 33 se presenta la instalación de las bombas de agua de alimentación del Chiller



Ilustración 34. PLC implementado

Ilustración 34. Bombas de agua de alimentación del Chiller. por último, en Ilustración 35 se presenta la torre de enfriamiento.



Ilustración 35. Chiller instalado.

3.3. Mediciones del sistema anterior

En la Tabla 10 se presentan las mediciones tomadas durante un día de trabajo del sistema de refrigeración anterior. Se puede observar el registro de las temperaturas de entrada y salida del Chiller 1 y 2, su caudal individual y total, así como su capacidad en toneladas de refrigeración a lo largo del día. Finalmente, se observa el consumo energético por tonelada de refrigeración.

Fecha	Hora	Max TON de refrig. (210TR) %	Toneladas refrigeradas	KWH/TR. consumo
03-sep	8:23	88,2	185,22	1,09
03-sep	9:28	88,2	185,22	1,01
03-sep	10:30	88,7	186,27	1,13
03-sep	11:27	88,7	186,27	1,14
03-sep	14:30	88,7	186,27	1,21
03-sep	15:30	88,7	186,27	1,18
03-sep	16:30	88,7	186,27	1,15
03-sep	17:30	88,7	186,27	1,14
06-sep	7:30	100	210	1,09
06-sep	9:15	77,6	162,96	1,07
06-sep	13:30	38,8	81,48	1,22
06-sep	14:35	38,8	81,48	1,19
06-sep	15:38	100	210	1,18

06-sep	16:31	88,7	186,27	1,2
06-sep	17:38	77,6	162,96	1,12
09-sep	9:00	77,6	162,96	1,06
09-sep	10:00	77,6	162,96	1,1
09-sep	11:15	77,6	162,96	1,12
09-sep	12:05	77,6	162,96	1,14
09-sep	14:30	77,6	162,96	1,12
09-sep	15:30	77,6	162,96	1,13
09-sep	16:30	77,6	162,96	1,12
09-sep	17:30	77,6	162,96	1,1
			164,35125	1,13

Tabla 10 Toma de datos sistema anterior. Fuente: Autor.

3.4. Mediciones del sistema propuesto

En la Tabla 11 se presentan las mediciones tomadas durante un día de trabajo del sistema de refrigeración propuesto. Se puede observar el registro de las temperaturas de entrada y salida del Chiller 1 y 2, su caudal individual y total, así como su capacidad en toneladas de refrigeración a lo largo del día. Finalmente, se observa el consumo energético por tonelada de refrigeración.

Time	Caudal CH-1 (gpm)	Caudal CH-2 (gpm)	Capacidad Ch-2. TR	Capacidad Ch-1. TR	KWH	KWH/TR
5:30:00 AM COT	234.08	470.03			1.658	
6:00:00 AM COT	279.73	726.33	154,34		161,77	1,05
6:30:00 AM COT	269.83	738.68	160,09		165,36	1,03
7:00:00 AM COT	423.73	455.19	87,25		197,92	2,27
7:30:00 AM COT	456.06	456.22	76,04	32,3	204,93	1,89
8:00:00 AM COT	433.91	427.19	101,43	108,8	212,32	1,01
8:30:00 AM COT	446.68	471.75	131,7	130,22	272,39	1,04
9:00:00 AM COT	437.49	477.65	145,28	142,18	220,86	0,77
9:30:00 AM COT	450.00	496.88	153,2	151,88	232,9	0,76
10:00:00 AM COT	473.85	468.29	138,53	146,1	226,9	0,80
10:30:00 AM COT	448.74	502.58	144,49	134,5	217,68	0,78
11:00:00 AM COT	456.51	499.97	129,15	123,64	209,54	0,83
11:30:00 AM COT	464.35	463.53	117,69	125,76	231,61	0,95

12:00:00 PM COT	474.42	467.14	136,25	144,3	239,31	0,85
12:30:00 PM COT	465.35	467.12	126,51	135,73	226,47	0,86
1:00:00 PM COT	439.69	471.34	133,55	131,91	214,92	0,81
1:30:00 PM COT	471.86	486.67	127,75	131,7	209,4	0,81
2:00:00 PM COT	466.43	487.61	134,09	134,1	214,27	0,80
2:30:00 PM COT	469.40	488.01	134,2	134,95	237,51	0,88
3:00:00 PM COT	466.62	491.03	132,99	128,32	227,17	0,87
3:30:00 PM COT	457.56	406.31	122,75	129,61	245,25	0,97
4:00:00 PM COT	452.84	468.72	124,99	132,08	249,28	0,97
4:30:00 PM COT	472.11	495.19	138,37	137,7	212,7	0,77

Tabla 11. Toma de datos sistema propuesto. Fuente: Autor

3.5. Comparación de sistema anterior y propuesto

Con los datos registrados en la Tabla 10 y la Tabla 11. se construyó una gráfica comparativa entre el sistema anterior y el sistema propuesto de refrigeración implementado. En la Ilustración 35 se presentan cuatro líneas, tres de las cuales corresponden a las mediciones registradas con el antiguo sistema a lo largo de los días 3, 6 y 9 de septiembre. La otra línea corresponde a los datos registrados el 17 de septiembre del nuevo sistema.

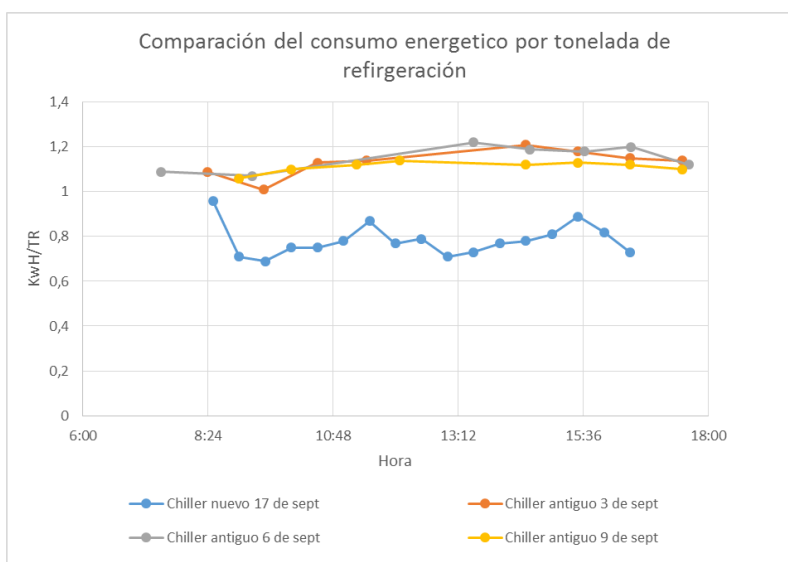


Ilustración 35. Comparativo energético por tonelada de refrigeración entre el sistema antiguo y el propuesto.

En la gráfica se puede observar la disminución del consumo energético con el sistema propuesto. El consumo máximo en el sistema propuesto se presenta al momento iniciar la operación de refrigeración, alcanzando un valor de 1 kW hora por tonelada refrigerada. Por

su parte, el sistema anterior el consumo energético osciló entre 1.1 y 1.2 Kw, superior al consumo del sistema propuesto

Como consecuencia, abordaje de refrigeración propuesto en el contexto de este proyecto de grado presenta un mejor rendimiento energético en comparación con el antiguo sistema de refrigeración.

7. CONCLUSIONES

Este capítulo se compone de dos secciones, la primera presenta las conclusiones relevantes obtenidas en este proyecto. La segunda sección detalla los trabajos futuros que servirán de base a otras iniciativas.

7.1. Conclusiones

- Se diseñó una estrategia de control para un sistema de acondicionamiento de aire con bombeo primario variable de agua fría con capacidad de 500 toneladas de refrigeración para una entidad educativa de educación superior.
- Se caracterizaron los requerimientos funcionales y restricciones del sistema usando técnicas de mapeo. Esta caracterización permitió definir dos modos de operación, las variables a medir e identificar los requisitos funcionales mínimos. Es decir, el abordaje estructurado permitió definir claramente la necesidad planteada en términos del proceso de diseño
- Se planteó una arquitectura con una estructura distribuida, orientada a la ejecución autónoma de las tareas de cada uno de los ciclos del sistema de enfriamiento. Dónde, la ejecución de las tareas y la gestión de los recursos de cada ciclo del proceso se asignó a un dispositivo de control. Se establecieron los flujos de información y la secuencia de órdenes entre los diferentes componentes del Chiller, siguiendo la estructura distribuida previamente planteada, definiéndose el sistema de comunicación de la planta. Esta estructura ofrece ventajas respecto a la anterior, debido a que su configuración y flexibilidad permiten incrementar la efectividad del control, satisfacer la demanda energética total solicitada y reduce el consumo de energía, en consecuencia, disminuye los costos asociados al sistema de refrigeración.
- Considerando la arquitectura propuesta y los requerimientos funcionales del sistema, se detallaron los componentes principales que conforman el sistema de enfriamiento. Para ello se hizo uso de técnicas de decisión, como las matrices de decisión para seleccionar los equipos para la configuración planteada. A partir de

esta arquitectura se estructuró un procedimiento que soporta la selección de los equipos seleccionados para el sistema de enfriamiento.

- Se implementó la estrategia de control y se evaluó el consumo energético por tonelada de refrigeración, comparado el sistema propuesto en este proyecto con el sistema anterior. Se observó una disminución del consumo energético con el nuevo sistema. El consumo es máximo al momento de iniciar el sistema, pero se observa que no sobrepasa 1 kW hora por tonelada refrigerada, a diferencia del sistema anterior en el que el consumo energético es superior o igual a este valor

7.2. Trabajos futuros

- Este proyecto puede utilizarse como base para la implementación de sistemas similares en otras entidades de la región, donde la demanda energética no sea satisfecha por sistema actual.
- El sistema de enfriamiento podría integrar tecnologías híbridas que utilicen energías renovables para disminuir el impacto ambiental del sistema de enfriamiento.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

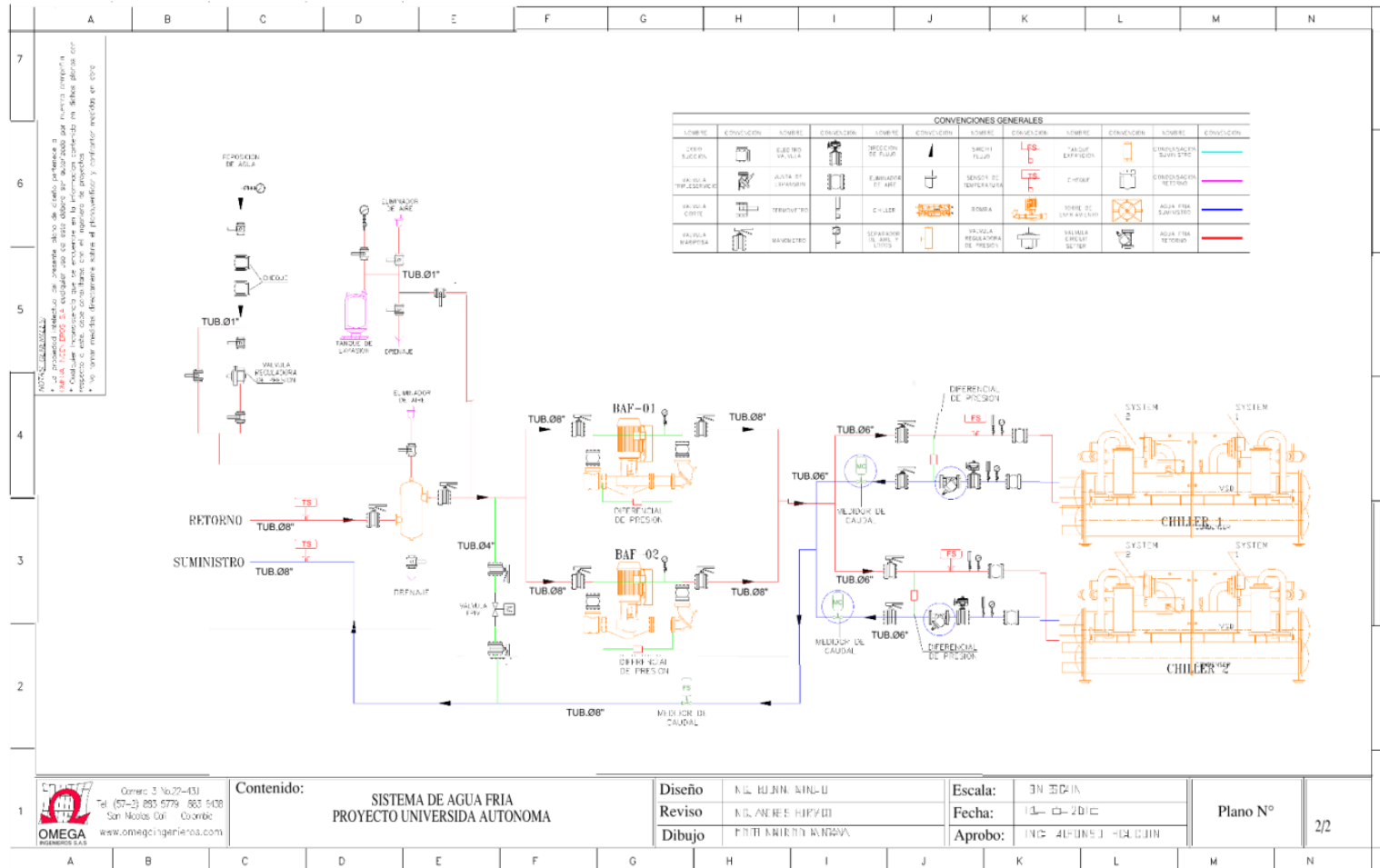
- [1] J. C. A. Valdés, D. Margarita, L. Rodríguez, A. Mario, Á. G. Plasencia, and S. M. Hernández, “Análisis comparativo de estrategias de operación en sistemas de climatización centralizados por agua helada,” 2012.
- [2] C. Navarrete Rodríguez and E. M. Barzola, “Diseño e Implementación de un Sistema de Bombeo de Aguas Residuales para una Urbanización.”
- [3] J. C. L. García, “Un edificio verde es un edificio inteligente.,” *A green Build. is an Intell. Build.*, vol. 4, no. 1, pp. 61–75, 2009.
- [4] S. Korotkin, G. Zaidner, B. Cohen, A. Ellenbogen, M. Arad, and Y. Cohen, “A Petri Net Formal Design Methodology for Discrete-Event Control of Industrial Automated Systems,” no. II, pp. 431–435, 2010.
- [5] H. W. I. Stanford, *HVAC Water Chillers and Cooling Towers: Fundamentals, Application, and Operation*, vol. 27. 2003.
- [6] S. K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. 2000.
- [7] Sinan Si Alhir, *Guide to applying the UML*. Ner York, 2002.
- [8] B. Bordbar, L. Giacomini, and D. Holding, “Design of distributed manufacturing systems using UML and Petri nets,” *Proc. 6th Int. ...*, vol. 44, no. 0, 2000.
- [9] G. Booch, J. Rumbaugh, and I. Jacobson, *The Unified Modeling Language User Guide*. Addison Wesley, 1999.
- [10] Popkin Software and Systems, “Modelado de Sistemas com UML Popkin Software and Systems,” 2002.
- [11] “Use Case Diagram - UML 2 Diagrams - UML Modeling Tool.” [Online]. Available: <http://www.visual-paradigm.com/VPGallery/diagrams/UseCase.html#actor>. [Accessed: 14-Jul-2014].
- [12] L. Gomes, “Diagramas de estado,” pp. 1–15, 2002.
- [13] J. H. Quiroz, “Control Industrial Hacia un concepto moderno de la Automatización

Industrial.”

- [14] American Society of Heating refrigerating and air conditioning Engineers, *ASHRAE HANDBOOK*. 1992.
- [15] E. Carbonell, “Automatización de los Sistemas de Aire Acondicionado de una Empresa de cosméticos,” UCV, 2000.
- [16] J. F. Becerra L and H. García, “Automatización , Control Y Supervisión Remota Del Sistema Central De Aire Acondicionado (Agua Helada) Para Un Edificio Trabajo Especial De Grado Automatización , Control Y Supervisión Remota Del Sistema Central De Aire Acondici,” pp. 1–104, 2007.
- [17] P. Bravo, “AUTOMATIZACION DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO (HVAC) PARA EL CUARTO PISO DEL EDIFICIO J TORRE NORTE Y TORRE SUR DE LA UPB BUCARAMANGA,” 2016.
- [18] C. A. ROJAS GALLARDO, “MODELADO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SECUNDARIO EMPLEANDO REDES DE PETRI COLOREADAS DESDE UN ENFOQUE DE SISTEMAS DE MANUFACTURA DISTRIBUIDOS.,” 2014.
- [19] ASHTRAE 55, “Thermal comfort in practice. Indoor air.” p. 32–39., 2004.
- [20] CBG Ingeniería, “EVALUACION DEL DESEMPEÑO ACONDICIONADO EDIFICIO CENTRAL UNIVERSIDAD AUTONOMA.” Cali, Colombia, pp. 1–16, 2015.
- [21] CBG Ingeniería, “Ingeniería de detalle para la actualización del sistema de agua fría para el edificio central.” Cali, Colombia, pp. 1–26, 2016.

9. ANEXOS

Anexo 1 disposición de los Instrumentos de regulación de fluidos y sensores para el sistema de agua fría



Anexo 2 Disposición de los Instrumentos de regulación de fluidos y sensores para el sistema de condensación

