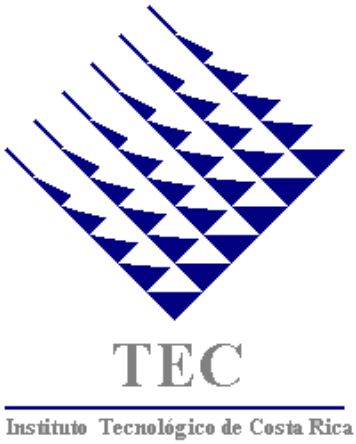
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Diseño e implementación de la automatización de un sistema de aire acondicionado

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

Mauricio Alvarado Bolaños

Cartago, junio de 2006

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

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

Miembros del Tribunal

Ing. William Marín Moreno
Profesor lector

TEC
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica

Ing. Carlos Badilla Corrales
Profesor asesor

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

Cartago, 19 de junio del 2006

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

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

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

Cartago, 19 de junio del 2006 _____

Mauricio Alvarado Bolaños
Cédula: 2 – 528 – 844

Resumen

La mayor parte del tiempo el ser humano pasa en ambientes cerrados, por lo tanto, le conviene contar con una correcta calidad del ambiente laboral en el interior de los edificios, ya que eso influirá directamente reduciendo el absentismo y aumentando la productividad de los empleados, así como la sensación de confort. Por lo general, hay que recurrir a los sistemas de acondicionamiento de aire para que las condiciones térmicas del ambiente y las de confort coincidan.

Esto representa un problema en cualquier industria en donde labora mucho personal y hay presencia de gran cantidad de maquinaria; aquí se debe seguir una metodología para evaluar las necesidades de los usuarios del sistema de aire acondicionado (empleados): definir zonas de acondicionamiento, cálculo de cargas térmicas y requerimientos de aire acondicionado.

A causa de que las cargas térmicas en los edificios varían con el tiempo, debe haber controles que regulen las salidas del sistema para mantener la situación de un buen estado ambiental en interiores bajo todas las condiciones predecibles y con el menor costo posible a lo largo de todo su ciclo de vida, ya que de no existir este control, el entorno adecuado de trabajo para el personal, no sería posible el buen desempeño de los empleados y por consiguiente tampoco para los procesos industriales.

El proyecto lo que persigue, es diseñar e implementar un control para el sistema de aire acondicionado para un sector de la planta Kimberly-Clark de Costa Rica, por medio de un control encendido/apagado y otro que va a controlar gradualmente la temperatura del aire circundante en la planta mediante el uso de herramientas matemáticas, de ingeniería y de control automático.

Palabras claves: sistema de aire acondicionado, unidades centrales de aire, bomba centrífuga, PLC, variador de frecuencia, control automático, confort ambiental, cargas térmicas, automatización, modelado matemático, temperatura.

Abstract

Most the time the human being passes in closed environments, and therefore, it agrees to have a correct quality of the labor environment in the interior of the buildings, that will influence directly reducing the absenteeism and enlarging the productivity of the employees, as well as the sensation of comfort. Generally, one must resort to the systems of air conditioning so that the thermal conditions of the environment and those of comfort coincide.

This represents a problem in some industries where work a lot of personnel and there is presence of great quantity of machinery; here should continue a methodology to evaluate the needs of the users of the air conditioning system (employed): to define zones of conditioning, calculation of thermal loads and requests of conditioning air.

On account that the thermal loads in the buildings vary with time, there should be controls that regulate the system exits to maintain the situation of good environmental state in interiors under all the predictable conditions and with the smaller possible cost along all its cycle of life, since of exist not this control, the adequate environment of work for the personnel, would not be good performance of the employees and consequently neither for the industrial processes.

The project what pursues, is to design and to implement a control for the system of air conditioning for a sector in the Kimberly-Clark Costa Rican plant, through an ON/OFF control and another that is going to control gradually the temperature in the surrounding plant air by means of the use of hardly tools math, engineering and automatic control.

Keywords: air conditioning system, air drivers, centrifuge bomb, PLC, frequency variator, automatic control, environmental comfort, thermal loads, automatization, mathematical model, temperature.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 16
1.1 Problema existente e importancia de su solución 17
1.2 Solución seleccionada 23
CAPÍTULO 2: META Y OBJETIVOS 28
2.1 Meta 28
2.2 Objetivo general 28
2.3 Objetivos específicos 28
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO 31
3.1 Descripción del sistema a mejorar 31
3.2 Antecedentes bibliográficos 38
***3.2.1 Sistemas de aire acondicionado* 38**
3.2.2 Confort ambiental en el trabajo 42
3.3 Descripción de los más importantes principios relacionados con la solución del problema 48
3.3.1 Principios de transferencia de calor y flujo 48
3.3.1.1 Principio de funcionamiento de un "chiller" 50
3.3.1.2 Principio de funcionamiento de unas torres de enfriamiento 51
3.3.1.3 Principio de funcionamiento de un separador de aire 52
3.3.1.4 Principio de funcionamiento de una unidad central de aire 53
3.3.1.5 Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga 55
3.3.2 Principios físicos 57
3.3.3 Principios de "software" 59
3.3.3.1 Principios de "software" para un PLC 60
3.3.3.2 Principios de "software" para una pantalla de tacto 64
3.3.4 Principios electrónicos 65
CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO 72
4.1 Reconocimiento y definición del problema 72
4.2 Obtención y análisis de información 75
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución 79
4.4 Implementación de la solución 80
4.4.1 Control encendido/apagado 82

4.4.2 Control de enfriamiento del aire según el nivel de temperatura 83
4.5 Reevaluación y rediseño 87
CAPÍTULO 5: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN 88
5.1 Modelado de la planta 88
5.2 Cálculo de cargas térmicas 92
5.2.1 Calor generado por el alumbrado del local 93
5.2.2 Calor generado por personas 94
5.2.3 Calor generado a través de paredes 96
5.2.4 Calor generado a través de techos 104
5.2.5 Calor generado a través de cortinas 105
5.2.6 Calor generado a través de tragaluces 107
5.2.7 Calor generado por máquinas o motores 109
5.2.8 Calor generado debido a tanques de adhesivos 110
5.2.9 Infiltración 111
5.2.10 Ventilación 113
5.2.11 Transferencia de calor a los alrededores 114
5.2.12 Resultados Obtenidos 116
5.3 Análisis de soluciones y selección final 117
5.4 Descripción del "hardware" 119
5.4.1 Descripción de sensor de temperatura 125
5.4.2 Descripción de transmisor de corriente 127
5.4.3 Descripción de módulo de entradas analógicas 128
5.4.4 Descripción de PLC 130
5.4.5 Descripción de módulo de salidas de relé 134
5.4.6 Descripción de válvulas de tres vías 135
5.4.7 Descripción de módulo de salidas analógicas 137
5.4.8 Descripción de variador de frecuencia 138
5.4.9 Descripción de bomba centrífuga 141
5.5 Descripción del "software" 143
5.5.1 Descripción de "software" para la utilización de válvulas de tres vías 143

5.5.2 Descripción de "software" para la bomba que varía el flujo de agua a través del sistema de tuberías 146

5.5.3 Descripción de "software" para la pantalla de tacto 148

5.6 Diseño del regulador en tiempo discreto 150

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS 159

6.1 Resultados 159

6. 2 Análisis 168

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 171

7.1 Conclusiones 171

7.2 Recomendaciones 172

BIBLIOGRAFÍA 173

APÉNDICE 179

A.1 Glosario y abreviaturas 179

A.2 MANUAL DE USUARIO 182

A.3 Información sobre la empresa 190

A.3.1 Descripción de la empresa 190

A.3.2 Descripción del departamento en el que se realizó el proyecto 191

A.3.3 Antecedentes prácticos 192

A.4 Hoja de información del proyecto 194

A. 5 Tablas generales para cálculos de carga térmica en la nave 108 de la planta 196

A. 6 Tablas generales para cálculos de modelado matemático y regulador de planta 206

ANEXOS 209

B.1 Datos de técnicos del variador de frecuencia 209

B.2 Datos de técnicos del sensor de temperatura 210

B.3 Datos de técnicos del motor trifásico 211

B.4 Promedios mensuales de datos climáticos en el sector de la planta 212

B.5 Datos técnicos del "chiller" 213

B.6 Datos de técnicos del actuador de las válvulas de tres vías 215

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama del sistema de aire acondicionado de la planta de pañales 18
Figura 1.2 Modificación al sistema actual de tuberías según la solución proyectada por la empresa para el control encendido/apagado 26
Figura 1.3 Camino que seguiría el flujo de agua en caso de activarse las válvulas de tres vías 27

Figura 3.1 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 y 108 33
Figura 3.2 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 (primer acercamiento de izquierda a derecha en la figura 3.1) 34
Figura 3.3 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 (segundo acercamiento de izquierda a derecha en la figura 3.1) 35
Figura 3.4 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 (tercer acercamiento de izquierda a derecha en la figura 3.1) 36
Figura 3.5 Plano físico del sistema de ductos de la nave 107 37
Figura 3.6 Ciclo de compresión del vapor 38
Figura 3.7 Ejemplo de un sistema de aire acondicionado tipo “split” enfriado por aire 39
Figura 3.8 Ejemplo de un sistema de aire acondicionado tipo “chiller” enfriado por aire 40
Figura 3.9 Ejemplo de un sistema de aire acondicionado tipo “chiller” enfriado por agua 41
Figura 3.10 Aislamiento térmico de la ropa para varios niveles de confort a una temperatura dada 47
Figura 3.11 Principio de funcionamiento de una torre de enfriamiento 52
Figura 3.12 Separador de aire de vórtice o remolino 53
Figura 3.13 Representación esquemática de una unidad central de aire 54
Figura 3.14 Curva de una bomba centrífuga que muestra los datos sobre el rendimiento a 1750 RPM 56

Figura 3.15 Lógica de escalera para el arranque de un motor 61
Figura 3.16 Algunas instrucciones básicas de un PLC 61
Figura 3.17 Algunas instrucciones expandidas de un PLC 62
Figura 3.18 Programación en bloques funcionales para el control de un proceso de perforación por medio de un taladro 63
Figura 3.19 Diagrama de conexión entre puertos de la pantalla de tacto y la computadora 64
Figura 3.20 Niveles de automatización 68
Figura 3.21 Sistema dinámico con sus diferentes entradas y salidas 69

Figura 4.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mediante control encendido/apagado 83
Figura 4.2 Esquema de dimensiones de máquina, personal y ubicación de sensores en los puntos A y B 84
Figura 4.3 Diagrama de funcionamiento del sistema mediante control de enfriamiento del aire según el nivel de temperatura 85

Figura 5.1 Dimensiones de la nave 108 de la empresa Kimberly-Clark 96
Figura 5.2 Dimensiones de tres naves de la empresa Kimberly Clark 96
Figura 5.3 Dimensiones generales para la pared sur 98
Figura 5.4 Dimensiones generales para la pared norte 99
Figura 5.5 Dimensiones generales para la pared oeste 101
Figura 5.6 Dimensiones generales para la pared este 102
Figura 5.7 Dimensiones generales del techo en una nave 104
Figura 5.8 Dimensiones generales de un tanque de adhesivo 110
Figura 5.9 Controlador de temperatura a nivel general con dos soluciones 119
Figura 5.10 Diagrama de bloques de segundo nivel para la solución al problema 120
Figura 5.11 Diagrama detallado de dispositivos involucrados en la solución a nivel de “hardware” 122

Figura 5.12 Diagrama de cuarto nivel con todos los dispositivos involucrados en el diseño de "hardware" 124
Figura 5.13 Diagrama físico de sensor de temperatura TE – 6337P – 1 126
Figura 5.14 Diagrama eléctrico de la conexión del transmisor de corriente TQ – 6000 – 1 al sensor de temperatura y a su respetiva alimentación 127
Figura 5.15 Circuito de corriente de entrada para un canal del módulo 1746 – NI8 129
Figura 5.16 Vista lateral y frontal del CPU del PLC SLC 5 / 04 131
Figura 5.17 Vista frontal de estructura y medidas del chasis del PLC 132
Figura 5.18 Diagrama físico de la fuente de alimentación para el PLC 132
Figura 5.19 Diagrama eléctrico de alimentación al panel de control del sistema de aire acondicionado 133
Figura 5.20 Circuito eléctrico para un canal de un módulo de salidas de relé 134
Figura 5.21 Esquema eléctrico del módulo de salidas de relé 1746 – OW16 135
Figura 5.22 Vistas de válvulas de tres vías utilizadas en el proyecto con su respectivo actuador 136
Figura 5.23 Diagrama eléctrico de actuador de válvulas de tres vías 137
Figura 5.24 Configuración eléctrica de canales para módulo de salidas analógicas 1746 – NO4I 137
Figura 5.25 Circuito de corriente de salida para un canal del módulo 1746 – NO4I 138
Figura 5.26 Configuración de circuito interno de variador de frecuencia con 480 VAC de alimentación 139
Figura 5.27 Esquema de entradas y salidas para el variador de frecuencia CIMR – E7U4030 140
Figura 5.28 Vista interna de una bomba centrífuga con una sola entrada y con acoplamiento flexible 142
Figura 5.29 Vista de la bomba centrífuga utilizada para impulsar agua hacia la nave 108 142

Figura 5.30 Diagrama de flujo de la subrutina de “software” implementada para la pantalla de tacto en cuanto al control de las válvulas de tres vías 144
Figura 5.31 Diagrama de flujo de la subrutina de “software” implementada para la pantalla de tacto en cuanto al control de la bomba centrífuga 147
Figura 5.32 Diagrama de flujo de la subrutina principal de la pantalla de tacto 148
Figura 5.33 Menú principal del sistema de aire acondicionado mostrado por la pantalla de tacto 149
Figura 5.34 Gráfica del comportamiento deseado del sistema luego de haber implementado el regulador 151
Figura 5.35 Esquema básico en diagrama de bloques de lo deseado para regular el sistema de aire acondicionado de la planta 152
Figura 5.36 Esquema en diagrama de bloques de lo deseado para regular el sistema de aire acondicionado utilizando una función de transferencia para la planta 154
Figura 5.37 Esquema en diagrama de bloques del sistema con su respectiva regulación 157

Figura 6.1 Gráfica del desempeño del sistema de aire acondicionado sin automatizar 161
Figura 6.2 Gráfica del desempeño del sistema de aire acondicionado una vez automatizado el sistema apagando el “chiller” a las doce de la noche 164
Figura 6.3 Gráfica del desempeño del sistema de aire acondicionado una vez automatizado el sistema 165

Figura A.2.1 Menú principal de la pantalla de tacto 182
Figura A.2.2 Menú para observar el nivel de temperatura en cada una de las máquinas productoras de pañales 183

Figura A.2.3 Pantalla de restricción para ingreso a control de válvulas de tres vías y bomba de “JOA´s” 184
Figura A.2.4 Pantalla para colocarle un punto de referencia al nivel de temperatura en las máquinas CAI – 01 y CAI – 02 utilizando las válvulas de tres vías 185
Figura A.2.5 Pantalla para colocarle un punto de referencia al nivel de temperatura en las máquinas CAI – 03 y CAI – 04 utilizando las válvulas de tres vías 186
Figura A.2.6 Pantalla para indicar el uso de las válvulas de tres vías (en manual o automático) 187
Figura A.2.7 Pantalla para colocar en encendido o apagado cada una de las válvulas de tres vías 188
Figura A.2.8 Pantalla para indicar si se desea o no manipular la bomba y ponerle un punto de referencia a la misma en caso de funcionar en forma manual 189

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Comparación en cuanto a eficiencia en diferentes sistemas de enfriamiento [2] 42
Tabla 3.2 Cantidad de calor liberada en un ambiente por seres humanos en diversas actividades 43
Tabla 3.3 Generación típica de calor metabólico para diferentes actividades 46
Tabla 3.4 Resistencia térmica de la ropa según la indumentaria 47

Tabla 4.1 Lista de dispositivos capaces de detectar cambios en la temperatura permitidos y probados para utilizar en la empresa 77

Tabla 5.1 Valores correspondientes al coeficiente de transferencia de calor (U) y al área para los tragaluces 115
Tabla 5.2 Valores correspondientes al área, coeficiente de transferencia de calor (U) y longitud para las paredes 115
Tabla 5.3 Total de ganancias de calor de la nave 116
Tabla 5.4 Total de la carga sensible y latente 116
Tabla 5.5 Valores de resistencia respecto a temperatura para el sensor TE – 6337P – 1 126

Tabla 6.1 Valores de temperatura promedio en la planta ante un escalón sin automatizar el sistema de aire acondicionado 160
Tabla 6.2 Valores de temperatura promedio a nivel externo de la planta para diferentes horas y días 162
Tabla 6.3 Valores de temperatura en la planta una vez el sistema funcionando en forma automática apagando el “chiller” a las doce de la noche 163
Tabla 6.4 Valores de temperatura en la planta una vez el sistema funcionando en forma automática 164
Tabla 6.5 Valores de temperatura en la planta según la hora del día y la frecuencia con la que trabaja la bomba 166

Tabla 6.6 Valores de temperatura en la planta según la hora del día y la posición de las válvulas de tres vías en la nave 108 con un punto de referencia de 24°C 167

Tabla A.5.1 Tasas máximas recomendadas de infiltración para diseño a través de ventanas y puertas exteriores 196
Tabla A.5.2 Diferencias de conducción de carga de enfriamiento a través de un vidrio 196
Tabla A.5.3 Diferencias de temperaturas para cargas de enfriamiento (DTCE) para calcular cargas debidas a techos planos, 1°F 197
Tabla A.5.4 Diferencias de temperaturas para cargas de enfriamiento (DTCE) para calcular cargas de paredes al sol, 1°F 198
Tabla A.5.5 Descripción de grupos de construcción de paredes 199
Tabla A.5.6 Corrección de la DTCE por latitud y mes, para aplicar a paredes y techos, latitudes norte, 1°F 200
Tabla A.5.7 Tasas de ganancia de calor debidas a los ocupantes del recinto acondicionado 201
Tabla A.5.8 Requisitos de ventilación para ocupantes 202
Tabla A.5.9 Resistencia térmica de materiales aislantes y de construcción 203
Tabla A.5.10 Coeficiente global U de transferencia de calor para el vidrio 204
Tabla A.5.11 Calor generado por motores eléctricos 205

Tabla A.6.1 Tabla para obtención de modelado matemático de la planta 206
Tabla A.6.2 Tabla de datos deseados en el nivel de temperatura en la planta ante un escalón para la obtención del regulador 207

Capítulo 1: Introducción

La automatización del sistema de aire acondicionado de toda la planta Kimberly-Clark de Cartago requiere de ubicación de dispositivos que detecten el nivel de temperatura en cada sector, regulación en el nivel de enfriamiento del aire que circula dentro de la edificación y por consiguiente, nuevas instrucciones para el controlador, en todo el sistema eléctrico y en el gabinete de control principal del sistema.

Un sistema de aire acondicionado lo que busca es lograr la ambientación del lugar en donde se ubica, respecto a los requerimientos de las personas, dispositivos o productos entre otros, en la planta se encontraba automatizado un sector, mas se debió automatizar el sistema en su totalidad para un mejor desempeño del personal.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

La figura 1.1 muestra en forma esquemática los elementos de mayor trascendencia en el sistema de aire acondicionado existente en la planta. El sistema tiene medios para enfriar y distribuir aire a los diversos espacios de todo el edificio, específicamente el sector donde se ubica la BCM[1], tiene capacidad para calentar, humidificar, deshumidificar[2] y purificar el aire a diferencia del resto de la planta. El sistema introduce aire que circula en el interior de la planta, lo hace pasar por las diferentes unidades centrales de aire, éstas a su vez hacen que se crucen el caudal de aire con el de agua (el sistema de la figura 1.1 sólo muestra la trayectoria seguida por el flujo de agua), de esta forma el aire baja su temperatura y en contraparte el agua la aumenta. Sin embargo, uno de los problemas que se presentan es la necesidad de saber si realmente las cargas térmicas pueden ser anuladas por el aire de enfriamiento generado por el sistema. Ante esta situación se debió determinar el nivel de las cargas térmicas en la planta en donde se acondiciona el aire[3].

[1] Base Coast Modular. Máquina productora de pañales ubicada en la nave 107, sector automatizado con anticipo. Ver más detalles en sección A.2.3.
[2] Capacidad para sacar las partículas de CO_2 detectados en el agua del sistema.
[3] Este cálculo se lleva a cabo en la sección 5.2 del presente documento.

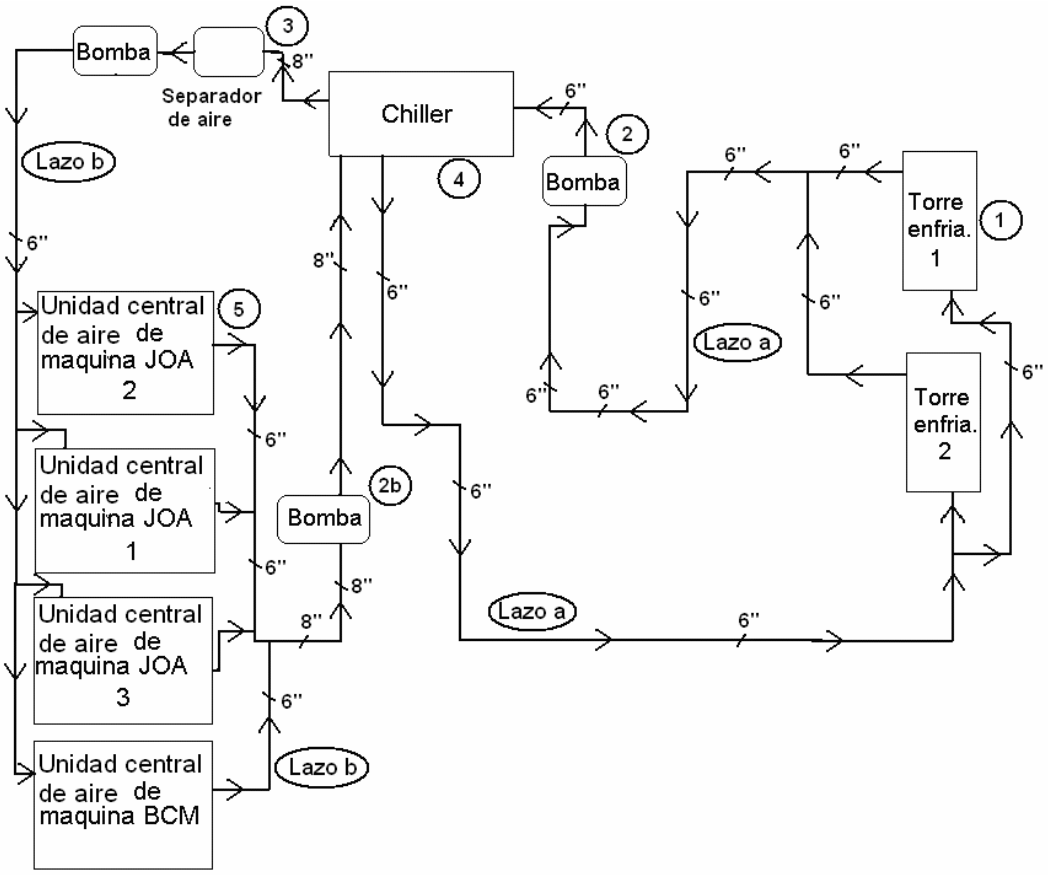


Figura 1.1 Diagrama del sistema de aire acondicionado de la planta de pañales

Descripción de la función de cada uno de los dispositivos presentes en la figura 1.1:

1: **Torres de enfriamiento (1, 2):** disipan el calor rechazado en el condensador, le sirven de soporte al "chiller" para llevar a cabo la función de enfriamiento del agua (consultar la descripción del principio de funcionamiento de unas torres de enfriamiento en apartado 3.4.1.2 y figura 3.11).

2: **Bombas centrífugas:** requeridas para el transporte de agua a través de todo el sistema hidráulico tanto en el lazo de agua fría como el de condensado (consultar la descripción del principio de funcionamiento de una bomba centrífuga en apartado 3.4.1.5 y hojas de datos en el anexo B.3).

3: **Separador de aire:** se encarga de eliminar el aire del agua en todo el sistema por medio de una técnica que utiliza la diferencia de presión entre las burbujas y el caudal de agua (consultar la descripción del principio de funcionamiento de un separador de aire en apartado 3.4.1.3).

4: **"Chiller":** realiza el ciclo de compresión del vapor, posee dos lazos, uno de agua helada (tubería de 8 pulgadas o lazo b) y otro de 6 pulgadas para el proceso de condensación designado en la figura 1.1 con la letra a (consultar la descripción del principio de funcionamiento de un "chiller" en apartado 3.4.1.1).

5: **Unidades centrales de aire:** mezclan el aire de la planta con el lazo de agua helada (lazo b) proveniente del "chiller" para llevar a cabo el proceso de enfriamiento del aire hacia la planta (consultar la descripción del principio de funcionamiento de una unidad central de aire en apartado 3.4.1.4).

Lazo a: Lazo de agua en el proceso de condensado: sirve para enfriar el agua que calienta el "chiller" en el proceso de evaporación.

Lazo b: Lazo de agua helada: se mezcla el aire con el agua, realimenta el agua para volverla a enfriar y realizar una y otra vez el ciclo.

En la figura 1.1 se observa la presencia de un dispositivo denominado “chiller” o enfriador. El calor se expulsa a la atmósfera por medio de las torres de enfriamiento. Se requieren tres bombas para hacer circular el líquido enfriador a través de las tuberías, el equipo para este caso está ubicado a una distancia considerable del equipo de acondicionamiento (ver más detalles del sistema en figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4). El lazo de agua entre las torres de enfriamiento y el “chiller” sirve para el suministro y retorno del agua de condensamiento, mientras que el lazo entre el “chiller” y las unidades centrales de aire, tiene la funcionalidad de suministro y retorno del agua helada.

Las unidades centrales de aire son cuatro en total (una para cada máquina fabricadora de pañales) y poseen cantidades diferentes de potencia para el enfriamiento, la unidad central de aire de la máquina “JOA” 3 y BCM poseen una potencia de enfriamiento de 127250 BTU / h (unidades británicas de temperatura por hora) cada una, mientras la unidad central de aire de la máquina “JOA” 2 tiene 101800 BTU / h y la de la “JOA” 1 un total de 63625 BTU / h (según características brindadas por el fabricante y la ecuación 5.29 en el apartado 5.2). La capacidad de enfriamiento del “chiller” también se debe tomar en cuenta para la capacidad de enfriamiento del sistema, en este caso específico, el “chiller” tiene una capacidad de enfriamiento de 450000 BTU / h (características del “chiller” en anexo B.5). Las bombas para la distribución de agua a través de todo el sistema también poseen diferencias en su potencia, ya que la que se designa con la letra 2b en la figura 1.1 es de una potencia de 15 HP, mientras la encargada del suministro del agua fría tiene 40 HP al igual que la del lazo a.

El problema encontrado en este sistema es que brinda aire acondicionado a toda la planta en donde labora el personal, aquí se ubican las cuatro máquinas productoras de pañales, pero a excepción de la máquina BCM (tecnología para la fabricación de pañales), no existe ningún control que regule el intercambio de calor entre el ambiente laboral y el aire de enfriamiento suministrado por cada unidad central de aire, lo cual ocasiona por las noches una gran caída en el nivel de temperatura. Sumado a la incógnita que había de si realmente el sistema logra la nulidad de exceso de cargas térmicas adecuado cuando el nivel de éstas llega a su pico máximo durante el día.

En un ambiente industrial como el presente en la empresa Kimberly-Clark, las cargas térmicas son muy elevadas debido a una gran cantidad de factores, dentro de los cuales se destacan el que se genera debido al alumbrado local, por las personas presentes en la planta, el generado a través de las paredes, techos, cortinas y tragaluces, también el presentado a causa de las máquinas o motores y tanques de adhesivos. La infiltración genera una ganancia importante en el nivel de cargas térmicas en el edificio, lo mismo que la ventilación. Sin embargo, todas las menciones anteriores se hicieron con referencia de ganancias positivas, mientras la transferencia de calor a los alrededores es el único elemento que genera ganancia térmica negativa.

El sistema de aire acondicionado es capaz de suministrar el enfriamiento suficiente para reducir las cargas térmicas en la planta, el sistema posee en su totalidad una capacidad de enfriamiento de 5692675 BTU / h, sin embargo, el “chiller” no trabaja a toda su capacidad sino que lo hace a un 66%, por lo que la capacidad de enfriamiento de todo el sistema es de 3856675 BTU / h (ver ecuación 5.29 en apartado 5.2) mientras que la carga térmica total de la planta es de 2537919.26 BTU / h (ver cálculo de carga térmica de la planta en apartado 5.2).

El sistema envía la misma cantidad de agua a través de los serpentines (dispositivos dentro de las unidades centrales de aire) independientemente del nivel de temperatura en la planta, lo cual ocasiona que los empleados reciban aire muy fresco por las noches y madrugadas, agregando una baja aún más fuerte en el aire presente debido a las condiciones climáticas, ocasionando la no prestancia de rendimiento adecuado a causa de la disconformidad con respecto a la temperatura ambiental (tensión térmica).

Con anticipo, dos estudiantes de la carrera de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en el curso proyecto de graduación durante el segundo semestre del año 2003 (para más información referente al proyecto y a los estudiantes ver apéndice A.2.3), habían realizado una etapa para solucionar este problema en una de las máquinas (BCM), lo mismo que para implementar la solución a los problemas de humedad para la nave 107[4]. Sin embargo, el sistema de control de temperatura para este sector se dañó y no ha sido reparado hasta el momento.

La solución busca realizar el control automático del flujo de agua en el sistema sólo para la nave 108, de igual forma que realizar un control de encendido/apagado en toda la planta (tanto la nave 107 como la 108).

[4] Sector en donde se ubica la máquina productora de pañales BCM, el cual no es tomado en cuenta para el desarrollo de este proyecto y sólo es una referencia de otro proyecto realizado como mejora al sistema de aire acondicionado en toda la planta.

Para evitar una situación de eventual falla, en el sistema debió implementarse una solución auxiliar – debido a lo indispensable que el ambiente permanezca en condiciones aptas – para el adecuado desempeño de sus empleados en todo momento. De esta forma, no se necesitaría que el sistema se deba deshabilitar cuando la temperatura es muy baja para sus empleados, tampoco, que cuando se dé una situación de falla en el sistema, no quede sin control del todo y exista una solución alternativa, para tener la mejor condición posible para la temperatura del aire que circula por toda la nave 108 de la planta.

Dentro de las necesidades del sistema de control se encuentra el nivel de temperatura, el cual debió permanecer casi constante según la especificación indicada por el usuario.

La estrategia de control que se implementó fue la instalación de un regulador, así se ubica al sistema en un sector en el que la mayoría del personal esté conforme con las condiciones laborales en la empresa (para una mayor productividad del mismo). El problema debió resolverse mediante un controlador industrial que permitiera su adecuado uso bajo todas las condiciones adversas presentes en el ambiente.

El sistema implementado sirvió para mejorar el medio ambiente de trabajo de sus empleados, lo cual se vio reflejado en una mejor productividad, evitó posibles resfriados en algunos de ellos y un estímulo ambiental para un mejor desempeño. También para saber el nivel de cargas térmicas y enfriamiento en la planta en caso de ubicar más en la nave 108.

1.2 Solución seleccionada

La implementación del sistema en forma automática se realizó de dos formas, una de ellas por medio de control automático con un variador de frecuencia Yaskawa (datos técnicos en anexo B.1), que controla una de las bombas de agua construidas por Bell & Gossett (datos técnicos en anexo B.3), y realiza la variación según los cambios en la temperatura de la planta.

Por medio de la acción de control encendido/apagado se realizó la segunda solución al sistema, esta es la más simple y común, por medio de detección de la temperatura se activa o desactiva el paso de agua a través de los serpentines de las unidades centrales de aire. Para llevar a cabo este proyecto se necesitaron dispositivos que detectaran cambios en la temperatura, los cuales se colocaron en lugares estratégicos de cada máquina, ya que no se encuentran en ningún sector de la nave 108 (ubicación de las tres máquinas “JOA”), mientras que en la 107 (ubicación de la máquina BCM) sólo había uno.

También se instalaron válvulas de tres vías para dejar pasar o cortar el flujo de agua; todo este equipo requirió de sus respectivas instalaciones eléctricas. Debido a que se utilizaron dispositivos de índole analógica (detectores de cambios en la temperatura), tenían que existir dispositivos que realizaran la captura y procesado de estos datos según el controlador utilizado para la automatización del sistema.

Se implementaron dos soluciones, una mediante control encendido/apagado (la cual se desarrolló primero) y que funciona como soporte en caso de fallar la principal. En cada una de las máquinas de pañales, se colocaron dos dispositivos capaces de detectar el nivel de la temperatura en los puntos en donde se ubica la mayor cantidad de empleados, este par de señales se envía hacia el dispositivo de control, el cual las procesa como datos y las asigna como variables a controlar. El control consiste en el desvío de la cantidad de fluido para que no pase por los serpentines y por consiguiente, no enfríe el aire que circula por la planta. Las señales, según la cantidad que existan en cada una de las naves, en estos casos específicos se promediaron las seis presentes en la nave 108 y las dos presentes en la nave 107.

Utilizando análisis matemático, por medio de conceptos de control para lograr la adecuada automatización del variador de frecuencia, el cual regula la velocidad de la bomba que irriga agua hacia las unidades centrales de aire de la nave 108. Como se apreció en la figura 1.1, el sistema de agua fría de la planta antes de implementar la solución poseía una bomba para enviar agua a través de todas las tuberías. Parte de la solución proyectada por la empresa, fue colocar una adicional e independizar cada nave y hacer que una enviara agua sólo para acondicionar el aire de la nave 107, mientras que la otra sólo para la nave 108; de esta manera, hubo un variador de frecuencia funcionando para cada una de las bombas por separado, previniendo el eventual caso de que una de las naves posea una gran diferencia de temperatura respecto a la otra, de esta manera se pudo lograr el control por separado de cada una, de forma tal que controla la cantidad de fluido que pasa por los serpentines de cada unidad central de aire con un regulador automático.

El nivel de cargas de enfriamiento alcanzaba para anular el nivel de los presentes en la planta, por lo que el sistema no tuvo inconvenientes en cuanto al adecuado acondicionamiento del aire en toda la nave 108.

En la figura 1.2 se puede apreciar el cambio en el sistema de tuberías con respecto a la figura 1.1, antes había sólo una bomba para enviar agua a todo el sistema. Con la solución por parte de la empresa, el lazo de agua “b” (según la figura 1.1) cambió, actualmente se utiliza una bomba para enviar agua a la BCM y otra para enviar agua a la nave 108, de esta forma, cada variador de frecuencia actúa por separado en cada una de las naves. Y se puede controlar sólo la cantidad de flujo que se envía hacia la nave 108.

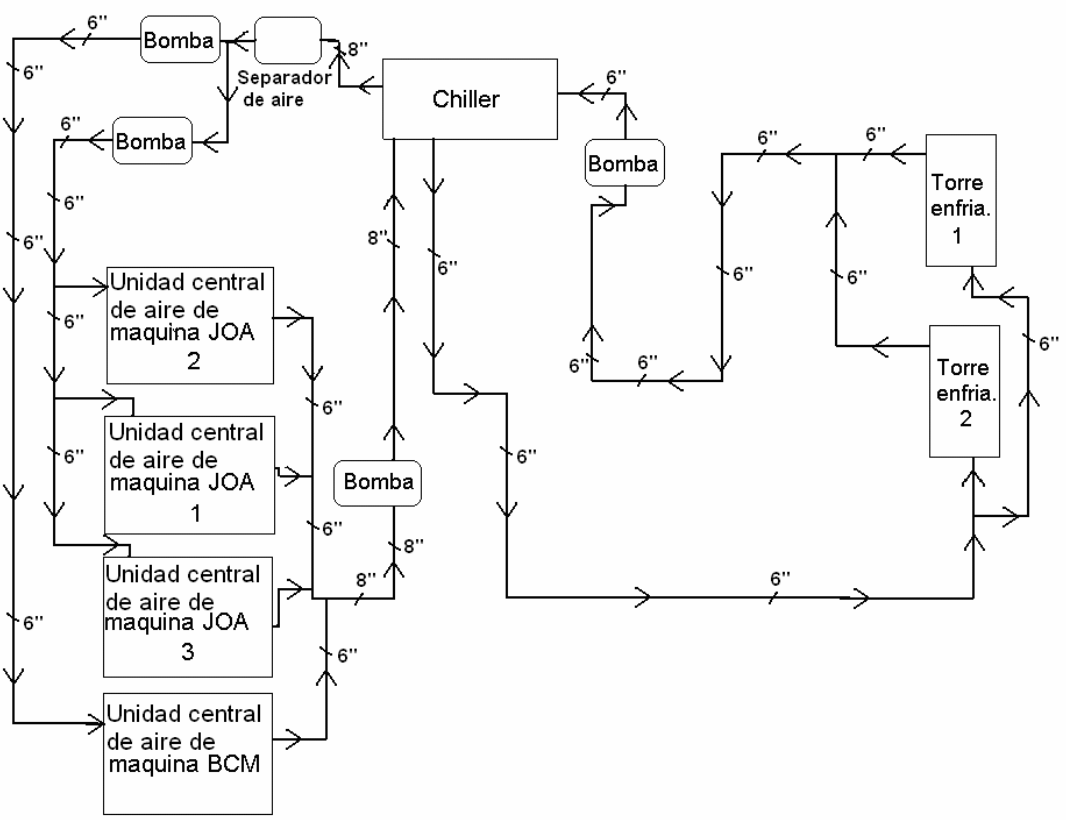


Figura 1.2 Modificación al sistema actual de tuberías según la solución proyectada por la empresa para el control encendido/apagado

En la figura 1.3 se puede observar el camino que sigue el flujo de agua fría utilizando las válvulas de tres vías, hubo un cambio en el lazo de agua “b”, ya que no pasa a las unidades centrales de aire, en el sistema ocurre este desvío del agua en caso de que la temperatura de la planta baje a niveles no deseados para sus empleados. Esto se dio sólo en condiciones de frío por debajo del límite inferior de temperatura permitida dentro del edificio, pues en condiciones normales, la maquinaria presente en toda la planta genera gran cantidad de calor, la cual se compensa con el enfriamiento generado por el sistema de aire acondicionado. Este sistema también queda para usarse en forma manual, en el caso que fallen los sensores, se puede realizar la apertura o cierre en forma manual sin necesidad de hacer un paro en todo el sistema, al igual que el uso de parámetros establecidos en forma manual para el control del nivel de temperatura en cada una de las máquinas productoras de pañales en toda la planta.

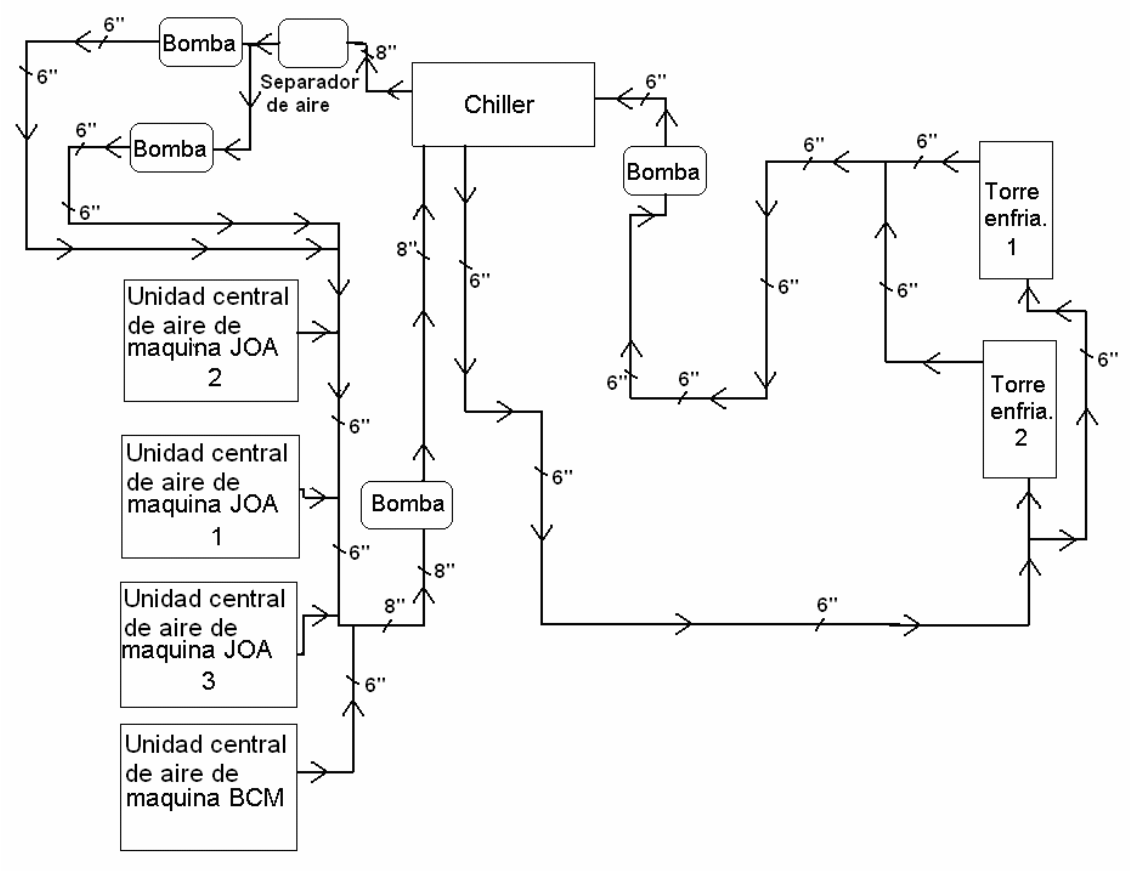


Figura 1.3 Camino que seguiría el flujo de agua en caso de activarse las válvulas de tres vías

Se realizó la apertura y cierre de electroválvulas, por medio del control automático, se llevó la temperatura de la planta al rango permitido según la vestimenta de los empleados y el tipo de labores que realizan, también se diseñó el control del variador de frecuencia mediante el modelo de la planta en tiempo continuo. El modelo se hizo con base en la temperatura a partir de la obtención de las cargas térmicas debido a las máquinas, iluminación, personas, techos y paredes entre otros, se diseñó el regulador en tiempo continuo, usando un período de muestreo adecuado para capturar el nivel de la temperatura en la planta T períodos de muestreo anteriores al presente.

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

Automatizar el sistema de aire acondicionado para la nave 108 de la planta Kimberly – Clark Cartago de modo que permita incrementar el confort ambiental en cuanto a temperatura y favorezca un adecuado rendimiento de los empleados.

2.2 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de control automático del aire acondicionado, implementado con dispositivos industriales, para la planta Kimberly – Clark Cartago por medio de un regulador digital que controle el nivel de temperatura.

2.3 Objetivos específicos

a. Objetivos específicos de diseño

1. Calcular las cargas térmicas de todo el sector de la planta en donde se encuentran las máquinas productoras de pañales conocidas como “JOA´s”.

2. Modelar el sistema de temperatura de la nave 108.

3. Diseñar el regulador de la planta.

4. Pasar a tiempo discreto el regulador obtenido usando un período de muestreo.

b. Objetivo específico de “hardware”

1. Diseñar y construir la etapa de conexiones para comunicación y alimentación entre el variador de frecuencia, las bombas, el controlador, los detectores de temperatura y la pantalla de tacto, que incluya los dispositivos necesarios para realizar la lectura y control del nivel de temperatura en toda la planta.

c. Objetivos específicos de "software"

1. Diseñar los algoritmos necesarios para implementar las ecuaciones que describen el método de control del sistema de aire acondicionado en forma automática, por medio de electroválvulas y variando el flujo de agua a través del sistema de tuberías.

2. Programar las funciones matemáticas necesarias para calcular la temperatura promedio del sector por controlar, con base en las diferentes señales que ingresan al controlador desde los detectores de temperatura.

3. Diseñar una interfase con el usuario, necesaria para observar:

   a. El estado de la temperatura en la planta en todo momento y en los diferentes sectores.

   b. El adecuado funcionamiento del variador de frecuencia y del motor a controlar.

d. Objetivos específicos de documentación

1. Desarrollar el informe técnico que analice el diseño, los módulos de "hardware" y las rutinas de "software" de la solución al problema.

2. Generar un respaldo para las rutinas de "software" necesarias para lograr la solución al problema.

3. Modificar y rediseñar los planos eléctricos de todo el sistema de aire acondicionado.

4. Desarrollar un manual de uso para la pantalla de tacto que controla el sistema de aire acondicionado.

e. Objetivos específicos de implementación

1. Depurar las rutinas de “software” que controlan todo el sistema de aire acondicionado.

2. Poner en funcionamiento, probar y optimizar el sistema de aire acondicionado de la nave 108.

Capítulo 3: Marco teórico

El sistema de aire acondicionado se ha intentado mejorar desde hace varios años hasta la fecha, debido a esta necesidad surgió la compra e instalación de todo el equipo para lograr el acondicionamiento del aire, esto generó el requerimiento de automatizar dicho sistema haciendo uso de la teoría de control automático, con lo cual se logró el planteamiento de un proyecto que involucra matemática avanzada, física y conceptos de otras ciencias e ingenierías para lograr darle la solución que mejor convenga según la corporación.

3.1 Descripción del sistema a mejorar

En la figura 3.5 se observa el sistema de ductos colocados en la nave 107 para suplir las necesidades de acondicionamiento del aire en esta zona, la figura muestra la vista superior, la vista del ramal inferior y la vista lateral del sistema de ductos distribuidos en este sector del edificio.

El sistema funciona permitiendo el arranque manual y automático de todos los dispositivos involucrados en la regulación climática de la nave. En la automatización se utiliza un PLC SLC500 de Allen Bradley. Utiliza un regulador PI para el control de velocidad de las bombas. El sistema de aire acondicionado es de la forma que se muestra en la figura 3.1 y en más detalle aún en la figura 3.2, 3.3 y 3.4 las cuales son acercamientos de la figura 3.1.

Iniciando de izquierda a derecha en la figura 3.1 aparecen las torres de enfriamiento, seguidas del cuarto en donde se ubican las dos calderas (desactivadas en la actualidad), luego aparece el área de máquinas en donde están las bombas, el separador de aire, el “chiller” y el punto de ubicación del panel del controlador. Pasa al sector de las unidades de aire acondicionado de la BCM, en donde se ubica una unidad que suministra el aire a la máquina BCM (CAI 04) y otra a la “JOA” 3 (CAI 03); este sistema de tuberías se extiende a la nave 108 para ubicar a las unidades de aire acondicionado “JOA”, las cuales suplen el aire a las máquinas “JOA” 1 y “JOA” 2 (CAI 01 y CAI 02). En la misma figura 3.1 se aprecia que el nivel de altitud de la nave 107, es superior a la de la nave 108 (97 cm de diferencia una con respecto a la otra) y se encuentran separadas por unas oficinas. En la parte inferior de la misma figura se aprecia la estructura física de la planta en este sector de pañales. Para apreciar el sistema en forma esquemática, se puede ver la figura 1.1, mientras que la figura 3.1 también se muestra en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 con más detalle.

Todas las medidas de las naves y del sistema de aire acondicionado se encuentran en la figura 3.1, en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 aparece la misma figura 3.1 pero en partes, en estas tres últimas puede que no se aprecien algunas de las medidas, este efecto se da debido a la partición, mientras que en la figura 3.1 muchas de las mismas no se observan porque son muy pequeñas respecto a todo el plano mostrado.

Figura 3.1 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 y 108[5]

[5] Esta figura al igual que la 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se encuentran externos este documento en formato digital (PDF). Son planos realizados en Autocad, no se colocaron directamente en el documento debido a su extensión.

Figura 3.2 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 (primer acercamiento de izquierda a derecha en la figura 3.1)

Figura 3.3 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 (segundo acercamiento de izquierda a derecha en la figura 3.1)

Figura 3.4 Plano físico del sistema de tuberías de la nave 107 (tercer acercamiento de izquierda a derecha en la figura 3.1)

Figura 3.5 Plano físico del sistema de ductos de la nave 107

3.2 Antecedentes bibliográficos[6]

3.2.1 Sistemas de aire acondicionado

En lo que respecta a los principios de refrigeración modernos, en ellos hay un ciclo de compresión de vapor, el cual es el que impulsa el aire acondicionado, este ciclo se da por etapas: primero se da la compresión del vapor, luego continúa con la condensación, después pasa a una etapa de expansión y finalmente a la evaporación antes de volver a iniciar el ciclo (figura 3.6).

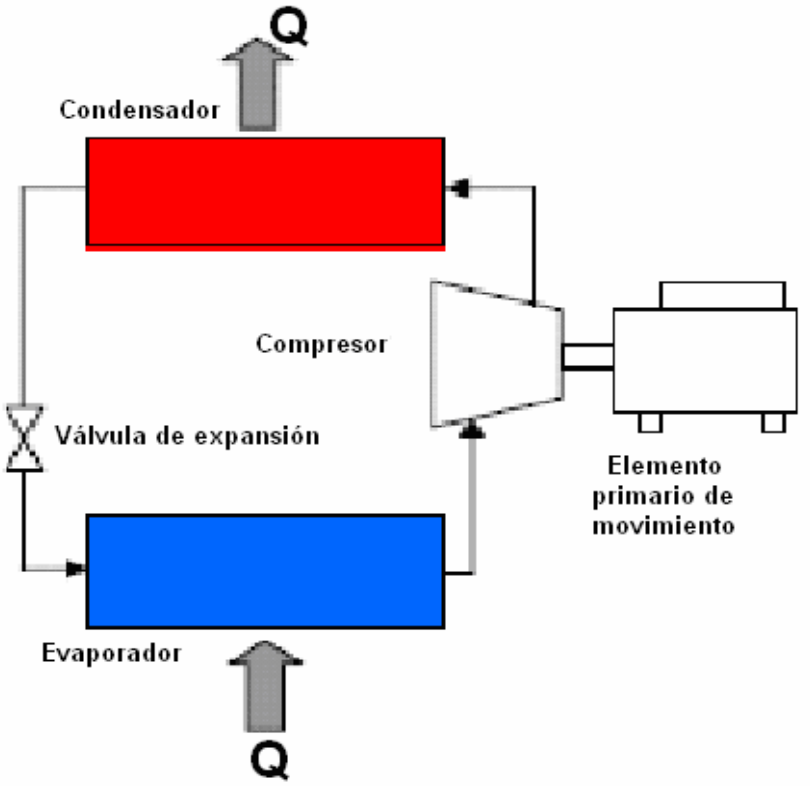


Figura 3.6 Ciclo de compresión del vapor [2]

[6] La fuente bibliográfica de donde se obtuvo este apartado se encuentra en paréntesis cuadrados en cada texto, tabla o figura que no fuera desarrollo meramente del autor del presente documento.

Dentro de todos los conceptos con respecto a aire acondicionado, se encuentran los diferentes métodos utilizados para comprimir un gas refrigerante, dentro de los cuales hay tres formas: sistema tipo “split” enfriado por aire, sistema tipo “chiller” enfriado por aire y sistema tipo “chiller” enfriado por agua, este último es el que se utiliza en la empresa donde se llevó a cabo el proyecto. Todos los métodos tienen diferentes puntos a favor y en contra que los caracterizan dentro de un sistema de aire acondicionado.

El sistema tipo “split” se caracteriza por ser de bajo costo, confiable en una operación de 24 horas continuas, posee un bajo costo de operación y mantenimiento, es flexible a la expansión y posee un fácil manejo, sin embargo, no es muy eficiente desde el punto de vista energético, máxime si se toma en cuenta para un sistema industrial, en donde se requiere una gran cantidad de aire para mantener en una adecuada temperatura toda una edificación (ver figura 3.7) [2].

Figura 3.7 Ejemplo de un sistema de aire acondicionado tipo “split” enfriado por aire [2]

El sistema de aire acondicionado tipo “chiller” enfriado por aire se caracteriza por tener un bajo costo de inversión, ser muy confiable en una operación de 24 horas continuas, tener un bajo costo en cuanto a operación y mantenimiento, ser flexible a la expansión y de fácil manejo, pero también falla desde el punto de vista de la eficiencia en cuanto a lo energético (ver figura 3.8) [2].

Figura 3.8 Ejemplo de un sistema de aire acondicionado tipo “chiller” enfriado por aire [2]

El sistema existente en la empresa donde se realizó el proyecto, hay un sistema tipo “chiller” enfriado por agua, tiene un bajo costo de inversión, – al igual que los anteriores – es confiable en una operación de 24 horas seguidas, tiene un bajo costo en su operación y en su mantenimiento de igual manera que el enfriado por aire, es de fácil manejo y es flexible a la expansión, no obstante, la ventaja sobre los otros sistemas es que es eficiente desde el punto de vista de la energía (figura 3.9, este modelo no es el que está en la planta, es sólo para ejemplificar) [2].

Figura 3.9 Ejemplo de un sistema de aire acondicionado tipo “chiller” enfriado por agua [2]

Ya que en estos sistemas se habla de la eficiencia y la misma es un factor tan importante en cuanto a su escogencia, deberá existir una manera de medirlo, a la cual se le denomina comúnmente EER (Energy Efficient Ratio), utiliza BTU / h que son unidades británicas de temperatura por hora (ecuación 3.1) y se mide de la siguiente forma:

$$EER = \frac{capacidad_en_\frac{BTU}{h}}{consumo_en_watts} \tag{3.1}$$

Para tomar un dato de la eficiencia en kilowatts por tonelada (kW / TON) se usa la ecuación (3.2) [2]:

$$\frac{kW}{TON} = \frac{12}{EER} \tag{3.2}$$

La ecuación anterior lleva a la tabla 3.1, en la cual se comparan los valores de eficiencia de los tres sistemas de enfriamiento.

Tabla 3.1 Comparación en cuanto a eficiencia en diferentes sistemas de enfriamiento [2]

	"Split"	"Chiller" enfriado por aire	"Chiller" enfriado por agua
kW / TON	1,2 – 0,7	0,9	0,6

Y lo mejor que poseen estos sistemas, es que han aumentado su eficiencia a través del tiempo y actualmente poseen una eficiencia en kW / TON aproximada a 0.4, valor que estadísticamente ha venido disminuyendo desde su invención, lo cual indica parte de la decisión de la empresa para decidirse por este sistema [2].

3.2.2 Confort ambiental en el trabajo

El confort ambiental es la sensación de completo bienestar físico y mental. El ser humano tiene un ritmo que rige el funcionamiento del cuerpo, las condiciones ambientales desfavorables perjudican el proceso de este ciclo básico generando “tensión física y psíquica”, esto lleva a pérdida en la eficiencia y hasta una eventual pérdida en la salud.

El área de confort ambiental posee cuatro subdivisiones en general: confort térmico, calidad del aire, confort acústico y confort lumínico. La atención se va a centrar en el confort térmico, el cual es la sensación de completo bienestar físico (desde el punto de vista de equilibrio de intercambio de calor).

En un ambiente cerrado se pueden destacar cuatro elementos que determinan la percepción de la calidad ambiental desde el punto de vista térmico, los cuales son: temperatura del aire, humedad relativa, movimiento de aire, temperatura radiante media [16].

La energía que produce un ser humano en relación con su cantidad de energía calorífica generada en el interior del cuerpo, el 20% es utilizada en los procesos metabólicos y el otro 80% es eliminada al medio ambiente. Esto varía según su actividad física como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Cantidad de calor liberada en un ambiente por seres humanos en diversas actividades

Actividad	Energía liberada (W/h)
Durmiendo (mínima)	70
Sentado con movimientos moderados	130 – 160
De pie haciendo trabajos leves	160 – 190
Sentado con movimientos intensos	190 – 230
De pie haciendo trabajos intensos	220 – 290
Caminando haciendo trabajos pesados	290 – 410
Trabajos muy pesados como cavando	440 – 580
Nivel máximo de actividades (30 minutos máximo)	1100 máximo

El ser humano es homotérmico, posee una temperatura constante aproximada de 37°C, la cual cae durante la noche y sube en el día, la variación es de 1°C. A esta oscilación se le llama ritmo circadiano, para estar a una temperatura de 37°C el exceso de calor debe ser disipado para el exterior. Las formas de disipar este calor es por medio de la conducción (de sólido a sólido por contacto), radiación (de sólido a sólido sin contacto), convección (de sólido a gaseoso) y evaporación (por cambio de fase, ocurre en los pulmones y la piel). Toda esta disipación de calor puede ser de forma sensible o latente.

Para un adecuado funcionamiento del ser humano, es preciso que su organismo esté en perfecto equilibrio térmico, esto quiere decir, todo el calor producido en forma excesiva por su metabolismo debe ser rechazado rápidamente para su exterior [4].

El confort depende de multitud de factores y parámetros físicos. Entre todos los factores, el confort térmico representa el sentirse bien desde el punto de vista del ambiente higrotérmico exterior a la persona. Los límites extremos, desde el punto de vista térmico podrían resultar dañinos e incluso mortales para el ser humano.

El adecuado control de la temperatura del medio ambiente en que circunda el cuerpo humano elimina el esfuerzo fisiológico de acomodación, obteniéndose con ellos un mayor confort y la consiguiente mejora del bienestar físico y de las condiciones de salubridad (mayor rendimiento físico).

El balance térmico global depende de la producción de calor, del metabolismo del ocupante y de la humedad del aire (evaporación más o menos importante en los pulmones); en cuanto a la emisión de calor, de la vestimenta, de la temperatura operativa y de la velocidad del aire. Cuanto menor sea el equilibrio, mayor será el porcentaje previsible de insatisfacción [4].

Los factores que hacen que los mecanismos fisiológicos y psicológicos de adaptación del hombre cambien (reacción al calor), hacen comprender el efecto que tienen sobre la salud. Una temperatura muy fría para el cuerpo causa una reacción de temblor y poca irrigación de la piel y las condiciones que la propician son una indumentaria mal aislada o un clima frío. Por otra parte, una temperatura sofocante causa una fuerte irrigación, una alta frecuencia cardiaca y transpiración y se da debido al trabajo corporal, una indumentaria muy aislada o un clima caliente. De aquí que el ser humano deba permanecer en un equilibrio agradable con respecto a la temperatura ambiental [8].

Según la actividad realizada por una persona, la energía en su metabolismo variará de acuerdo con cada persona. Para esto hay una unidad para expresar el índice metabólico por unidad de superficie corporal denominada *met,* que se define como el índice metabólico (consumo calórico) de una persona en actitud sedentaria (sentada, inmóvil). De aquí, 1 met = 18.4 Btu / (hr-ft^2) = 58.2 W / m^2. En la tabla 3.3 se muestra la generación metabólica de calor típica para algunas actividades. Se toma el supuesto de que un adulto promedio tiene una superficie corporal (en donde ocurren los procesos de transferencia de calor) de unos 1.8 m^2, con lo que disiparía aproximadamente 105 W/h cuando esté sentado e inmóvil.

Otra variable personal que afecta el confort es el tipo de ropa y cantidad que se lleve puesta. Para calcular el aislamiento térmico de la vestimenta, por lo general, se concibe ésta como una sola capa de uniforme cubriendo todo el cuerpo. El valor aislado se expresa en términos de una unidad denominada *clo* la cual equivale a 0.155 (m^2°C) / W. En la tabla 3.4 aparecen algunos valores de la resistencia térmica de la ropa para diferentes casos y en la figura 3.10 se muestra el aislamiento térmico de la ropa para diferentes niveles de confort.

Tabla 3.3 Generación típica de calor metabólico para diferentes actividades

Actividad	Met
Dormir	0.7
Estar reclinado	0.8
Sentado tranquilo	1.0
Leer sentado	1.0
Escribir a mano	1.0
Escribir en teclado	1.1
De pie relajado	1.2
Archivar sentado	1.2
Archivar de pie	1.4
Limpiar la casa	2.0 – 3.4
Levantar / empacar	2.1
Estar sentado moviendo vigorosamente las extremidades	2.2
Caminar a 4.82 km / h	2.6
Bailar en reuniones	2.4 – 4.4
Ejercicios calisténicos	3.0 – 4.0
Caminar a 6.44 km / h	3.8
Tenis	3.6 – 4.0
Manejo de bolsas de 50 kg	4.0
Trabajo pesado	4.0 – 4.8
Básquetbol	5.0 – 7.6
Lucha libre de competencia	7.0 – 8.7

Tabla 3.4 Resistencia térmica de la ropa según la indumentaria

Indumentaria	Resistencia térmica de la ropa
Ropa tropical (short, camisa de cuello abierto, mangas cortas, calcetines finos y sandalias)	0.3 clo
Ropa ligera de verano (pantalón ligero, camisa de cuello abierto, mangas cortas, calcetines finos y zapatos)	0.5 clo
Ropa ligera de trabajo (ropa interior ligera, camisa de trabajo de algodón, mangas largas, pantalón de trabajo, calcetines y zapatos)	0.7 clo
Ropa de interior para invierno (ropa interior, camisa de mangas largas, pantalón de trabajo, calcetines gruesos y zapatos)	1.0 clo
Ropa de vestir tradicional (ropa interior de algodón con mangas y piernas largas, camisa, traje, chaleco, calcetines de lana y zapatos)	1.5 clo

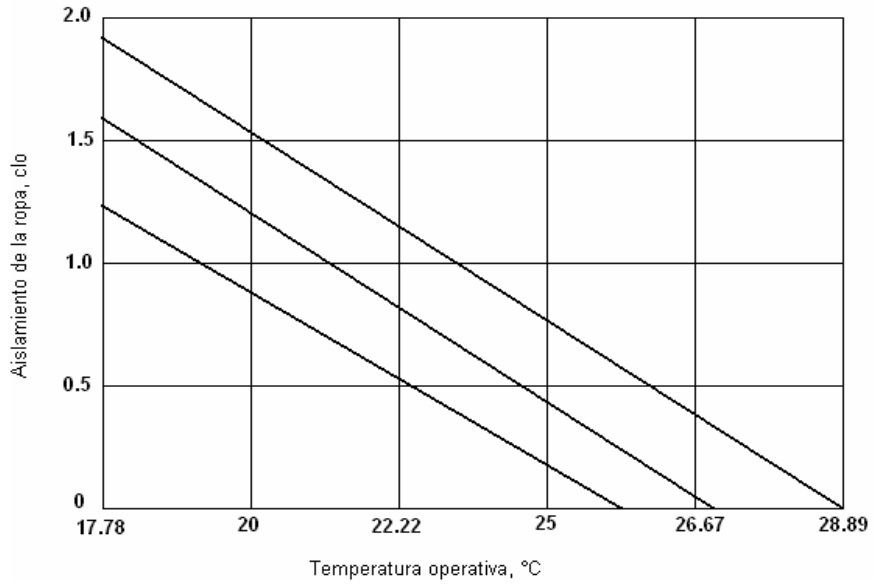


Figura 3.10 Aislamiento térmico de la ropa para varios niveles de confort a una temperatura dada

En la figura 3.10 se observan tres líneas, la del centro representa la línea óptima para obtener la temperatura según el asilamiento de la ropa, por otro lado, las otras dos líneas representan el límite superior e inferior con base en el 80% de aceptabilidad [16].

La temperatura operativa aceptable para personas activas también puede calcularse (para 1.2 < mets < 3) a partir de la ecuación 3.3:

$$t_{o,activas} = t_{o,sedentarias} - 3(1 + clo)(met - 1.2)°C \quad (3.3)$$

La temperatura operativa mínima permitida a usarse para esta ecuación es de 15°C. Los niveles de met pueden obtenerse de la tabla 3.3.

3.3 Descripción de los más importantes principios relacionados con la solución del problema

3.3.1 Principios de transferencia de calor y flujo

Para la carga de enfriamiento requerida en la planta, los siguientes son los elementos más importantes a tomar en cuenta para evaluar: datos atmosféricos del sitio, características de la edificación (dimensiones físicas), dirección de las paredes del espacio a acondicionar (orientación del edificio), fuentes de calor internas, concentración de personas en planta, cantidad de sombra en los vidrios (si es que los hay), cantidad de ventilación requerida y el momento del día en que la carga llega a su pico entre otros elementos.

En la planta, existen muchas variables de cargas de enfriamiento que cambian mucho su magnitud durante el día, los mismos ocurren en momentos diferentes unos con respecto a los otros, por lo mismo deben analizarse en forma detallada para definir la carga de enfriamiento necesaria para el establecimiento o dividirse en zonas, como ocurre en esta solución, en la cual ya está dividido por naves. Ésta última necesidad origina mayor capacidad de carga de enfriamiento que un sistema en su totalidad, mas permite manejar cada carga en forma separada.

Los modos de ganancia de calor se dan por muchas razones, entre ellas, conducción del calor por medio de divisiones internas, conducción del calor a través de techos, energía transferida como resultado de infiltración de aire del exterior y ventilación, radiación solar a través de fuentes transparentes, aumentos de calor misceláneos o calor generado por los ocupantes, luces y aplicaciones en general.

Para llevar a cabo este diseño, se necesitan consideraciones iniciales tales como: características de la edificación, configuración (ubicación, orientación y sombra externa de la edificación, sombra de edificaciones adyacentes), condiciones exteriores de diseño (información climática apropiada), rutina de operación (iluminación, ocupantes, equipo interno, aplicaciones y procesos) y fecha y tiempo (día y mes para llevar a cabo los cálculos de la carga de enfriamiento). Estas consideraciones entre otras como la ubicación del ventilador, pérdida de calor en los ductos entre otros, ya están preestablecidas por la empresa, en lo referente al sistema de aire acondicionado aunque en la actualidad no esté automatizado para la planta existe [8].

En lo que respecta a los elementos de cálculo, a lo largo de varios años se han desarrollado varios métodos para el cálculo de cargas térmicas, entre los cuales se encuentra el “método de la función de transferencia”, el cual se fundamenta en estimar las cargas de enfriamiento hora por hora, predecir las condiciones del espacio para varios sistemas y de esta forma establecer los correspondientes programas de operación y control. Es aplicado para cálculo de flujo unidimensional de transferencia de calor en paredes y techos soleados.

Otro de los métodos es el de “cálculo de cargas por temperatura diferencial y factores de carga de enfriamiento”, este se recomienda aplicar en el caso de que todos los procedimientos vayan a ser por cálculo manual, es simplificado, se basa en el supuesto de que el flujo de calor a través de un techo o pared puede ser obtenido por multiplicar la temperatura diferencial (exterior e interior) por los valores tabulados de techos y paredes en forma respectiva.
Otro de estos métodos se llama “valores de temperatura total equivalente y tiempo promedio”, el cual es recomendado para usuarios experimentados y se utiliza para calcular la carga de enfriamiento de un espacio y aplica los mismos procedimientos generales empleados en la función de transferencia. Ambos métodos dan resultados similares y el segundo requiere el uso de tablas de factores precalculados.

3.3.1.1 Principio de funcionamiento de un “chiller”

Las unidades “chiller” están conformadas por dos elementos de transferencia de calor, un evaporador y un condensador, además de los elementos clásicos del ciclo de refrigeración (compresor, válvula de expansión y filtros entre otros) los “chiller” son unidades que se encargan de enfriar agua para aplicaciones varias. Este proceso se realiza mediante la compresión de un gas refrigerante el cual sale comprimido de la bomba o compresor a una temperatura de aproximadamente 80°C, circula a través del compensador manteniendo la presión y bajando la temperatura a 40°C aproximadamente, luego pasa por la válvula de expansión donde el gas se expande produciendo su enfriamiento, el gas circula dentro de los tubos del evaporador donde se genera la transferencia con el agua enfriándola hasta una temperatura que puede oscilar entre 1 y 4°C (o menos de acuerdo al control) este proceso en forma esquemática se puede apreciar en la figura 3.6.

3.3.1.2 Principio de funcionamiento de unas torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son unidades que se encargan de enfriar agua por un proceso de división de la partícula de agua y su posterior circulación por una corriente de aire forzado, logrando reducir la temperatura de la gota de agua en el proceso. Estos sistemas tienen ventajas y desventajas bien marcadas. Las torres de enfriamiento son unidades abiertas, donde el agua de un determinado proceso llega al tope de la torre a una temperatura máxima de 60°C. Ésta entra a los rociadores de tope que se encargan de separar el liquido en la mayor cantidad de partículas posibles, éstas caen en un relleno ubicado a los lados de la torre donde establece un recorrido en contra flujo con una columna de aire forzado, las partículas de agua recorren el relleno hasta enfriarse (1 ó 2°C por encima de la temperatura de la columna de aire) y llegan hasta la bandeja de fondo donde se retorna al sistema como se puede apreciar en la figura 3.11.

Las temperaturas máximas que manejan las torres de enfriamiento constituyen una limitante importante. Así como la contaminación del agua del sistema por el contacto directo con el aire ambiental, los tratamientos de esta agua son por lo general costosos y se requiere de mantenimiento constante de torres. Sin embargo la posibilidad de enfriar grandes volúmenes de agua logra compensar sus debilidades.

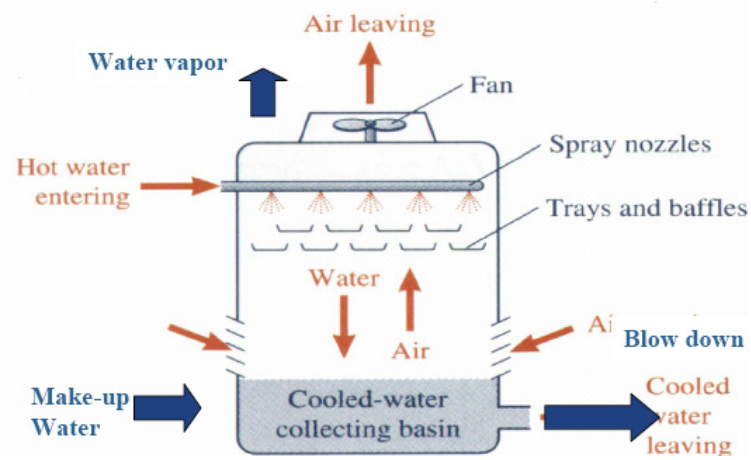


Figura 3.11 Principio de funcionamiento de una torre de enfriamiento [2]

3.3.1.3 Principio de funcionamiento de un separador de aire

El aire representa una fuente de problemas en los sistemas de circuito cerrado, por lo que deben tomarse las medidas para eliminarlo. El aire proviene principalmente de los gases disueltos en el agua de relleno que se suministra al sistema. La cantidad de aire que puede estar disuelto depende de la presión a la que está sujeta el agua y a su temperatura, todo eso gobernado por la ley de Henry.

La ley de Henry enuncia que la cantidad de aire disuelto varía inversamente con la temperatura del agua y depende directamente de la presión a una temperatura dada. La solubilidad del aire aumenta cuando la temperatura es baja y la presión es alta. Por ejemplo, si se agrega agua fría a un sistema a 60 psig (414 kPa) y a 40 °F (4 °C) y se calienta hasta 150 °F (66 °C), una reducción de presión a 12 psig (83 kPa) puede reducir de 13 a 3 por ciento el contenido del aire disuelto. Así, por cada 10 galones (38 litros) de agua de relleno puede introducirse hasta 1 galón (3.8 litros) de aire al sistema.

Existen varios tipos de dispositivos para purgar el agua de un sistema hidráulico, incluyendo el tanque de expansión con interfase libre aire – agua. En los sistemas grandes es aconsejable utilizar, además de este tanque, otros dispositivos adicionales.

Uno de los dispositivos más utilizados para eliminar el aire es el separador de aire de vórtice o remolino, el cual se ilustra en la figura 3.9. Este dispositivo genera un remolino en el interior del tanque, creando baja presión en el centro de la unidad, lo que provoca que se desprendan burbujas de aire del agua. Una vez que el aire sube a la superficie del tanque, es liberado a través de un purgador de aire automático. La manera de aplicar estos dispositivos puede ser un poco diferente entre los sistemas de agua caliente y fría, y también depende del tipo de tanque de compresión que se utilice [7].

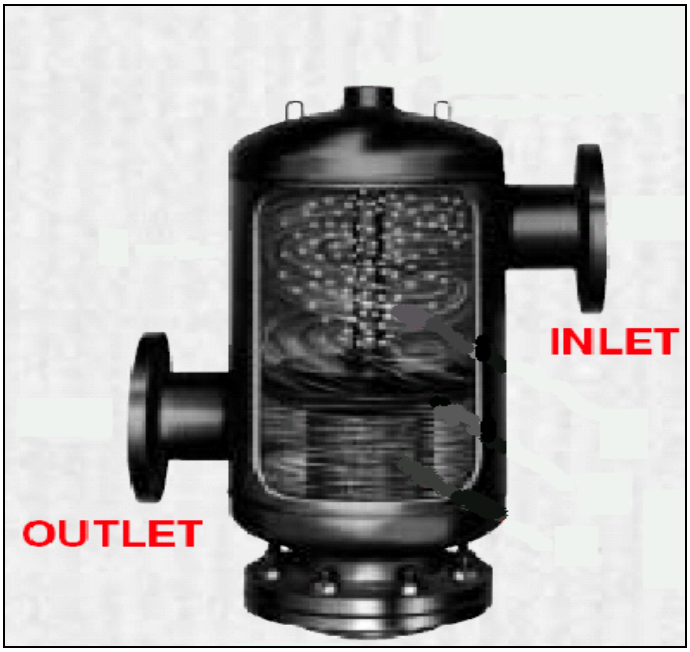


Figura 3.12 Separador de aire de vórtice o remolino [7]

3.3.1.4 Principio de funcionamiento de una unidad central de aire

Las unidades centrales de aire, en este caso multizonal, tienen un solo ducto de suministro de aire para cada zona mezclando aire caliente y frío en la unidad central en respuesta a las señales del detector de temperatura de las áreas o zonas acondicionadas. Para un número comparable de zonas, este sistema proporciona mayor flexibilidad que un sistema de doble ducto, no obstante, es limitado el número de zonas que puede atender cada unidad central.

En un equipo típico para un sistema multizonal de un solo ducto, los dos caudales de aire desembocan en el interior del equipo central y de ahí sale el aire a la temperatura apropiada. El sistema acondiciona los recintos o zonas por medio de un equipo de ventilación con los serpentines de calefacción y de enfriamiento ubicados paralelamente adelante del ventilador.

El sistema multizonal de ventilación central se puede utilizar en lugares que tienen altas cargas de calor sensible y requerimientos limitados de ventilación. El uso de muchas líneas de ductos y equipos de control hacen que el costo inicial de este sistema sea mayor que el de otros sistemas que utilizan sólo aire. Además, para obtener un buen control, este sistema podría requerir equipo de enfriamiento y de manejo de aire más grande; esto debe tomarse en cuenta cuando se estime el costo inicial y los costos de operación.

El uso de este sistema de calentamiento y enfriamiento simultáneo actualmente se limita por razones de conservación de energía. Sin embargo, si se usa aire del exterior y se tienen controles apropiados para el suministro de calefacción y enfriamiento, se obtiene un buen nivel de eficiencia en muchas aplicaciones (ver figura 3.13).

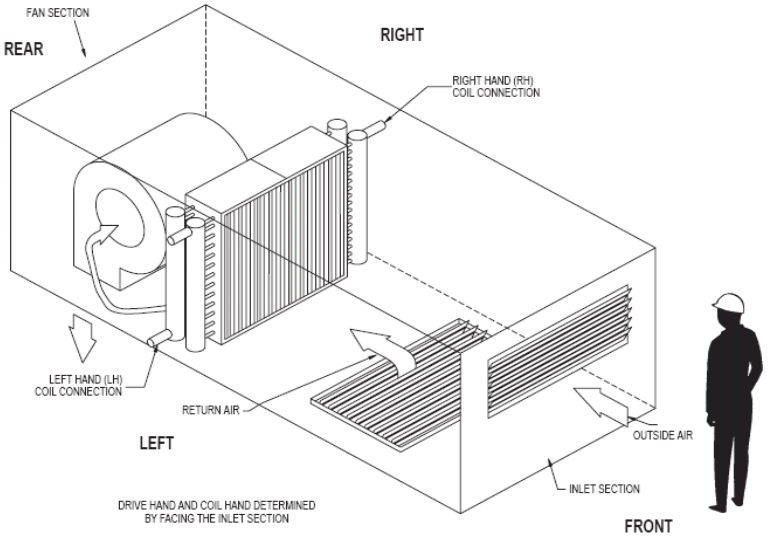


Figura 3.13 Representación esquemática de una unidad central de aire [23]

3.3.1.5 Principio de funcionamiento de una bomba centrífuga

La función principal de una bomba hidráulica es convertir energía mecánica en energía hidráulica al empujar el fluido dentro del sistema. Existen dos categorías de bombas, las hidrodinámicas y las hidrostáticas; las primeras son de desplazamiento no positivo, o sea, como en este caso las centrífugas operan por medio de su fuerza por lo que la capacidad de presión es con base en el impulso de velocidad del fluido. Las segundas son de desplazamiento positivo, dan una cantidad específica de fluido por ciclo o revolución del motor.

Las bombas centrífugas operan por medio de la fuerza centrífuga en donde los fluidos entran al centro de la caja de la bomba y son expulsados por el rápido empuje de un impulsor. No hay sello positivo entre los orificios de salida y entrada; así, la cantidad de presión depende del impulso de velocidad del fluido.

Las características de una bomba por lo general son dadas en forma de curvas. La figura 3.14 constituye un ejemplo de tales curvas para una bomba de varios impulsores que puede ser operada a dos velocidades diferentes. Se da una curva diferente para cada velocidad y para cada diámetro del impulsor. Estas curvas proporcionan la carga total dinámica o altura útil, la eficiencia, la potencia al eje requerida y la carga o altura de succión positiva neta como función de la capacidad [7].

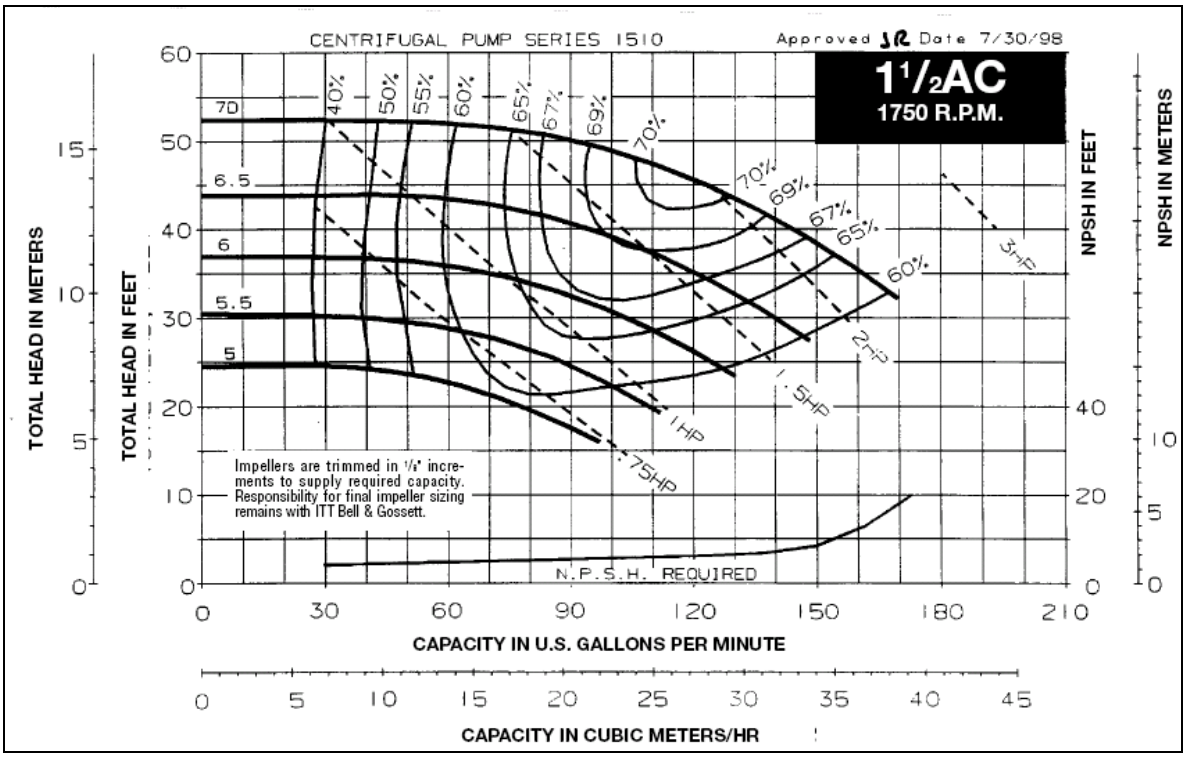


Figura 3.14 Curva de una bomba centrífuga que muestra los datos sobre el rendimiento a 1750 RPM [7]

La curva de la bomba está en función de las características de la misma, si la aplicación requiere flujos variables, una forma de lograrlo es alterando las características de las bombas (control de velocidad variable, el cual modifica la curva de la bomba), o cambiando los parámetros del sistema, utilizando válvulas de estrangulamiento (mayores pérdidas energéticas).

Las fórmulas para calcular la potencia de las bombas se muestran en la ecuación 3.3 y 3.4 en HP.

$$HP = \frac{GPM * Cabeza(ft) * gravedad_especifica}{3960 * eficiencia_de_la_bomba} \quad (3.3)$$

$$HP = \frac{GPM * PSI * gravedad_especifica}{1713 * eficiencia_de_la_bomba} \quad (3.4)$$

Donde:

GPM: galones por minuto

Gravedad específica del agua: 1

Eficiencia de la bomba: 100 – 500 GPM es de 70 – 75%

1000 – 1500 GPM es de 75 – 80%

Mayor a 1500GPM es de 80 – 85%

PSI: presión en libras por pulgada cuadrada

3.3.2 Principios físicos

El calor representa la cantidad de energía que un cuerpo transfiere a otro como consecuencia de una diferencia de temperatura. Aun cuando no sea posible determinar el contenido total de energía calorífica de un cuerpo, puede medirse la cantidad que se toma o se cede al ponerlo en contacto con otro a diferente temperatura. Esta cantidad de energía en tránsito de los cuerpos de mayor temperatura a los de menor temperatura es lo que se entiende por calor.

Por definición el calor cedido desde los alrededores al sistema es positivo, el calor cedido por el sistema a los alrededores es negativo. La cantidad de calor tomada o cedida por un cuerpo para variar en una cantidad su temperatura es directamente proporcional a su masa, esto se describe por la ecuación 3.5.

$$Q = m * C(T_f - T_i) \qquad (3.5)$$

Donde Q representa la cantidad de energía transferida en forma de calor, m la masa del cuerpo, T_f y T_i las temperaturas final e inicial respectivamente. C es una constante de proporcionalidad y su valor es característico del tipo de sustancia que constituye el cuerpo, al cual se le denomina calor específico. A la hora de despejarlo de la ecuación anterior se obtiene la ecuación 3.6:

$$C = \frac{Q}{m*(T_f - T_i)} = \frac{Q}{m\Delta T} \tag{3.6}$$

Si variamos la energía interna de nuestro sistema, la primera ley de la termodinámica nos dice, que esta variación viene acompañada por la misma variación de energía, pero de signo contrario en los alrededores. De modo que la energía total del sistema y el entorno, permanece constante. “La energía del Universo permanece constante. La energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma”.

La mayoría de los procesos se realizan a presión constante, por lo que resulta adecuado definir una nueva función de estado, la entalpía (H), que se define según la ecuación 3.7 de la siguiente manera:

$$H = U + P*V \tag{3.7}$$

La entalpía como tal es una propiedad extensiva del sistema, puesto que tanto la energía interna como el volumen lo son. Es una función de estado y como tal depende de la presión y la temperatura.

Todos estos conceptos es importante tenerlos presentes en el proyecto debido a su enorme dependencia del proyecto con respecto a la temperatura, el calor y la entalpía.

Los factores que afectan la temperatura y humedad relativa se conocen como cargas térmicas. Las que afectan sólo el primer factor se llaman cargas sensibles y las que afectan el segundo factor se denominan cargas latentes. Para este proyecto se pondrá principal atención en las cargas sensibles, ya que es la variable a controlar. Sin embargo, ya que la segunda carga afecta indirectamente la temperatura también, se tomo la suma de las dos, que se conoce como carga total y sus unidades son las kilocalorías por hora (kcal / h).

Por esta razón los principios físicos de transferencia del calor a través de materiales y del aire fue muy importante en este proyecto. De esta forma hay un método resumido de algunas condiciones a evaluar y las consideraciones a tomar en cuenta para diseñar proyectos de sistemas de aire acondicionado en locales comerciales, a pesar de que la empresa no es un local comercial, posee muchos empleados que deberían estar en condiciones adecuadas de confort, para que de esa forma logren un mayor rendimiento, así los conceptos son aplicables también para la planta.

En sí, carga térmica es la cantidad de energía que se requiere vencer en un área para mantener determinadas condiciones de temperatura y humedad para una aplicación específica, como por ejemplo el confort humano en este caso concreto. Es la cantidad de calor que se retira de un espacio definido en BTU / h [6].

3.3.3 Principios de “software”

La implementación del “software” para el controlador, fue imprescindible para el desarrollo del proyecto, ya que aquí se decidieron las acciones a tomar por parte del sistema, lo mismo que la implementación de una interfase para los diferentes usuarios que se manejaron con otro tipo de “software” meramente gráfico.

3.3.3.1 Principios de “software” para un PLC

En los PLC se utilizan varios lenguajes de programación según el PLC, los cuales tienen un conjunto de instrucciones con una determinada sintaxis para ejecutar una función, así hay lenguajes de bajo nivel, intermedio y superior dependiendo del grado de comunicación con una unidad principal (CPU), al igual que el grado de complejidad de las instrucciones. Dentro de esta clasificación también vienen los lenguajes estructurados y no estructurados, los cuales tienen que ver con la forma como se escriben y agrupan las instrucciones. Como un principio de programación en forma general, un lenguaje de programación debe ser de fácil entendimiento, y así permita su posterior modificación en caso que el proyecto así lo requiera.

Los métodos de programación más utilizados para el PLC son: programación con diagrama escalera del cual se puede apreciar un ejemplo en la figura 3.15, programación con bloques funcionales con un ejemplo en la figura 3.18 y programación con lógica Booleana.

El primero es uno de los más utilizados y es el que estuvo presente en este proyecto; fue desarrollado a partir de sistemas antiguos basados en relés, su continuidad de uso se debe principalmente a que los técnicos especializados en darle mantenimiento a los PLC, están familiarizados con este lenguaje, también es que a pesar del desarrollo de lenguajes de alto nivel, han sido pocos los lenguajes que han cumplido satisfactoriamente los requerimientos de control en tiempo real que incluyan la representación de los estados de los puntos de entradas y salidas. El nombre de escalera proviene del uso de rieles y peldaños, para ilustrar esta programación se ejemplifica el arranque de un motor en la figura 3.15 [21].

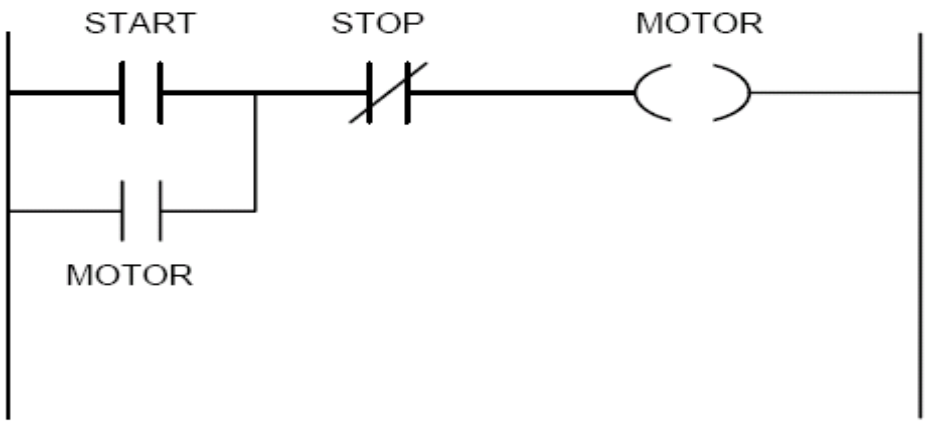


Figura 3.15 Lógica de escalera para el arranque de un motor [21]

En la mayoría de los casos, las instrucciones para la programación del PLC pueden estar separadas en básicas, mostradas algunas de ellas en forma muy general en la figura 3.16 y extendidas de las cuales se muestran unas cuantas en la figura 3.17.

Instrucciones básicas
RELAY
TIMER
COUNTER
LATCH
ONESHOT
I/O REG
REG I/O
BIN - BCD
BCD - BIN
ADD
SUB
COMPARE
MCR
SKIP

Figura 3.16 Algunas instrucciones básicas de un PLC [21]

Instrucciones expandidas	
MOVE	REM -FM - TOP
MOVE RIGHT 8	SORT
MOVE LEFT 8	AND
DP ADD	IOR
DP SUB	EOR
ADD X	INV
SUB X	MATRIX COMPARE
MPY	BIT SET
DVD	BIT CLEAR
GREATER THAN	SHIFT RT
TABLE - DEST	SHIFT LT
SRC - TABLE	DO SUB
MOVE TABLE	RETURN
ADD-TO-TOP	DO I/O
REM-FM-BOT	

Figura 3.17 Algunas instrucciones expandidas de un PLC [21]

Las instrucciones expandidas incluyen funciones más avanzadas y no se limitan sólo a lógica de relés, dentro de éstas se encuentran algunas como movimiento de datos, tablas, administradores de listas, aritmética con signo y doble precisión, cálculos matriciales y ejecución de subrutinas.

Otro de los tipos de programación para un PLC es el de los bloques funcionales, esta es una de las formas recientes de lograr dicho cometido, se llevó a cabo con el fin de describir, programar y documentar la secuencia del proceso de control. En lo que respecta a lógica combinacional, este tipo de programación es muy superior a otras formas de programar, sin embargo, los diagramas de escalera y booleanos continúan siendo mejor en este aspecto.

Este lenguaje incluye muchos símbolos y convenciones tales como transiciones (movimiento de un paso a otro que se representa por una línea horizontal corta), pasos (símbolo secuencial individual el cual se representa por cuadrados numerados que pueden contener nemónicos que describen la función del paso), conectividades (o enlaces que muestran el flujo de control) y condiciones (están asociadas a las transiciones y deben estar escritas a la derecha).

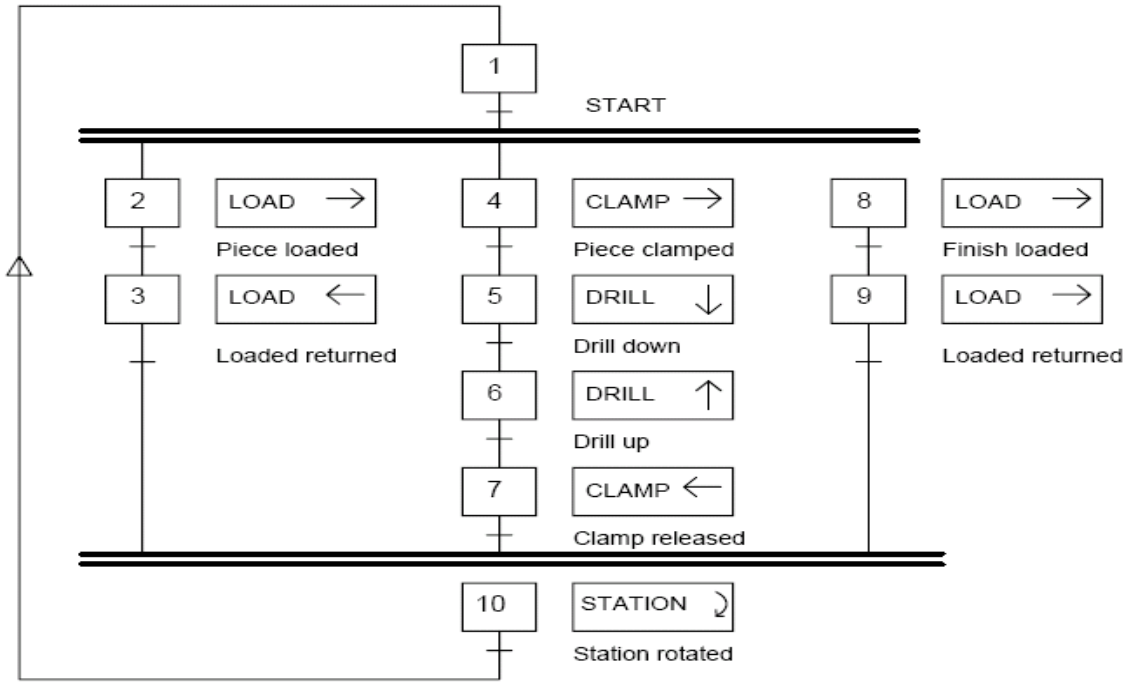


Figura 3.18 Programación en bloques funcionales para el control de un proceso de perforación por medio de un taladro [21]

La programación con lógica booleana incluye las funciones AND, OR y NOT, lo mismo las funciones TIMER, COUNTER Y LATCH para lo que es toda la lógica existente para PLC, las cuales son muy similares a las utilizadas en la programación mediante lógica de escalera [21].

3.3.3.2 Principios de “software” para una pantalla de tacto

El principio que gobierna el “software” de una pantalla de tacto es muy simple y gráfico, se trata más que nada de llevar a cabo los diseños de las pantallas en sí y muchos de ellos están prediseñados y predefinidos en algunos menú dentro del programa. Sin embargo, en caso de definirse algún diseño en forma directa para mostrar esquemáticamente un proceso o un esquema de entradas y salidas, también posee las características necesarias en funciones de dibujo de líneas, rectángulos y círculos entre otros, pues tiene un sector para trabajar debidamente enmarcado en su ambiente, muy similar a la forma de hacer figuras o dibujos en “Paint” de “Microsoft”.

Su programación se lleva acabo desde una computadora a través de un cable de conexión entre el puerto serial de la pantalla de tacto (canal 1) y el puerto serie de la respectiva PC, debido a la configuración de este cable se le conoce como DP-PGMCBL (no es un DBQ común y corriente macho a hembra, ver configuración de conexión en la figura 3.19).

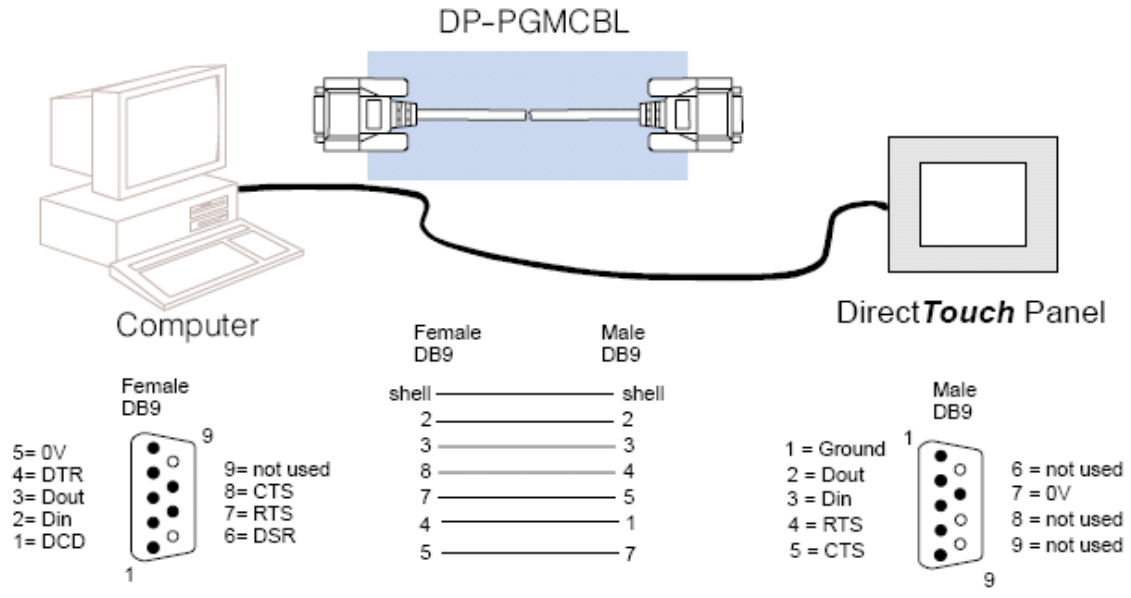


Figura 3.19 Diagrama de conexión entre puertos de la pantalla de tacto y la computadora [24]

Se pueden implementar varias pantallas y cada una de ellas con sus respectivos vínculos con las otras por medio de sectores para hacer saltos entre ellas, al igual que para regresar a pantallas anteriores de la misma forma, posee una estructura para el manejo de datos tanto analógicos como digitales. Se han implementado para hacer la lectura de los sectores de memoria de un PLC, son la interfase con el usuario y el controlador. En el menú de opciones del programa hay sectores para elegir botones fijos y de un pulso, luces, switch, gráficas, sección para errores por medio de alarmas entre otros.

Cada pantalla se almacena en una serie de registros internos del programa, según su fabricante está diseñada para que trabaje con el PLC de su respectivo productor. Pero, también están diseñadas para que se adapten a los PLC de otras marcas, cambiando ciertos parámetros en forma directa dentro de la misma pantalla (“software” interno).

3.3.4 Principios electrónicos

Los sistemas se dividen en dos clases: lo que se conoce como sistema estático o sistema dinámico. El primero es un sistema en el cual el estado actual depende sólo de las entradas actuales (la relación entre las variables está dada por una ecuación algebraica); el segundo es un sistema en el cual el estado actual depende de las entradas actuales y anteriores (su estado varía con el tiempo y puede ser descrito por ecuaciones diferenciales o de diferencias). En el caso de este proyecto, el sistema es dinámico, porque su variable a controlar (temperatura) varía constantemente con el tiempo.

Se debió recurrir a la teoría, la cual es la exposición de métodos teóricos y experimentales para la obtención de modelos, lo cual es algo indispensable para un proyecto. El planteamiento de estos modelos matemáticos definieron el comportamiento temporal y frecuencial, ante la variación de sus parámetros, así se aseguró la obtención de sistemas que cumplan con ciertas características deseadas, dentro de las cuales se encuentran las de estabilidad, respuesta transitoria, respuesta estacionaria, error de estado estacionario y respuesta en frecuencia entre otras.

Un sistema debe poseer un método para que sea descrito en forma matemática, dentro de estos métodos se pueden encontrar el axiomático, que consiste en que el centro de interés es una definición rigurosa de sistema y la deducción de sus implicaciones mediante métodos matemáticos y lógicos. La teoría dinámica de sistemas tiene métodos principales de descripción, ya sea interna (clásica) o externa (moderna), todo esto se enmarca dentro del concepto principal de estabilidad precisamente donde surge la relación con la teoría de control.

Un sistema de control, por definición es un sistema diseñado para lograr el comportamiento deseado de un proceso, dentro de sus características se encuentra que puede ser realimentado o prealimentado, continuo o discreto, en lazo abierto o cerrado, manual o automático; en la ingeniería de control se tratan varias clases de sistemas dentro de las que destacan los de control en tiempo continuo (circuitos eléctricos, sistemas hidráulicos, sistemas mecánicos, sistemas neumáticos, etc.), sistemas analógicos, cuantificados, de control en tiempo discreto (microprocesado), de datos muestreados, de control digital, entre otros.

En un proyecto de ingeniería de control deben haber varias etapas, las cuales serían: descripción del proceso (narrativa, diagramas de flujo, modelado matemático), obtención, instalación y calibración de dispositivos, análisis del sistema, diseño de controladores, programación y depuración (explorar alternativas de implementación) y puesta en funcionamiento, prueba y optimización (discos duros, fuentes, sistemas de respaldo y protección, memoria y comunicación). De aquí proviene el término automatización, la cual es una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos, electrónicos y basados en computadores, en la operación y control de ciertas labores industriales, administrativas o científicas y que es un trabajo complejo tendiente a facilitar la labor del hombre, minimizar su intervención y errores, aumentar la productividad, eliminar los riesgos y peligros de accidente y modernizar la empresa.

A pesar de la cantidad tan importante de ventajas que da la automatización, ésta no está exenta de problemas, dentro de los más sobresalientes se encuentra que se necesita una asimilación tecnológica, capacitación de personal, inversión intensiva de capital, reducción o reubicación de personal, reestructuración de la organización y replanteamiento de las características del producto y su fabricación. Pero a pesar de todo, esto representa una gran opción en el ambiente industrial y según sus niveles (figura 3.20) se adecua a cada sitio o lugar de trabajo.

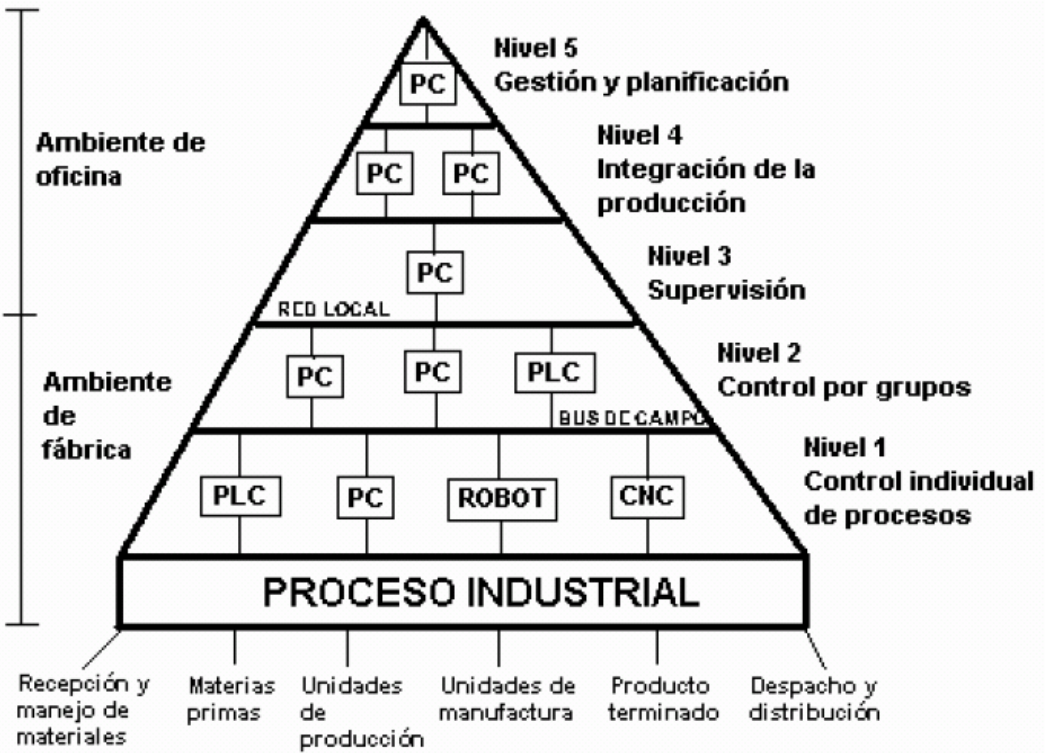


Figura 3.20 Niveles de automatización [26]

Los sistemas de control hacen parte de sistemas más complejos, los cuales requieren de un trabajo interdisciplinario y de una visión más general del problema a resolver, por consiguiente, en esta clase de sistemas se recurre frecuentemente a la aproximación (idealización) de la realidad, como herramienta efectiva de solución de problemas.

Dentro de un sistema dinámico hay varias entradas y salidas, no únicamente las entradas y salidas como tales, aparte de ellas, también están las perturbaciones (medibles y no medibles) y ruido (figura 3.18). Definiendo cada una de ellas, una entrada es una señal que puede ser manipulada por el observador de manera arbitraria (calor, flujo, voltaje); la salida es la señal observable de interés; las perturbaciones medibles son señales que no pueden ser manipuladas por el observador, aunque se pueden medir (temperatura ambiental, presión atmosférica, radiación solar) y las perturbaciones no medibles como el ruido por ejemplo, son señales que se sobreponen a las señales dadas por un instrumento de medición.

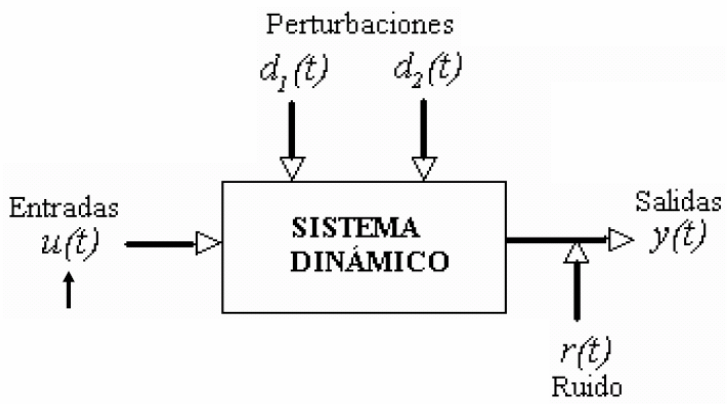


Figura 3.21 Sistema dinámico con sus diferentes entradas y salidas [26]

Sin embargo, todas las variables que aparecen en la figura 3.18 pueden ser controlables de una u otra forma, las perturbaciones medibles por medio de control anticipado, las perturbaciones no medibles por medio de control por realimentación, el ruido cae dentro de esta categoría, pero no se puede controlar por este medio, esta variable requeriría la utilización de filtros analógicos y digitales, esto haría que a la entrada se tengan las variables de control y a la salida las variables controladas.

Al momento de implementar las variables del sistema, se debe tener claro la forma de elegir las variables de entrada, las cuales deben incidir directamente en las salidas, y por consiguiente, diferentes entradas van a tener diferentes efectos sobre la salida, deben elegirse entradas que puedan ser manipuladas confiablemente, en la mayoría de los casos, tratar que la relación de la entrada con respecto a la salida sea lineal. Se recomienda en caso de haber una duda al incluir una entrada, verlo en la fase de identificación; las entradas medibles pero no manipulables, se tratan como perturbaciones o variables de prealimentación. Las variables de salida también deben seleccionarse a conveniencia, las mismas se recomiendan que dependan de los requerimientos de control y del tipo de controlador, que puedan ser medidas y en el caso de la existencia de sensores costosos, algunas de las variables pueden medirse en la fase de identificación, pero inferirse en la fase de control.

En cuanto al control lógico, de acuerdo a unos eventos que se dan en una determinada secuencia, se toma una acción de un número limitado de posibilidades (por lo general encendido/apagado), esto se resume en la ocurrencia de cierta cantidad de eventos (temporización, conteo, nivel) mas un poco de tiempo y da como resultado la acción (encendido o apagado). De aquí surge la necesidad de control de regulación para lo que es la otra etapa del proyecto (automatización con análisis matemático), la cual se realiza llevando la variable controlada a un valor dado (punto de referencia) o al menos a un punto cercano al mismo con sus respectivas características, en este caso se debe proveer en forma constante una acción de control para mantener el valor. El mismo se puede realizar en lazo abierto (plan temporal), lazo cerrado (control de realimentación), anticipando el efecto de las perturbaciones (control prealimentado), en cascada o de otra forma existente, pero se mencionan las anteriores por ser las más comunes.

Dentro de las formas más comunes en que se puede implementar un sistema de control digital, es utilizando un microprocesador, microcontrolador, computador o un PLC. Dentro de las consideraciones generales a tomar en cuenta se encuentran las funciones de la conversión de analógico a digital, esto para lo que es el muestreo y cuantificación. La cuantificación es la representación de una señal continua mediante un número finito de estados discretos, este factor y el muestreo afectan el desempeño de un sistema de control digital, la cuantificación depende del número de bits del convertidor en la etapa anterior.

Reuniendo estos conceptos se llega a la definición de modelo, es la representación simplificada de un sistema, éste sintetiza el conocimiento (relación entre las variables) que se tiene del mismo en dicho aspecto y permite una mejor comprensión y un estudio del comportamiento de dicho sistema en una forma útil, existen muchas clases de modelos, pero en este caso se le va a poner énfasis al modelo matemático. Este concepto es la representación por medio de ecuaciones de la dinámica del sistema, es el modelado más importante para la ciencia y la tecnología, el mismo es muy útil en el aspecto de comunicación y educación, es la base del diseño en ingeniería y en cualquier otra área y por sus características tiene una gran capacidad de síntesis.

Los modelos matemáticos poseen una gran utilidad en lo que es ingeniería, y en específico, ingeniería de control, estos modelos sirven en el análisis, o sea, comprensión y evaluación de un sistema (relación entre variables), diseño para el mejoramiento y la optimización (construcción de un nuevo sistema o reestructuración de uno ya existente), predicción y pronóstico del comportamiento de un sistema (a partir de la simulación) como base para tomar decisiones, control (adición de nuevos componentes a un sistema de manera que se obtenga un desempeño adecuado), enseñanza y comunicación (transmisión del conocimiento acerca de un sistema en forma universal y objetiva), de aquí surge la estimación de variables no medibles, las pruebas de las hipótesis y el procesamiento de señales (cancelación del ruido, compresión de datos, filtrado, interpolación). Los modelos matemáticos más comunes se basan en ecuaciones diferenciales, ecuaciones de diferencias, función de transferencia continua (uso de la transformada de Laplace), función de transferencia discreta (uso de la transformada Z), ecuaciones de estado continuas (sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden), ecuaciones de estado discretas (sistemas de ecuaciones de diferencias de primer orden).

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

En ingeniería existen muchas formas de llevar los problemas a una solución, lo primero que se debe hacer para solucionarlo es reconocerlo, definir sus alcances y limitaciones al momento en que se va a buscar su posible solución, luego empezar a plantear posibles caminos que le lleven a una solución y posteriormente llevar la solución elegida a su implementación, dejando la posibilidad de colocarle otras etapas si el proyecto así lo amerita, o bien dejando abierta la posibilidad de optimizarlo. Se requiere de una serie de procedimientos para lograr cada uno de los objetivos según lo que se busque solucionar en un proyecto.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

El problema de la temperatura interna de la planta se viene suscitando hace varios años, debido a la existencia de maquinaria, personas laborando, iluminación e infraestructura del edificio, con la llegada de varias máquinas para la producción de pañales el problema aumentó y fue necesaria la instalación de un sistema de aire acondicionado que abasteciera toda la planta, la primer máquina en poseer aire acondicionado fue la BCM (CAI 04), el cual se hizo automatizando el sistema para el control de temperatura y humedad, posterior a esta máquina, el aire acondicionado se instaló en las otras tres máquinas pero sin su debida automatización, sólo se hizo con flujo de aire en forma constante por parte del sistema.

Como las cargas térmicas varían con el tiempo, muchos de los trabajadores se vieron afectados por la falta de control en cuanto a la temperatura, este problema se manifestó en las quejas por parte de los empleados, se decidió suspender el sistema de aire acondicionado por las noches, a pesar de lo bajo que se encuentra la temperatura externa respecto a la interna, las cargas térmicas dentro del edificio elevan mucho la temperatura (alrededor de los 27° C), se crea una nueva disconformidad en el ambiente de trabajo.

El problema se volvió a manifestar con nuevas quejas, pero esta vez por las altas temperaturas por la noche, la carga térmica que es generada dentro del edificio es muy alta y por la misma razón se vuelve muy alto el nivel de temperatura. También se generó la incógnita de si realmente el sistema era capaz de anular las cargas térmicas de la planta, máxime que el "chiller" trabaja a un 66% de su capacidad, entonces se debía realizar un estudio para saber si en realidad el sistema es el adecuado para la planta.

La forma más efectiva para detectar el problema fue por medio de simples quejas, también por mediciones de temperatura en las áreas donde se concentraba la mayor cantidad de personas durante una jornada laboral, la cual efectivamente era baja para el confort de un ser humano, esta llegó a 16.5° C en ocasiones durante la madrugada con el sistema habilitado, lo cual es muy bajo dentro de un edificio en donde labora gran cantidad de personas. Mientras que en las horas en que permanecía deshabilitado, la temperatura llegaba a ser relativamente alta (hasta 27º C en horas cercanas a las 7 a.m.).

Debido a las circunstancias, se vio la necesidad de llevar a cabo la automatización del sistema de aire acondicionado en su totalidad, así como medir el nivel de cargas térmicas tanto de la planta como de enfriamiento del sistema, en vista de que es un sistema tan indispensable, se necesitaron plantear dos soluciones diferentes para un mismo problema, una que sirvió de soporte en caso de fallar la otra. Las restricciones del problema radican en que sólo se controlaron las cargas sensibles y no las latentes (de momento), por medio del control de la temperatura, el plano de la temperatura se manejó independiente de la humedad aunque se encuentren íntimamente ligados ambos aspectos.

Otra restricción fue la eventual caída extrema de la temperatura, existe un momento en que el flujo de agua a través del sistema se volvería nulo, será ese momento en el que la temperatura exceda el límite inferior para permitir el flujo de agua a través del sistema hidráulico, a partir de ese instante, el agua dejaría de fluir por el sistema de tuberías, el sistema de aire acondicionado se detendrá, se activará de nuevo hasta que la temperatura sobrepase el límite inferior, comenzará a pasar la cantidad mínima de agua permitida por el sistema a través de la tubería, aunque esta posibilidad es muy remota debido a las condiciones ambientales del sector en donde se ubica la planta y las condiciones del país en general, pero en caso de darse, el sistema de aire acondicionado poseerá esa restricción y perdería su utilidad durante ese intervalo de tiempo.

Tomando en cuenta que el sistema posee una parte automatizada y otra no (apartado 3.1), se trabajó dentro del sistema presente, o sea, se utilizó el controlador escogido para implementar la primera parte del proyecto, porque ya se tiene la ubicación para los controles moduladores, se eligió un PLC debido a que es un dispositivo robusto y de gran capacidad de adaptación a condiciones ambientales inversas, llamase a éstas, condiciones industriales. Es un PLC 5 / 04 Allen Bradley, la cual es la marca que se desea estandarizar en toda la empresa, este PLC controla el actual sistema de aire acondicionado sobre el que se basó el proyecto.

La empresa también posee su propio estándar de detectores de temperatura, por lo cual se eligió entre una cantidad limitada de dispositivos sensibles a la variación de temperatura, el cual debió tener las características requeridas para satisfacer las necesidades del proyecto en cuanto a que soporte situaciones adversas, un rango de error bajo, no sea muy costoso y poseer cierto rango de variación proporcional a los cambios de calor.

4.2 Obtención y análisis de información

La información preliminar para el proyecto se encontró por medio del estudio de sistemas de aire acondicionado industriales, utilizando como fuente de información Internet e inclusive los principios y causas por las cuales la planta instaló el sistema que actualmente tiene en uso, se utilizó Internet debido a que es una fuente sumamente actualizada en donde se pudo encontrar lo último en este tipo de sistemas de enfriamiento. Para el cálculo del calor sensible e inclusive el latente, se usaron tablas con valores de diferencia de temperaturas equivalentes (DTE) para techos y paredes, así como tablas de calor despedido por personas dependiendo de la actividad que realizan.

En la implementación de la solución no se pudo usar como herramienta el desarrollo de “hardware” en forma directa, puesto que la empresa tiene un estándar de dispositivos y equipos, los cuales han sido usados y probados con anticipo, los cuales funcionan adecuadamente según su desempeño, de aquí que no se permitiera el diseño de tarjetas o dispositivos para procesar señales o datos por ejemplo, también debido a la restricción existente en la empresa, en donde hay un alto índice de condiciones extremas, así que los dispositivos a desarrollar debieron poseer las características necesarias para contrarrestar estos efectos, lo cual hubiera hecho el desarrollo expuesto a una cantidad mayor de pruebas y tendiente a una optimización constante.

Es importante destacar que el equipo requerido debe adaptarse en lo posible a las necesidades actuales. Se buscó una solución integral, de calidad y con características industriales, esto por el ambiente difícil en el cual debe operar.

Dentro de las limitantes al momento de realizar la búsqueda y llevar a cabo la solución, la existencia de otro “software” (utilizado para tener el control automático del sistema de aire acondicionado de la CAI 04), el cual se encuentra trabajando y fue modificado para desarrollar la solución, debido a que el PLC para el sistema de la máquina BCM es el mismo que se utilizó para controlar el sistema en toda la planta.

Las personas encargadas de realizar este proyecto fueron practicantes y no se encuentran en la empresa, aparte de la cantidad de errores presentes en el sistema, los cuales no se tomaron en cuenta, pues se obvió esta parte del programa y se implementó la solución para el sistema de aire acondicionado de la nave 108, también se buscó otra para dejar automatizado el sistema de la nave 107, el cual se encuentra funcionando en forma manual actualmente.

Según estándares internacionales de la empresa y específicamente la NEC (National Electric Code de Estados Unidos) y la NFPA (National Fire Protection Agency), los dispositivos controlados por 110 V ó más, ya sea corriente directa o alterna deben ubicarse en un lugar en donde la rotulación sea prioritaria indicando los posibles peligros además del nivel del voltaje, también deben encontrarse bajo un estricto orden en donde se puedan ubicar todas las entradas, protecciones y salidas de cada uno de los diferentes dispositivos que conforman al sistema en su totalidad. De aquí la necesidad del trabajo y ubicación en el gabinete existente en la planta para tal fin.

En la tabla 4.1 se pueden apreciar todos los dispositivos capaces de detectar cambios en el nivel de temperatura que utiliza la empresa según sus órdenes de compra, de los mismos se descartaron los RTD, debido a la distancia existente entre cada dispositivo hasta el panel donde se encuentra el PLC influye en los cambios de resistencia, algunos de los mismos son muy costosos, por esa razón también se descartaron las termocuplas porque no reúnen las condiciones adecuadas para transmisiones a largas distancias hasta una tarjeta recolectora de datos, por lo cual se debió utilizar sensores de temperatura.

Tabla 4.1 Lista de dispositivos capaces de detectar cambios en la temperatura permitidos y probados para utilizar en la empresa

Referencia	Descripción del dispositivo
1	Sensor de temperatura RIC-247
2	Sensor de temperatura RTD de Níkel 937277
3	Sensor de temperatura C2142 – 0048
4	Sensor de temperatura Dwyer 5611123104000003604
5	Sensor de temperatura P/CF200 Guns 274731
6	Sensor de temperatura RTD 48” 939739
7	Termocupla tipo J ZTC-52/FC/001030
8	Sensor de temperatura 314856
9	Sensor de temperatura Durec RA01–AB–036L0-01
10	Sensor de temperatura RTD 7.420.003.040
11	RTD larga 3002622
12	Sensor RTD Nordson 237207
13	Sensor de temperatura RTD 7.420.005.080
14	Sensor de temperatura RTD 35L 143974ª
15	Sensor RTD Nordson 90 Bayonet 237206
16	Sensor RTD 100 ohm 10” 140305
17	Termocupla 24 Doboy 261682
18	Termocupla PT100
19	Termocupla Doboy 082 – 35038
20	Sensor de temperatura aluminio, 100 ohm TE – 6300
21	Sensor RTD Dwyer 56351-1233018-018-30004

De la lista mostrada en la tabla 4.1, se descartaron catorce referencias, con lo que únicamente se pudo utilizar siete de ellas, las referencias 1, 3, 4, 5, 8, 9 y 20, las que poseen la mayor capacidad para transmitir los cambios en su resistencia a través de largas distancias fueron las referencias 8 y 20, sin embargo, el que se utilizó en la primera parte del proyecto fue la referencia 20, por lo que para estandarizar los sensores de temperatura en todo el sistema de aire acondicionado, se utilizó esta referencia, el sensor es de la marca Johnson Controls y sus características se muestran en el anexo B.2.

En lo que respecta al variador de frecuencia marca Yaskawa y sus características, se utilizó este, debido a que la empresa ya lo había adquirido, la corporación no tuvo que invertir en este equipo, es el mismo que gobierna a la bomba reguladora del flujo de agua para el sistema de la nave 107, esta fue una manera de utilizar la misma clase de variador para todo el sistema de aire acondicionado.

En cuanto al motor utilizado (bomba centrífuga), éste se encontraba instalado en el sistema hidráulico aunque funcionaba como refuerzo de la otra bomba que enviaba agua a través de todo el sistema, la idea fue independizar uno para cada nave, las características de este equipo fueron las encargadas de la succión de agua a través de todo el sistema, con esto se estandarizó también el uso de la misma clase de motor para todo el sistema de aire acondicionado, tampoco se invirtió en la compra de uno para el proyecto.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

El sistema de aire acondicionado llevó a los ingenieros encargados de los proyectos a proponer dos soluciones al problema, una mediante control encendido/apagado y otra mediante control proporcional a los cambios de temperatura. Para implementar la solución, se necesitaron válvulas de tres vías y los respectivos sensores para evaluar los cambios en la planta para todo momento, primero se llevó a cabo la solución de control encendido/apagado debido a que únicamente se le dio un límite inferior de temperatura y uno superior controlable a través de la interfase (punto de referencia), el programa para el control de esta variable se desarrolló únicamente con comparadores que activan o desactivan la válvula si se pasa de ciertos límites, no hubo cálculos matemáticos aparte de determinar el promedio de los sensores en cada máquina de la planta y mantenerla en ± 2° C del valor que se le asignó en cada punto de referencia en la interfase. La actividad física de las personas ubicadas en estos sectores de la planta es similar para prácticamente todas, la vestimenta es muy similar para todas las personas porque la empresa brinda uniformes a sus empleados, con esto se estandarizó la labor de cada persona y su atuendo para hacer válida la ecuación 3.3.

La solución variando el flujo de agua a través del sistema de tuberías fue más tediosa en el sentido del cálculo de las cargas térmicas, modelación del sistema, diseño del regulador y su respectivo paso a tiempo discreto para determinar un adecuado tiempo de muestreo del nivel de la temperatura, así que estando el control encendido/apagado implementado, disminuyó considerablemente la tensión térmica en los empleados, también se requirió sólo de desarrollo matemático e implementación de “software” para regular la cantidad de fluido en el sistema hidráulico.

Las pruebas luego de implementada la solución utilizando el control encendido/apagado fueron con medidas de temperatura en la planta, las medidas se llevaron a cabo debido a que las pruebas pudieran dar un valor, mientras que el valor real de la magnitud de la temperatura pudiera ser otro lo mismo que su regulación.

Sin embargo, para justificar una posible solución se hizo un estudio de cargas térmicas en toda la planta para ver si realmente el sistema de aire acondicionado era capaz de suplir las necesidades de anular el exceso de éstas.

4.4 Implementación de la solución

La solución se implementó siguiendo una secuencia de pasos, o sea, cuando se desarrolló el programa, se le hicieron sus pruebas respectivas forzando a cambiar de estado una salida, utilizando los límites superior e inferior de tolerancia en ambas soluciones.

Se procedió a evaluar el desempeño de ambas automatizaciones en cuanto a la velocidad de reacción para acondicionar el aire, eficiencia en cuanto a nivel de temperatura mantenida y ahorro de energía. Mediciones en el nivel de temperatura en la planta, mediciones de potencia en el sistema respecto a estas variables determinarán el uso de una solución la mayor parte del tiempo respecto a la otra, aunque ambas se pueden utilizar en un determinado momento en que una de las dos falle, en este caso se usará en forma exclusiva una de las dos hasta que la otra se repare.

El sistema funciona tanto en forma automática como manual, se implementó de ambas formas con el fin de prevenir fallas futuras en el sistema en forma automática, la temperatura de la nave 108 pudo controlarse de forma manual con esta implementación, se utilizó este control para mediciones de temperatura en la planta según la hora del día, si se obtuvieron los resultados deseados o no y el tiempo de respuesta para lograr el cambio en el nivel de la temperatura, de aquí se realizó la optimización del sistema con cambios en el límite superior e inferior en la temperatura de ser necesario tomando como referencia un nivel de 22°C, ya que cumpliría lo especificado en la ecuación 3.3, aunque debido a eventuales cambios tiene la posibilidad de forzarse a estar en otros rangos de temperatura.

Obtener la carga térmica de la nave 108, modelar la planta, diseñar el regulador y posteriormente pasarlo al dominio del tiempo discreto representó un proceso lineal por cumplir luego de implementar la solución mediante control encendido/apagado, la cual se probó con mediciones de temperatura tomando en cuenta su magnitud y velocidad de variación. El análisis matemático debió mostrar la programación a desarrollar en el PLC para evaluar la ecuación de diferencias, lograr el control adecuado del variador de frecuencia directamente proporcional al rango que brindaron los sensores de temperatura, regulando el flujo de agua que generan las bombas centrífugas.

Habiendo implementado el nivel de programación y habiéndose solucionado el problema, se hicieron varias reuniones y exposiciones para divulgar lo obtenido y la forma en que se manipuló todo lo logrado en el proyecto (a quienes interese), dejando los debidos planos eléctricos del sistema modificado y la respectiva documentación lista en formato digital e impreso. También se desarrolló un manual de usuario para todo el control del sistema de aire acondicionado, el cual no existía hasta la fecha.

4.4.1 Control encendido/apagado

En el control encendido/apagado se debió apreciar una habilitación o deshabilitación a su salida. Estas comprobaciones de programa se llevaron a cabo en un PLC de pruebas y en el sistema de aire acondicionado mediante un forzamiento del mismo, las salidas se evaluaron directamente con un equipo capaz de medir resistencia, corriente y tensión eléctrica, ya que sólo dio continuidad o discontinuidad en el caso del control encendido/apagado.

El sistema mediante el control encendido/apagado debió responder según el diagrama de la figura 4.1 cuando funcionó en forma automática.

LST significa límite superior de temperatura y LIT límite inferior de temperatura conforme las siglas mostradas en la figura 4.1. Este límite iba a ser gobernado por una ecuación matemática (3.3) en un principio, pero debido a especificaciones por parte del departamento de ingeniería se amplió su rango de $\pm$ 2°C respecto a un punto de referencia, con esto se logra asegurar un nivel adecuado en caso de requerir una temperatura mayor o menor a la establecida, sin embargo el sistema también tiene la restricción de no permitir un nivel menor a los 15°C ni mayor a los 30°C, porque ese sería un nivel no confortable para nadie bajo ninguna circunstancia según lo especificado en el apartado 3.2.2.

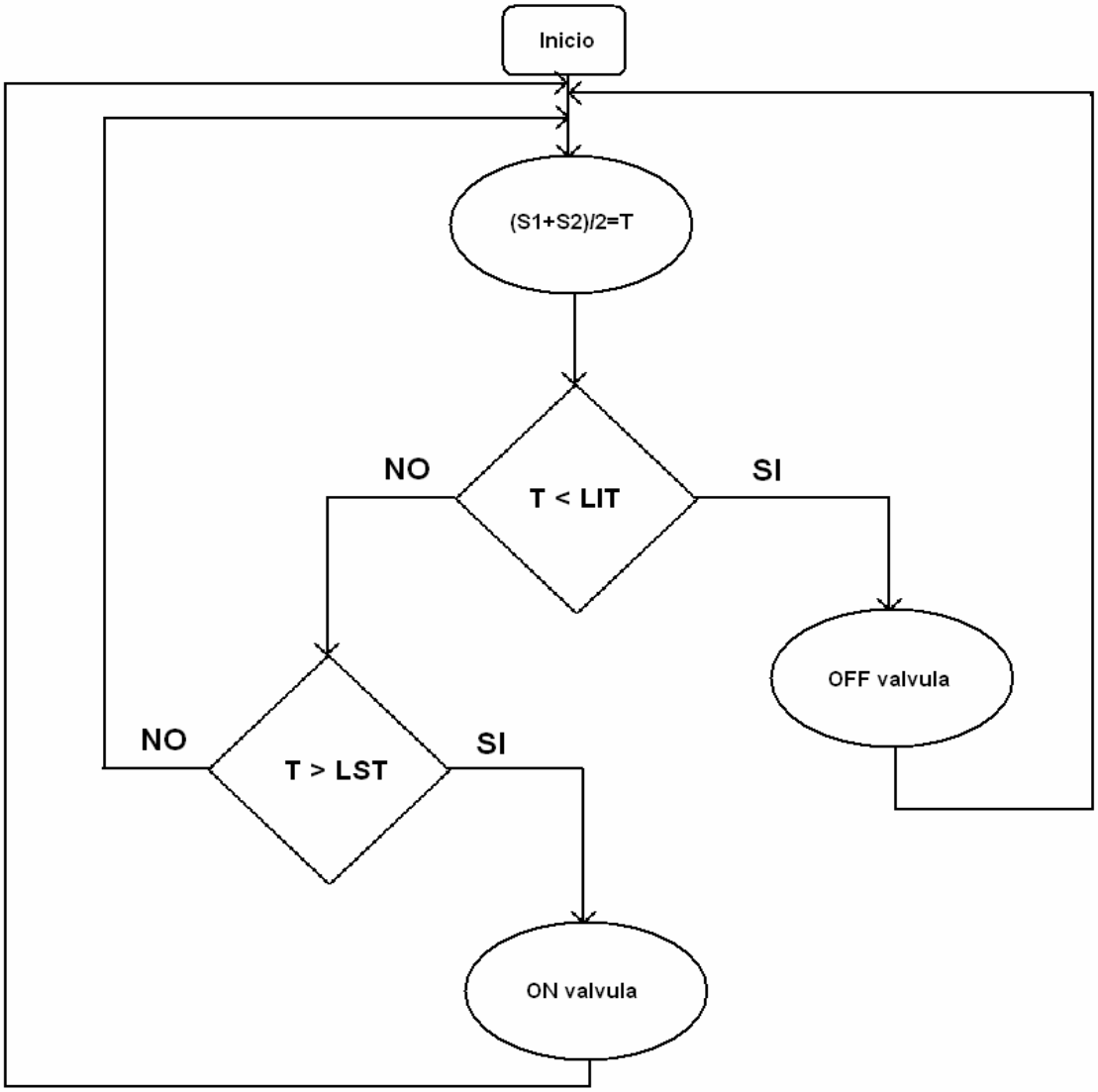


Figura 4.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mediante control encendido/apagado

4.4.2 Control de enfriamiento del aire según el nivel de temperatura

En el apartado 4.2 se habló de estandarizar todos los dispositivos del sistema de aire acondicionado, esto con el fin de tener una única clase de dispositivos que controlen todo el sistema, además que es equipo probado y está funcionando en el sistema, así se eligió el variador de frecuencia y la bomba centrífuga necesarios para la solución, también porque la empresa no debió invertir en estos equipos porque se encontraban en la planta.

En cuanto a los sensores, se estandarizaron y se instalaron los mismos que posee el sistema en otros sectores, ya están probados, funcionan a larga distancia respecto al control central del sistema y son dispositivos industriales, los sensores se instalaron de tal forma que coincidieran los sitios de ubicación respecto a las tres.

Los sensores se instalaron en los sectores donde se encuentra la mayor cantidad de personas laborando, por cada máquina trabajan en promedio 15 personas en forma constante (24 horas al día), en la figura 4.2 se muestran las longitudes de cada máquina en forma aproximada, los sensores se ubicaron en los punto A y B según el esquema de la figura 4.2, ambos se encontraron separados por aproximadamente 12 metros de distancia y el que está en el sector A, está separado del inicio de la máquina cerca de 1.5 metros.

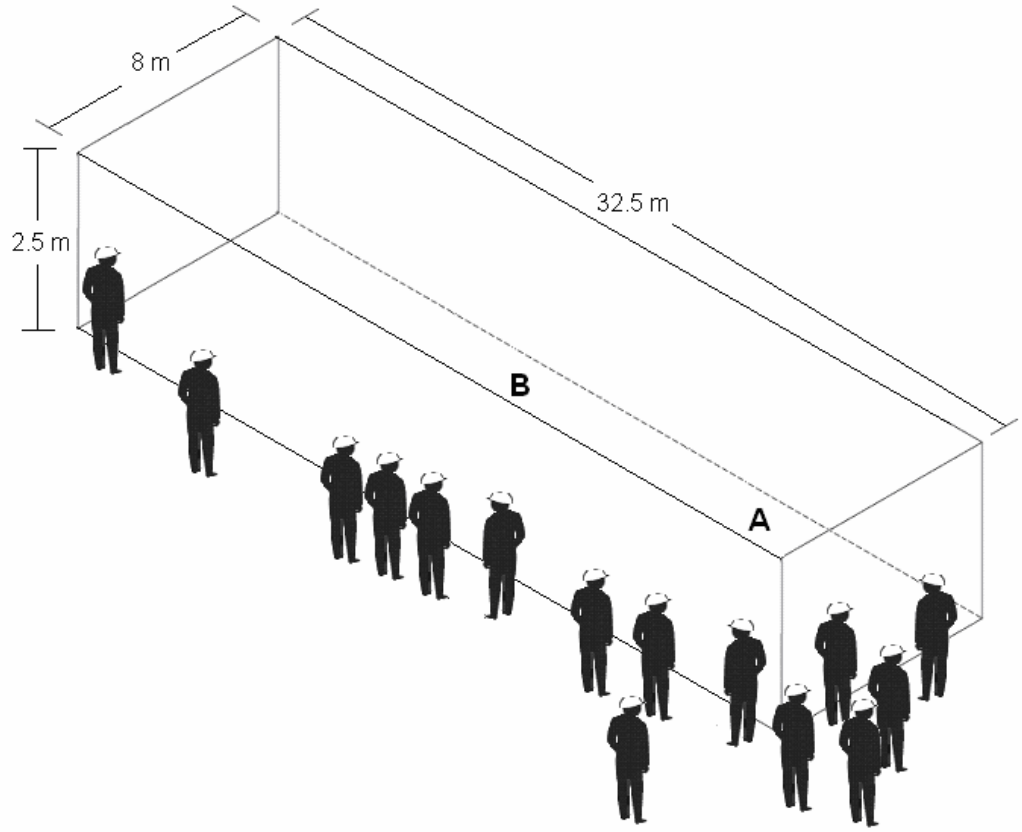


Figura 4.2 Esquema de dimensiones de máquina, personal y ubicación de sensores en los puntos A y B

En un sistema en donde la influencia se debe principalmente a las matemáticas y no condiciones de uno o cero (como en los sistemas digitales), es muy difícil realizar un diagrama de flujo que caracterice en forma adecuada el desempeño del sistema tal y como se implementó. Sin embargo, en la figura 4.3 aparece un diagrama de flujo en donde se muestra el funcionamiento del sistema cuando funciona variando la cantidad de flujo en las tuberías, este diagrama no muestra el nivel matemático que se desarrolló para llegar a su consecución, pero sí su funcionamiento a nivel global.

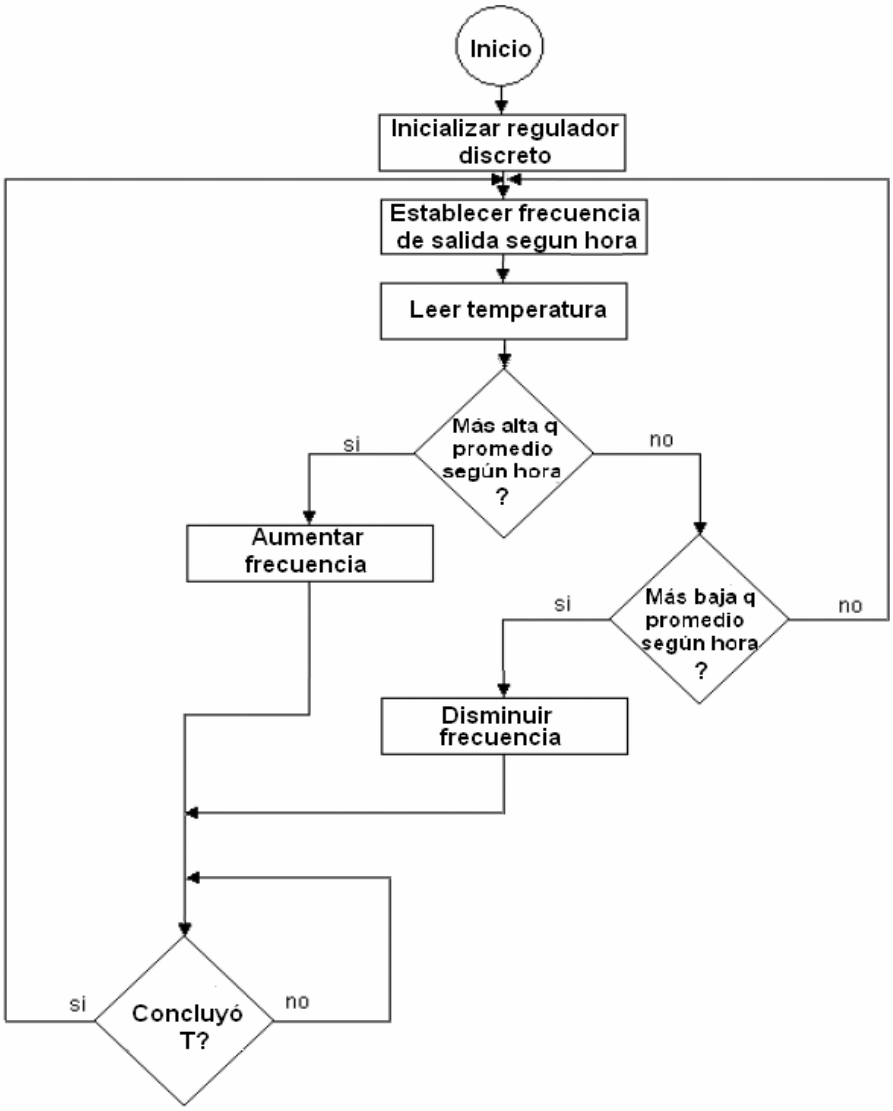


Figura 4.3 Diagrama de funcionamiento del sistema mediante control de enfriamiento del aire según el nivel de temperatura

El diagrama mostrado en la figura 4.3 explica el funcionamiento en forma general del sistema de aire acondicionado trabajando, el inicio del programa marca la inicialización de variables, en este caso en particular, la que mayor importancia conlleva para la aplicación del algoritmo aplicado al sistema es la del regulador discreto, a causa de que el regulador es predictorio respecto al tiempo, el mismo revisa la hora y establece una frecuencia para el bomba que controla el flujo de agua a través del sistema de tuberías, esta frecuencia está determinada según la hora en que se encuentre en el transcurso del día el sistema en funcionamiento. Esta predicción está sujeta a cambios según el nivel de temperatura en la planta, ya que si el mismo se sale del rango que establece el regulador, debe realizar un cambio en la magnitud de la frecuencia de entrada a la bomba centrífuga; este cambio puede ser un aumento o una disminución en la frecuencia de entrada al motor, una vez hecha esta variante en caso de que aplique, el sistema actualizará al regulador según la hora y revisará el nivel de temperatura en la planta, este se llevará a cabo cada período de muestreo establecido dentro del regulador de temperatura del sistema.

Tanto el diagrama de la figura 4.2 como el de la figura 4.3 muestran lo que pasaría en el sistema en caso de estar funcionando en forma automática, ambas soluciones pueden ser implementadas en forma manual, sin embargo, el detalle de estás dos soluciones se mostrará en el apartado 5.5.

4.5 Reevaluación y rediseño

Este proyecto trajo mucha satisfacción a los empleados de la planta de encontrarse dentro de un rango de temperatura agradable para el ser humano, independientemente de las circunstancias externas e internas de la edificación. Sin embargo, no se controlaron las cargas térmicas latentes, este es un problema que puede traer consecuencias negativas para la empresa, porque uno de los materiales que posee el pañal y que lo hace súper absorbente es el químico llamado SAM (material súper absorbente), por sus características, puede absorber humedad del medio, con lo cual pierde capacidad de absorción en la práctica, no obstante, esto se da en cantidades sumamente bajas, también genera una pequeña disminución en la calidad y rendimiento del pañal. Este problema se podrá corregir con la puesta en marcha de las calderas y colocando sensores de humedad en la nave 108; la 107 se encuentra equipada para esta eventualidad aunque no se encuentre en uso por el momento.

Un eventual proyecto a futuro por parte de la empresa sería regular el nivel de humedad en la planta, este nivel anda un poco superior al 60% en forma relativa, a pesar de las circunstancias de la planta se podrá mejorar, acercarlo más al nivel optimo de confort para el ser humano (50%), para tener esta alternativa en caso que alguna eventualidad haga que el nivel de humedad suba a niveles superiores respecto a los que posee normalmente.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En esta sección se expone en forma detallada cada nivel de la solución al problema con respecto al nivel de la temperatura en la planta, mostrando los bloques más relevantes para el sistema en forma general hasta los niveles más específicos de cada bloque que conforma la solución en forma completa. Es importante ubicar en este capítulo un apartado para determinar el modelo de la planta y otro para establecer su debido regulador.

5.1 Modelado de la planta

En lo que respecta al modelado de la planta, se realizaron una serie de mediciones, las cuales se muestran en el apartado 6.1 como parte de los resultados experimentales. A partir de esos valores se puede encontrar un modelo matemático para el sistema basado en la técnica de modelado estocástico por estimación de mínimos cuadrados, este método da como resultado una función de transferencia en Z de la manera en que se muestra en la ecuación 5.1.

$$G(z) = \frac{C(z)}{M(z)} = \frac{k * z^{-d}}{(z - e^{(\frac{-T}{\tau})})} \qquad (5.1)$$

Donde:

G: función de transferencia para el modelo estocástico.

C: salidas del sistema en función de Z.

M: entradas al sistema en función de Z.

k: constante de la función.

T: período de muestreo de la función de transferencia.

τ **:** retardo del sistema.

A la función de transferencia de la ecuación 5.1 se le puede sacar la ecuación de diferencias que aparece en la ecuación 5.2.

$$c_n = e^{(\frac{-T}{\tau})} * c_{n-1} + k * m_{n-d-1} \quad (5.2)$$

Tomando en cuenta que las mediciones realizadas pueden contener errores a causa del tiempo de respuesta tan lento del sistema, además de los lugares en donde se tomaron las mediciones pudieron estar más cerca o no de fuentes de calor que varían en su magnitud para transferir calor. Se le puede agregar al sistema un error ε_n, de esta manera se puede reescribir la ecuación 5.2 como aparece en la ecuación 5.3.

$$c_n = \alpha * c_{n-1} + \beta * m_{n-1-d} + \varepsilon_n \quad (5.3)$$

Donde:

$$\alpha = e^{(\frac{-T}{\tau})} \quad (5.4)$$

$$\beta = k \quad (5.5)$$

Se minimizan la suma de los errores al cuadrado y se da la ecuación 5.6.

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{N} \varepsilon^2 \quad (5.6)$$

N implica en la ecuación 5.6 el número de muestras tomadas, en este caso específico, el número de mediciones de temperatura tomadas en la planta para el sector donde se desea regular la misma. A partir de la ecuación 5.3 y la 5.6 se obtiene la 5.7.

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{N} (c_n - \alpha * c_{n-1} - \beta * m_{n-1-d})^2 \quad (5.7)$$

Ante la búsqueda del valor mínimo de la función suma de cuadrados, estos valores se pueden obtener de las derivadas parciales con respecto a α y β de la ecuación 5.7, dando como resultado las ecuaciones 5.8 y 5.9.

$$\frac{\partial S(\alpha,\beta)}{\partial \alpha} = -2\sum_{n=1}^{N}(c_n - \alpha * c_{n-1} - \beta * m_{n-1-d}) * c_{n-1} \tag{5.8}$$

$$\frac{\partial S(\alpha,\beta)}{\partial \beta} = -2\sum_{n=1}^{N}(c_n - \alpha * c_{n-1} - \beta * m_{n-1-d}) * m_{n-1-d} \tag{5.9}$$

Se igualan ambas derivadas a cero y se obtienen en forma simplificada las ecuaciones 5.10 y 5.11 [13].

$$\alpha_f \sum_{n=1}^{N} c_{n-1}^2 + \beta_f \sum_{n=1}^{N} m_{n-1-d} * c_{n-1} = \sum_{n=1}^{N} c_n * c_{n-1} \tag{5.10}$$

$$\alpha_f \sum_{n=1}^{N} c_{n-1} * m_{n-1-d} + \beta_f \sum_{n=1}^{N} m_{n-1-d}^2 * c_{n-1} = \sum_{n=1}^{N} c_n * m_{n-1-d} \tag{5.11}$$

Donde:

α_f; valor final estimado para α.

β_f: valor final estimado para β.

Despejando los valores de α_f y β_f para las ecuaciones 5.10 y 5.11 respectivamente se obtienen los valores para las respectivas variables mostradas en las ecuaciones 5.12 y 5.13.

$$\alpha_f = \frac{\sum_{n=1}^{N} c_n * c_{n-1} \sum_{n=1}^{N} m_{n-1-d}^2 - \sum_{n=1}^{N} c_{n-1} * m_{n-1-d} \sum_{n=1}^{N} c_n * m_{n-1-d}}{\sum_{n=1}^{N} c_{n-1}^2 \sum_{n=1}^{N} m_{n-1-d}^2 - (\sum_{n=1}^{N} c_{n-1} * m_{n-1-d})^2} \tag{5.12}$$

$$\beta_f = \frac{\sum_{n=1}^{N} c_{n-1}^2 \sum_{n=1}^{N} c_n m_{n-1-d} - \sum_{n=1}^{N} c_n * c_{n-1} \sum_{n=1}^{N} c_{n-1} * m_{n-1-d}}{\sum_{n=1}^{N} c_{n-1}^2 \sum_{n=1}^{N} m_{n-1-d}^2 - (\sum_{n=1}^{N} c_{n-1} * m_{n-1-d})^2} \quad (5.13)$$

Estos valores podrían presentar problemas si los valores para *c* y *m* se registran a partir de *n=0*, sin embargo, en el proceso de las mediciones de temperatura realizadas en la planta esto no se da a causa de que es un proceso cíclico y están siendo evaluados respecto con valores promedio de diferentes días, por consiguiente, las muestras anteriores al primer dato también se encuentran al final de las mediciones presentadas en la tabla 6.1, donde aparecen algunas de las más significativas llevadas a cabo en la planta para distintos sectores y épocas del año [13].

Los valores finales determinados tanto para τ como para **k** se resuelven a partir de la ecuación 5.4 y 5.5 respectivamente, dando como resultado las ecuaciones 5.14 y 5.15.

$$\tau_f = \frac{-T}{\ln(\alpha_f)} \quad (5.14)$$

$$k_f = \beta_f \quad (5.15)$$

Dadas todas las mediciones mostrados en la tabla 6.1 y las quince ecuaciones anteriores de este capítulo, se llegan a los valores buscados.

α = 0.9605

β = 2.05565

Con todos estos valores también se puede obtener los de τ y **k** para asignar la ecuación 5.1 con sus valores despejados en el dominio de Z para un tiempo de muestreo de 0.25 en la ecuación 5.16. Y con un período de muestreo como variable en la ecuación 5.17.

$$G(z) = \frac{2.05565z^{-2}}{(z - 0.9605)} \tag{5.16}$$

$$G(z) = \frac{2.05565z^{-2}}{(z - e^{-0.0403T})} \tag{5.17}$$

El siguiente paso a dar sería el de asignarle un regulador a esta planta, dicho diseño se realiza en el apartado 5.6 y se lleva a cabo en tiempo discreto.

5.2 Cálculo de cargas térmicas[7]

El nivel de cargas térmicas en la planta y de enfriamiento es uno de los factores más importantes a determinar antes de realizar el proyecto, la justificación principal es lograr un nivel de confort térmico en los empleados de la planta. No obstante, si las cargas térmicas del sistema de aire acondicionado no logran anular a las que se encuentran en exceso debido a toda la industria, el proyecto no tendría sentido, ya que nunca se llegaría a lograr el objetivo principal del proyecto como tal. En el hipotético caso de que las cargas térmicas de la planta sean mayores que las de enfriamiento, existe la posibilidad de darle el 100% de potencia al "chiller" para aumentar el enfriamiento, si aún con esa variante, el nivel de las cargas de enfriamiento no llega a estar por encima de las de la planta, no quedaría otra opción que cambiar o modificar las unidades centrales de aire para lograr el objetivo. De aquí la importancia trascendental del cálculo de las cargas térmicas.

[7] La fuente bibliográfica de donde se obtuvieron todas las ecuaciones que hacen posible el cálculo de las cargas térmicas, se presentan en paréntesis cuadrados al inicio de cada apartado.

5.2.1 Calor generado por el alumbrado del local [1]

La ecuación para calcular la ganancia de calor debida al alumbrado es:

$$Q = 3.4 * W * FB * FCE \tag{5.18}$$

Donde:

Q: Ganancia neta de calor debida al alumbrado (BTU / h).

W: Capacidad del alumbrado (W).

FB: Factor de balastra.

FCE: Factor de carga de enfriamiento para el alumbrado.

El término W es la capacidad nominal de las luces en uso, expresadas en watts. En muchas aplicaciones todo el alumbrado está encendido siempre, pero si no lo está se debe emplear la cantidad real. El valor 3,4 es para convertir watts a BTU /h.

El factor FB toma en cuenta las pérdidas de calor en la balastra de las unidades fluorescentes u otras pérdidas especiales, para alumbrado fluorescente el valor de FB es de 1.25 y para alumbrado incandescente es de 1.0.

El factor FCE toma en cuenta el almacenamiento de la ganancia de calor por alumbrado.

Datos para el cálculo:

- En la empresa la iluminación es fluorescente.
- En la nave hay 73 lámparas que tienen 8 bombillos de 32 W cada una.
- La capacidad del alumbrado es de W = 448512 W / h.
- Se supone un valor se FB = 1.25 para el calor de la balastra.

- Para las condiciones de operación FCE = 1.0.

Aplicando la ecuación (5.18) se obtiene:

$$Q = 3.4 * (18688 * 24) * 1.25 * 1 = 1906176 BTU / h$$

5.2.2 Calor generado por personas [1]

La ganancia de calor debida a las personas se compone de dos partes: el calor sensible y el calor latente que resulta de la transpiración. Algo del calor sensible se puede absorber por el efecto de almacenamiento de éste, pero las ganancias de calor sensible y latente originado en las personas son:

$$Q_S = q_S * n * FCE \tag{5.19}$$

$$Q_L = q_L * n \tag{5.20}$$

Donde:

QS, QL: Ganancia de calor sensible y latente respectivamente.

q_S, q_L: Ganancia de calor sensible y latente por persona respectivamente.

n: Número de personas.

FCE: Factor de carga de enfriamiento para personas.

La ganancia de calor debido a la gente depende de su actividad física. La tabla 3.4, da una lista de valores para algunas actividades típicas. Las actividades están determinadas para una temperatura BS de recinto de 78^{o}F.

El factor FCE, del efecto de almacenamiento de calor, se aplica a la ganancia de calor ocasionado por las personas. Si el sistema se apaga durante la noche no se debe incluir almacenamiento de calor y el FCE = 1.0.

Datos para el cálculo:

- Aproximadamente se encuentran en la planta 30 personas.

- De la tabla A4.7 se obtiene que, para la actividad de trabajo pesado o trabajo con máquina aplicado a una fabrica, se consiguen los siguientes valores:

  - **q_S =** 565 BTU/h

  - **q_L =** 1035 BTU/h

- Como el aire se apaga por las noches, no se incluye almacenamiento de calor y el **FCE** = 1.

Aplicando las ecuaciones (5.19) y (5.20) se obtiene:

$$Q_S = 565 * 45 * 1 = 25425 BTU/h$$

$$Q_L = 1035 * 45 = 46575 BTU/h$$

5.2.3 Calor generado a través de paredes [1]

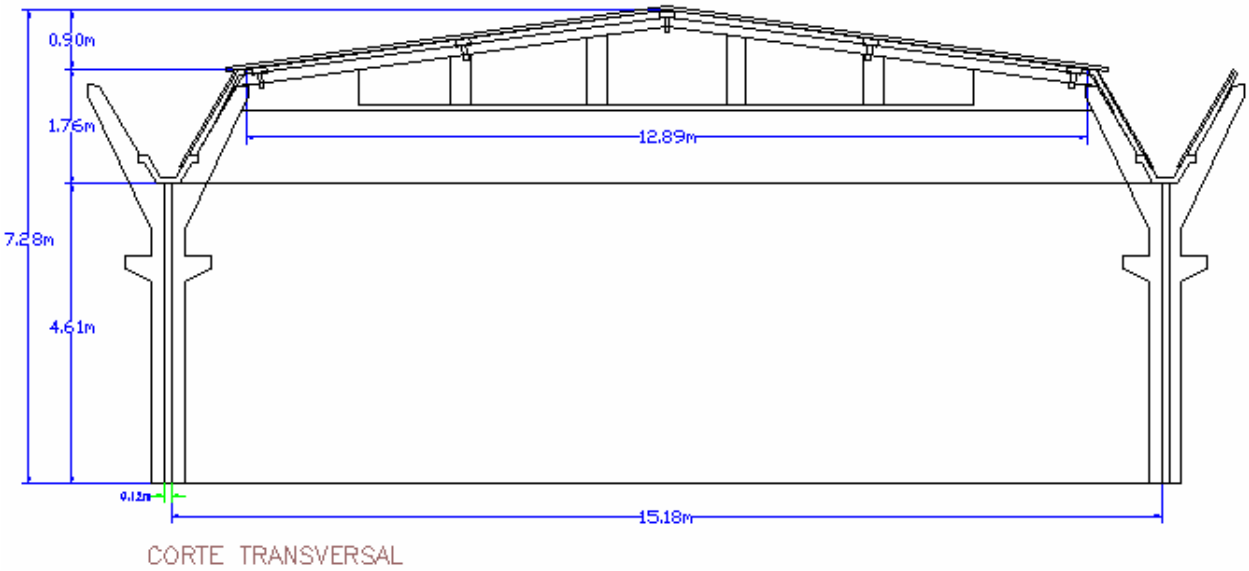


Figura 5.1 Dimensiones de la nave 108 de la empresa Kimberly-Clark

Para realizar los cálculos de las paredes y techo, es necesario conocer las dimensiones verdaderas y exactas de las zonas a analizar. Para este caso específico, en la figura 5.1 se muestran las dimensiones de la nave 108 de la empresa.

El área Infant Care (pañales), está formada por cuatro naves, como se muestra en la figura 5.2, una nave conforma la sección 107 (nave 107) y las otras tres naves conforman la sección 108 (nave 108).

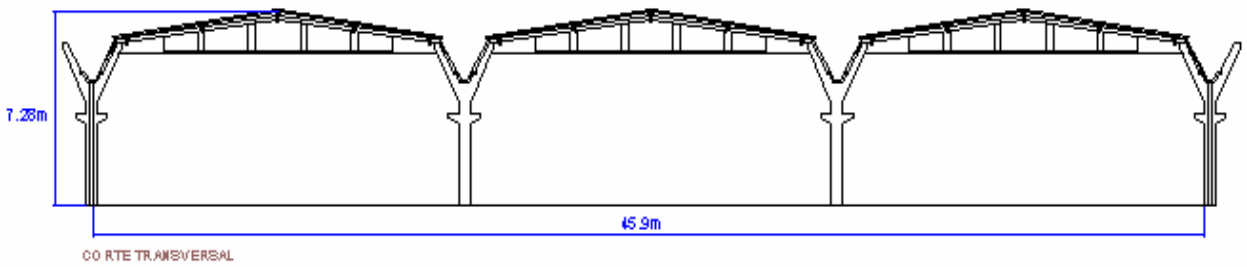


Figura 5.2 Dimensiones de tres naves de la empresa Kimberly Clark

Las ganancias de calor por conducción a través de paredes, techos y vidrios que dan al exterior se calculan con la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * DTCE \qquad (5.21)$$

Donde:

Q: Ganancia neta del recinto por conducción a través del techo, paredes o vidrio, BTU/h.

U: Coeficiente general de transferencia de calor para techos, paredes o vidrios, BTU/h – ft^2 – °F

A: Área del techo, paredes o vidrios, ft^2

DTCE: Diferencia de temperatura para cargas de enfriamiento, °F.

Se calcula la superficie de cada uno de los componentes empleando los planos de construcción. Los valores de U, se pueden encontrar en las tablas A.5.3, A.5.5 y A.5.10 o bien se pueden calcular a partir de los valores de R.

La DTCE es una diferencia de temperatura que toma en cuenta el efecto de almacenamiento de calor. Las tablas A.5.3 y A.5.4, presentan una lista de valores DTCE para algunas formas de construcción de paredes y techos. La tabla A.5.5 describe las construcciones de las paredes que se emplean en la tabla A.5.4.

Los valores de DTCE que se encuentran en las tablas A.5.3 y A.5.4 se deben corregir como sigue:

$$DTCE_C = (DTCE + LM) * K + (78 - t_R) + (t_0 - 85) * f \qquad (5.22)$$

Donde:

$DTCE_C$: Valor corregido de DTCE, °F.

DTCE: Temperatura de las tablas A.5.3 ó A.5.4 (^oF).

LM: Corrección para latitud al color y mes, de la tabla A.5.6.

K: Corrección debido al color de la superficie.

- **K** = 1 para superficies oscuras o áreas industriales.
- **K** = 0.5 para techos de color claro en zonas rurales.
- **K** = 0.65 para paredes de color claro en zonas rurales.

t_R: temperatura del recinto, ^oF.

t_0: temperatura de diseño exterior promedio, ^oF.

f: factor de corrección para ventilación del cielo raso (sólo para techo).

f: 0.75 para ventiladores de entrepiso (techo falso) en los demás casos, usar f=1.0.

Pared sur

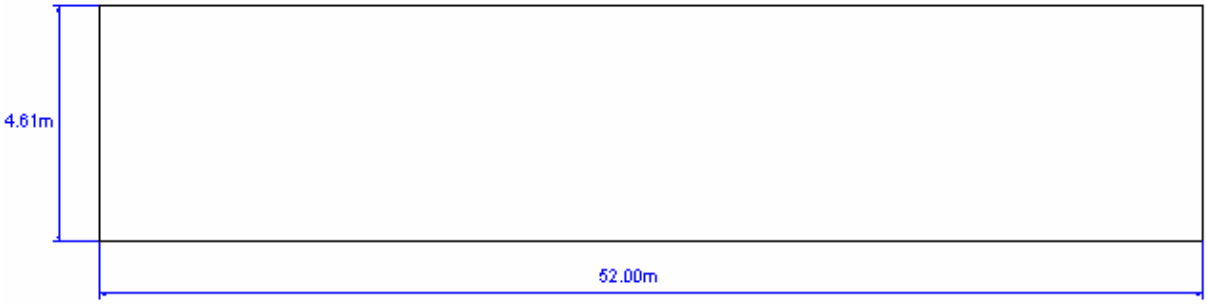


Figura 5.3 Dimensiones generales para la pared sur

Datos para el cálculo:

- Pared de concreto de 6.5 pulgadas.
- Área de 2580.31 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75^oF con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 79^oF con humedad relativa de 86%.
- Por ser la construcción de concreto con 6.5 pulgadas de espesor, de la tabla A.5.5 se obtiene:

- Pared grupo C.
- U = 0.538 BTU/ h – ft^2 – ^oF

- Para una pared grupo C, con orientación sur a las 15:00 horas, de la tabla A.5.4 se obtiene:
  - DTCE = 17^oF
- Para una latitud de 8^o, orientación hacia el sur en el mes de febrero, de la tabla A.5.6 se obtiene:
  - LM = -7^oF

Aplicando la ecuación (5.22) de corrección se obtiene:

$$DTCE_C = (17-7)*1+(78-75.2)+(78.8-85)*1$$

$$DTCE_C = 6.6^o F$$

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.538*2580.325*6.6 \Rightarrow Q = 9162.22 BTU/h$$

Pared norte

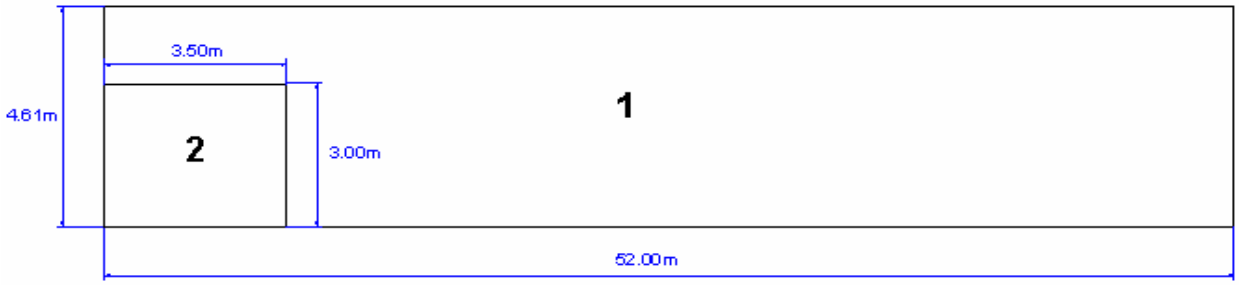


Figura 5.4 Dimensiones generales para la pared norte

El área marcada con el número 2 representa una cortina plástica y sus dimensiones, al realizar el cálculo para la pared norte, se debe restar el área 2 al área 1 para obtener con ello el valor real de la pared.

Datos para el cálculo:

Pared de concreto de 6.5 pulgadas.

- Área 1 = 229.22 m^2 = 2467.3 ft^2.
- Área 2 = 10.5 m^2 = 113.02 ft^2
- Área pared = 2467.3 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75^{o}F con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 79^{o}F con humedad relativa de 86%.
- Por ser la construcción de concreto con 6.5 pulgadas de espesor. de la tabla A.5.5 se obtiene:
    - Pared grupo C.
    - U = 0.538 BTU/ h – ft^2 – ^{o}F
- Para una pared grupo C con orientación norte a las 15:00 horas, de la tabla A.5.4 se obtiene:
    - DTCE = 10^{o}F
- Para una latitud de 8^o, orientación hacia el norte en el mes de febrero, de la tabla A.5.6 se obtiene:
    - LM = 7^{o}F

Aplicando la ecuación (5.22) de corrección se obtiene:

$$DTCE_C = (10+7)*1+(78-75.2)+(78.8-85)*1$$

$$DTCE_C = 13.6^o F$$

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.538*2467.3*13.6 \Rightarrow Q = 18052.74 BTU/h$$

Pared oeste

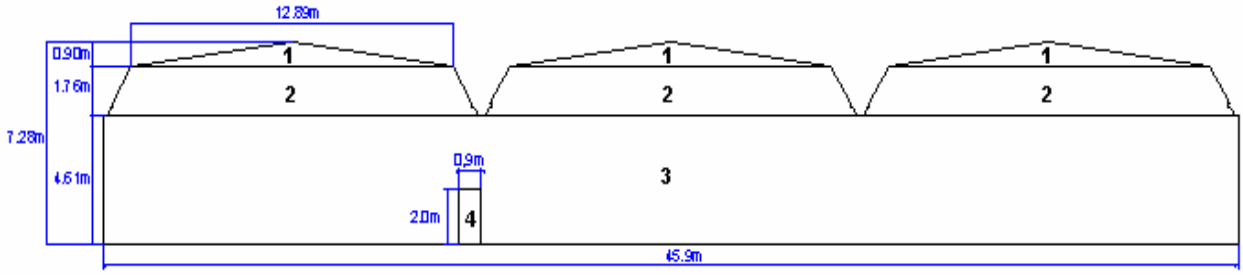


Figura 5.5 Dimensiones generales para la pared oeste

Para realizar el cálculo de la pared norte, era necesario conocer el área total de la pared. Para este caso específico se calcularon 4 áreas diferentes, las primeras 3 representaban una construcción de concreto de 6.5 pulg de espesor, mientras que el área 4 representa una pequeña cortina de plástico como lo muestra la figura 5.5.

Datos para el cálculo:

- Pared de concreto de 6.5 pulgadas.
- Área 1= 17.415 m^2 = 187.45 ft^2.
- Área 2= 74.406 m^2 = 800.9 ft^2.
- Área 3= 204.75 m^2 = 2203.91 ft^2.
- Área 4= 1.8 m^2 = 19.375 ft^2.
- Área pared = 3211.635 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75°F con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 79°F con humedad relativa de 86%.
- Por ser la construcción de concreto con 6.5 pulgadas de espesor. de la tabla A.5.5 se obtiene:

- Pared grupo C.
- U = 0.538 BTU/ h – ft^2 – ^oF

- Para una pared grupo C con orientación oeste a las 15:00 horas, de la tabla A.5.4 se obtiene:
  - DTCE = 14^oF
- Para una latitud de 8^o, orientación hacia el oeste en el mes de febrero, de la tabla A.5.6 se obtiene:
  - LM = -2^oF

Aplicando la ecuación (5.22) de corrección se obtiene:

$$DTCE_C = (14-2)*1+(78-75.2)+(78.8-85)*1 \; DTCE_C = 8.6^o F$$

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.538*3211.635*8.6 \Rightarrow Q = 14859.6BTU/h$$

Pared este

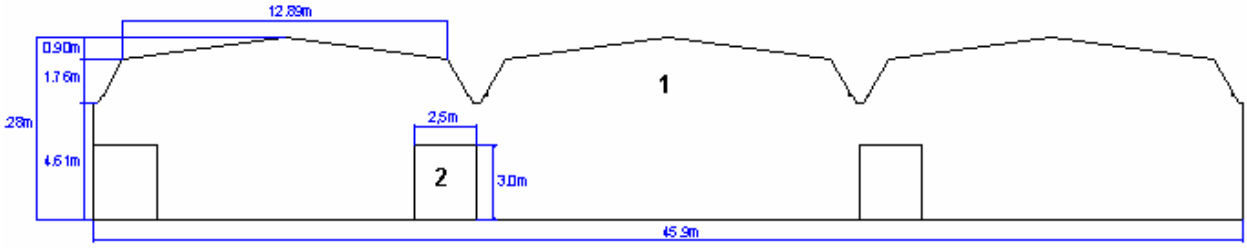


Figura 5.6 Dimensiones generales para la pared este

El área representada con el número 1 está constituida por una lámina de metal de 1.5 pulg de espesor, mientras que el área número 2 representa las cortinas de plástico.

Datos para el cálculo:

- Pared de metal de 1.5 pulgadas.

- Área pared = 2988.82 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75^oF con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 79^oF con humedad relativa de 86%.
- Por ser la construcción de metal con 1.5 pulgadas de espesor. de la tabla A.5.5 se obtiene:
  - Pared grupo G.
  - U = 0.091 BTU/ h – ft^2 – ^oF
- Para una pared grupo G con orientación este a las 15:00 horas, de la tabla A.5.4 se obtiene:
  - DTCE = 30^oF
- Para una latitud de 8^o, orientación hacia el este en el mes de febrero, de la tabla A.5.6 se obtiene:
  - LM = -2^oF

Aplicando la ecuación (5.22) de corrección se obtiene:

$$DTCE_C = (30-2)*1+(78-75.2)+(78.8-85)*1$$

$$DTCE_C = 24.6^o F$$

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.091*2988.82*24.6 \Rightarrow Q = 6690.77 BTU/h$$

5.2.4 Calor generado a través de techos [1]

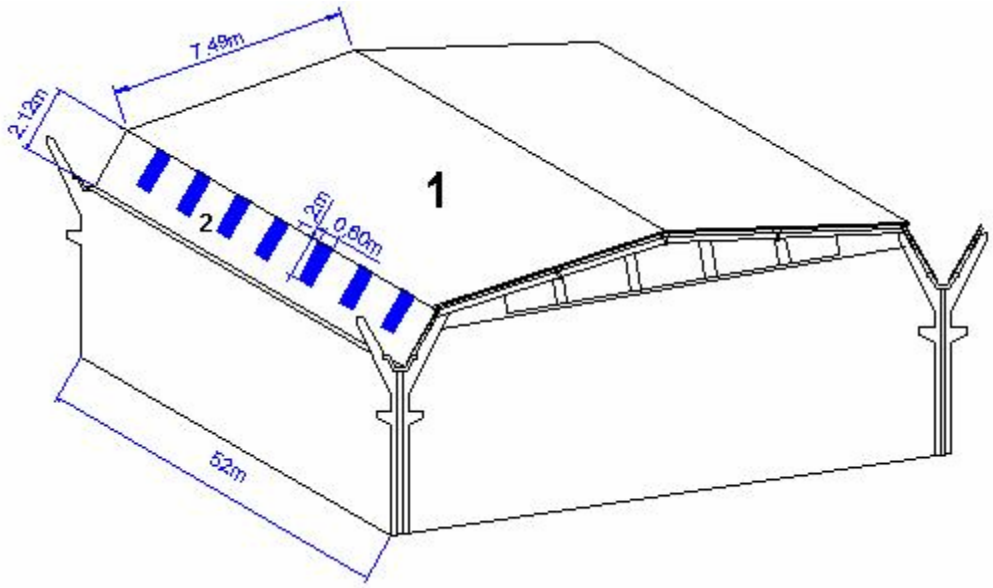


Figura 5.7 Dimensiones generales del techo en una nave

La figura 5.7 muestra la disposición del techo de una de las naves de la empresa. Los cuadros de color que están ubicados en el área 2 representan a los tragaluces, por lo tanto a la hora de realizar el cálculo de techo, específicamente del área 2, se debe restar el área de los tragaluces antes mencionados para obtener el valor correcto. Es necesario recordar que para este caso específico, el análisis que se realiza contempla 3 naves tal y como se representa en la figura 5.7.

Techo sección 1

Datos para el cálculo:

- Techo lámina de metal.
- Área total 1 = 25153.97 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75^oF con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 79^oF con humedad relativa de 86%.

- Por ser un techo de lámina de metal con aislamiento de 2 pulgadas, de la tabla A.5.3 se obtiene:
    - Techo número 1.
    - U = 0.124 BTU/ h – ft^2 – ^oF.
- Para un techo número 1 con hora solar a las 03:00pm, de la tabla A.5.3 se obtiene:
    - DTCE = 77^oF
- Para una latitud de 8^o, en el mes de febrero, de la tabla A.5.6 se obtiene:
    - LM = -2^oF

Aplicando la ecuación (5.22) de corrección se obtiene:

$$DTCE_C = (77-2)*1+(78-75.2)+(78.8-85)*1$$

$$DTCE_C = 71.6^o F$$

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.124*25153.97*71.6 \Rightarrow Q = 223327 BTU/h$$

5.2.5 Calor generado a través de cortinas [1]

Pared oeste

En la figura 5.5 se observa la ubicación y las dimensiones de las cortinas.

Datos para el cálculo:

- Lámina plástica 1/8 pulgadas.
- Área de 19.375 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75^oF con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 77^oF con humedad relativa de 74%.

- Por ser una lámina plástica con 1/8 pulgada de espesor. de la tabla A.8 se obtiene:
    - U = 0.98 BTU/ h – ft^2 – ^oF
- El valor de DT, ^oF se obtiene:
    - DT = (t_o – t_R) = (78.8 – 75.2) = 3.6 ^oF

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.98 * 19.375 * 3.6 \Rightarrow Q = 68.36 BTU / h$$

Pared este

En la figura 5.6 se observa la ubicación y las dimensiones de las cortinas.

Datos para el cálculo:

- Lámina plástica 1/8 pulgadas.
- Área de 242.19 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75^{o}F con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 78.5^{o}F con humedad relativa de 80%.
- Por ser una lámina plástica con 1/8 pulgada de espesor. de la tabla A.5.10 se obtiene:
    - U = 0.98 BTU/ h – ft^2 – ^oF
- El valor de DT, ^oF se obtiene:
    - DT = (t_o – t_R) = (78.5 - 75) = 3.5 ^oF

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.98 * 242.19 * 3.6 \Rightarrow Q = 854.45 BTU / h$$

5.2.6 Calor generado a través de tragaluces [1]

En la figura 5.7 se observa la ubicación y las dimensiones de los tragaluces.

Recordando que la DTCE es una diferencia de temperatura que toma en cuenta el efecto de almacenamiento de calor. La tabla A.5.10, presenta una lista de valores DTCE para vidrios

La corrección para la DTCE se calcula con la siguiente fórmula:

$$DTCE_C = DTCE + (78 - t_R) + (t_0 - 85) \quad (5.23)$$

Donde:

$DTCE_C$: valor corregido de DTCE, ^oF.
DTCE : temperatura de las tabla A.5.10, ^oF.
LM: corrección para latitud al color y mes, de la tabla A.5.6.
t_R: temperatura del recinto, ^oF.
t_0: temperatura de diseño exterior promedio, ^oF.

Orientados hacia el norte

Datos para el cálculo:

- Lámina plástica 1/8 pulgadas.
- Área de 162.75 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75^oF con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 79^oF con humedad relativa de 86%.
- Por ser una lámina plástica con 1/8 pulgada de espesor. de la tabla A.5.10 se obtiene:
    - U = 0.98 BTU/ h – ft^2 – ^oF
- Para una lámina plástica, de la tabla 6.5 se obtiene:
    - DTCE = 13.5^oF

- Aplicando la ecuación (5.23) de corrección para techos:

$$DTCE_C = 13.5 + (78 - 75.2) + (78.8 - 85)$$

$$DTCE_C = 10.1^o F$$

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.98 * 162.75 * 10.1 \Rightarrow Q = 1610.9 BTU / h$$

Orientados hacia el sur

Datos para el cálculo:

- Lámina plástica 1/8 pulgadas.
- Área de 162.75 ft^2.
- Temperatura de diseño interior de 75°F con humedad relativa de 60%.
- Cálculo realizado en el mes de febrero a las 3:00pm.
- Temperatura exterior de 79°F con humedad relativa de 86%.
- Por ser una lámina plástica con 1/8 pulgada de espesor. de la tabla A.5.10 se obtiene:
  - U = 0.98 BTU/ h – ft^2 – °F
- Para una lámina plástica, de la tabla 6.5 se obtiene:
  - DTCE = 13.5°F
- Aplicando la ecuación (5.23) de corrección para techos:

$$DTCE_C = 13.5 + (78 - 75.2) + (78.8 - 85)$$

$$DTCE_C = 10.1^o F$$

Aplicando la ecuación (5.21) se obtiene:

$$Q = 0.98 * 162.75 * 10.1 \Rightarrow Q = 1610.9 BTU / h$$

5.2.7 Calor generado por máquinas o motores [1]

La ganancia debida al equipo se puede calcular en ocasiones en forma directa consultando al fabricante o a los datos de placa, tomando en cuenta si su uso es intermitente. Algunos equipos producen tanto calor sensible como latente. La producción de calor procedente de motores y equipos que los impulsa se debe a la conversión de la energía eléctrica en calor.

La proporción de calor generado que pasa al recinto de acondicionamiento de aire depende de si el motor y la carga impulsada se encuentran ambos en el recinto, o tan solo uno de ellos. La tabla A.5.11 da una lista de producciones de calor para cada caso.

Datos para el cálculo:

- La nave 108 cuenta con:
  - 33 servomotores del tipo MHD 112B-024, que son de 3 HP.
  - 135 servomotores del tipo MHD 090B-035, que son de 1 HP.
  - 39 servomotores del tipo MHD 112C-024, que son de 2 HP.
  - 15 servomotores del tipo MHD 112D-027, que son de 5 HP.

De la tabla A.5.11 se obtienen los valores en BTU/h para cada motor:

MHD 112B-024: 9450 BTU/h

MHD 112C-024: 6380 BTU/h

MHD 090B-035: 3220 BTU/h

MHD 112D-027: 15600 BTU/h

Q_1 = 135*3220 = 434700 BTU/h

Q_2 = 39*6380 = 248820 BTU/h

Q_3 = 33*9450 = 311850 BTU/h

Q_4 = 15*15600 = 234000 BTU/h

Q_T = 1229370 BTU/h

5.2.8 Calor generado debido a tanques de adhesivos [1]

El propósito de los tanques de adhesivo es suministrar el adhesivo necesario para la formación del pañal. La empresa posee 16 tanques de los cuales 12 están en la nave 108. Estos tanques generan en su interior una temperatura de 150^o C.

La ecuación para calcular la velocidad de la transferencia de calor es:

$$Q = \frac{1}{R} * A * DT \qquad (5.24)$$

Donde:

Q: velocidad de la transmisión de calor, BTU/h^{o}F.
R: resistencia térmica del material**,** h – ft^2 – ^{o}F/BTU.
A: área de la superficie a través de la cual fluye el calor, ft^2
DT: diferencia de temperaturas, ^{o}F.

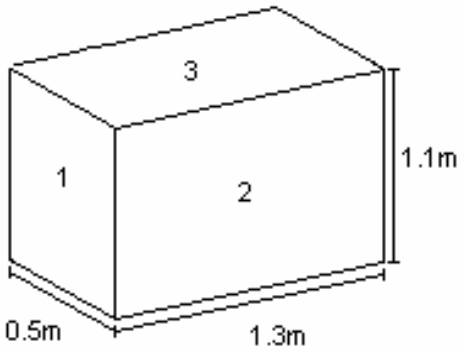


Figura 5.8 Dimensiones generales de un tanque de adhesivo

Datos para el cálculo:

- En la nave 108 hay 12 tanques.
- La temperatura interior es de 302^o F.

- Temperatura de diseño en el interior de la nave es de 75^{o} F.
- Las áreas de las paredes del tanque son:
  - A_1= 5.92f t^2 * 2 = 11.84 ft^2
  - A_2= 15.39 ft^2 * 2 = 30.78 ft^2
  - A_3= 7 ft^2 * 2 = 14 ft^2
  - A_T = 56.62 ft^2
- De la tabla A.5.9 se obtienen los valores de la resistencia térmica del material de aislamiento:
  - Fibra mineral.
  - Espesor de 2 a 2.75 pulgadas.
  - R = 7

Aplicando la ecuación (5.24) se obtiene el calor generado por cada tanque:

$$Q_1 = \frac{1}{7} * 56.62 * (302 - 75.2) = 1834.49 BTU / h$$

Como son 12 tanques los que hay en la nave:

Q_T = 22013.856 BTU/h

5.2.9 Infiltración [1]

La infiltración de aire a través de fisuras en las ventanas o puertas ocasiona una ganancia de calor, tanto sensible como latente, en el recinto.

El efecto de la infiltración de aire sobre la pérdida de calor sensible se calcula como:

$$Q_S = 1.1 * CFM * CT \qquad (5.25)$$

Donde:

Q: calor sensible necesario para el aire de infiltración o ventilación, BTU/h
CFM: velocidad de infiltración o ventilación del aire, ft^3/min
CT: cambio de temperatura entre el aire interior y el exterior, ^0F

El efecto de la infiltración de aire sobre la pérdida de calor latente se calcula como:

$$Q_L = 0.68 * CFM * \left(W_i - W_p\right) \quad (5.26)$$

Donde:

Q: calor latente necesario para el aire de infiltración o ventilación, BTU/h.
CFM: velocidad de infiltración o ventilación del aire, ft^3/min.
W_i, W_c**:** relación de humedad mayor (interior) y menor (exterior), expresada en granos de agua/libra de aire seco (gr w/lb).

Datos para el cálculo:

- Observando la figura 5.4, se obtiene que la longitud de fisura de la pared norte es: 32.29 ft.
- Observando la figura 5.5, se obtiene que la longitud de fisura de la pared oeste es: 21.53 ft.
- Observando la figura 5.6, se obtiene que la longitud de fisura de la pared este es: 96.875 ft.
- La longitud total de las fisuras de la nave es: 150.7 ft.
- De la tabla A.5.1 se obtienen las tasas máximas recomendadas de infiltración :
    - Puertas
    - Tasa de infiltración = 1.0 CFM/ft de fisuras
- Temperatura de diseño interior de 75^oF con humedad relativa de 60% y con 93.8 gr w/lb (granos de agua/libra de aire seco).

- Temperatura exterior de 79°F con humedad relativa de 86% y con 155.71 gr w/lb (granos de agua/libra de aire seco).

Aplicando la ecuación (5.25) se obtiene:

$$Q_S = 1.1*(150.7*1)*(78.8-75.2) = 596.77 BTU/h$$

Aplicando la ecuación (5.26) se obtiene:

$$Q_L = 0.68*(150.7*1)*(155.71-93.8) = 6344.29 BTU/h$$

5.2.10 Ventilación [1]

En general se admite algo de aire exterior por razones sanitarias y de confort. El calor sensible y el latente de este aire es mayor que el del aire del recinto, por lo cual se vuelve parte de la carga de enfriamiento. Sin embargo, el exceso de calor se elimina en general en el equipo de enfriamiento, y por lo tanto es parte de la carga de refrigeración, pero no de la carga del recinto.

Las ecuaciones para calcular las cargas de enfriamiento sensible y latente debidas al aire de ventilación son las mismas que se utilizan para el cálculo de infiltración.

Datos para el cálculo:

- En la nave se tiene aproximadamente 30 personas.
- De la tabla A.5.8 se obtienen los requisitos de ventilación para ocupantes. Se analizará como si se tratara de un gimnasio por el tipo de trabajo que la empresa realiza:
    - CFM mínimos = 20
- Temperatura de diseño interior de 75°F con humedad relativa de 60% y con 93.8 gr w/lb (granos de agua/libra de aire seco).

- Temperatura exterior de 79°F con humedad relativa de 86% y con 155.71 gr w/lb (granos de agua/libra de aire seco).

Aplicando la ecuación (5.25) se obtiene:

$$Q_S = 1.1 * (20 * 30) * (78.8 - 75.2) = 2376 BTU / h$$

Aplicando la ecuación (5.26) se obtiene:

$$Q_L = 0.68 * (20 * 30) * (155.71 - 93.8) = 25258.06 BTU / h$$

5.2.11 Transferencia de calor a los alrededores [1]

Algo de la ganancia del calor sensible al recinto se transfiere a través de la estructura hacia los alrededores, y nunca aparece como parte de la carga del recinto. Esto constituye un efecto aislado de su almacenamiento. Se debe calcular esta pérdida de calor y corregir las ganancias de calor sensible al recinto por conducción, radiación solar, alumbrado y equipo. Las siguientes ecuaciones se emplean para calcular la corrección para la transferencia de calor a los alrededores.

$$Fc = 1 - 0.02K \quad (5.27)$$

$$K = (U_W A_W + U_S A_S) / L \quad (5.28)$$

Donde:

Fc: factor para corregir cada ganancia de calor sensible de recinto.
K: conductancia de la unidad de longitud, BTU/h – ft - °F.
L: longitud de la pared exterior, ft.
U_w , U_g: coeficiente de transferencia de calor, **w=** pared, **g=** vidrio**,** BTU/h–ft^2-°F.
A_w , A_g: área de la pared o del vidrio, ft^2.

Datos para el cálculo:

Tragaluz:

Tabla 5.1 Valores correspondientes al coeficiente de transferencia de calor (U) y al área para los tragaluces

U Tabla A.5.10	A, ft^2 Neta
0,98	224,75
0,98	155,00

Paredes:

Tabla 5.2 Valores correspondientes al área, coeficiente de transferencia de calor (U) y longitud para las paredes

U Tabla 6.3	Longitud, pies	Área, pies2
0,538	170,00	2468,29
0,538	170,00	2580,31
0,538	150,92	8711,03
0,091	150,92	8488,22

Aplicando la ecuación (5.28) se obtiene:

$$K = \frac{\left[0.538*\left(2468.29+2580.31+8711.03\right)+0.091*\left(8488.22\right)+0.98*\left(224.75+155\right)\right]}{170+170+150.92+150.92}$$

K= 13.32 BTU/h – ft - ^oF

Aplicando la ecuación (5.27) se obtiene:

$$Fc = 1-0.02*13.32 = 0.73$$

5.2.12 Resultados Obtenidos

Tabla 5.3 Total de ganancias de calor de la nave

RSHG	RLHG
Btu/h	
3462194,566	78177.356

Tabla 5.4 Total de la carga sensible y latente

GSHG	GLHG
Btu/h	
2527402,033	57069,47

Según las hojas de datos del "chiller", tiene un motor de 300 HP trifásico con alimentación de 480 VAC, el cual tiene una capacidad de enfriamiento de 450 toneladas "chiller". Una tonelada "chiller" es equivalente a 12000 BTU/h y cada HP de las unidades centrales de aire equivale a 2545 BTU/h de enfriamiento. Por consiguiente, la capacidad de enfriamiento del sistema de aire acondicionado de la planta para la nave 108 se indica en la ecuación 5.29.

$$Q_{enfr} = unid_chiller_ton * 12000BTU/h + HP_motor_menej * 2545BTU/h \quad (5.29)$$

La ecuación anterior es la sumatoria de las cargas de enfriamiento para planta que es suministrada por el sistema de aire acondicionado. La cual corresponde a:

$$Q_{enfr} = 450 * 0.66 * 12000BTU/h + 50 * 2545BTU/h + 40 * 2545BTU/h + 25 * 2545BTU/h$$

Lo cual equivale a 3856675, lo cual es superior al nivel de cargas térmicas que se generan en su totalidad en la planta. En la ecuación 5.29 se aprecia que las 450 toneladas del "chiller" se multiplican por 0.66, esto se debe a que el mismo trabaja al 66% de su capacidad, porque de no ser así el nivel de enfriamiento de la planta sería muy elevado.

5.3 Análisis de soluciones y selección final

Según los requerimientos desde que se instaló el sistema hidráulico para abastecer de agua fría los serpentines de las unidades centrales de aire, se necesitó de una bomba con una potencia de 40 HP para el suministro y otra de 15 HP para el retorno. Sin embargo, con el paso del tiempo se instalaron dos unidades centrales de aire adicionales, las cuales se suministraban con la misma bomba. Con la ubicación de una nueva bomba se aisló el suministro de agua fría en el sistema, una bomba centrífuga de 40 HP les suministra agua a las unidades centrales de aire de la nave 107 y otra a las de la 108. Como las cargas térmicas de ambos sectores de edificios son diferentes, esta bomba suministra el agua requerida para mantener en condiciones adecuadas de confort ambiental la nave 108 de Kimberly-Clark; el regulador programado dentro del PLC es el encargado de indicarle la señal de salida al módulo de salidas analógicas, que a su vez le indica al variador la frecuencia de salida y éste a la bomba su velocidad.

Dentro de las posibles soluciones al sistema se ideó un regulador estático, o sea, que según la carga térmica de la planta se definiera su regulador independientemente de la variación o no de la misma, mas esta implementación traería el inconveniente de que en un eventual cambio en el nivel de cargas térmicas llevaría al sistema a un posible error por parte del regulador. El regulador trabaja con ciertos parámetros de variación, los cuales se programaron dentro del PLC, el hecho de colocarle un punto de referencia a la pantalla de tacto para el control del nivel de temperatura, hace que se pueda controlar ésta según el aumento o disminución de las cargas térmicas.

Otra posibilidad para manejar el nivel de la temperatura dentro de la planta fue la incorporación de parámetros manipulables, esta opción hubiera dado una buena visión del nivel de temperatura según los empleados en cada instante, (midiendo cantidad de personas por género, estatura promedio, actividad física promedio, tipo de vestimenta, etc.) mas esta posibilidad se hace muy tediosa para un usuario.

En la empresa se laboran 24 horas en tres turnos de ocho horas cada uno, eso significaría tres características diferentes de empleados cada ocho horas, los horarios se rotan para los empleados durante cada semana, lo cual indicaría más variables, a estas variables se sumaría el eventual cambio de personal. Esta posibilidad se descartó para no tener que controlar tantas variables.

Dentro de los reguladores, se pensó en llevarlo a cabo mediante uno tipo PID, ya que es una de las opciones que presenta el PLC, la cual fue una de las más fuertes a ser implementadas desde un principio, pero la no implementación de ésta se debió a que es un sistema de temperatura, su tiempo de reacción ante un escalón es relativamente lento, y no se requiere tanta precisión como en otros sistemas que sí lo necesitan, además que no se le iba a aplicar un regulador digital tomando en cuenta tiempos de muestreo.

Los requerimientos llevaron a la necesidad que un regulador cada cierta cantidad de tiempo leyera el valor del nivel de temperatura en la nave y a partir de este valor aplicara o no la regulación del nivel de la temperatura. De aquí fue en donde se implementó el regulador en función de Z, luego se pasó a tiempo discreto y posteriormente se le aplicó el regulador digital, lo cual cumple con la necesidad que cada cierto tiempo aplique la regulación sin necesidad que sea una respuesta exacta ni rápida.

5.4 Descripción del "hardware"

Dentro de las eventuales soluciones al problema relacionado con el "hardware", se restringía el desarrollo del mismo a muy bajo nivel (compuertas lógicas, amplificadores, registros, transistores, etcétera). No obstante, esta limitante por parte de la corporación no impidió el diseño a alto nivel, en el cual uniendo grandes bloques que realizan funciones específicas, se llega a un diseño que cumple con las especificaciones de la solución buscada. Para llevar a cabo el desarrollo del diseño a nivel de "hardware", se inició con un único bloque que realizara lo especificado, o sea, un bloque funcional que especificara las entradas y salidas deseadas para darle la adecuada solución al problema (figura 5.1).

Figura 5.9 Controlador de temperatura a nivel general con dos soluciones

En la figura 5.9 se muestra un sistema que lleva a cabo la solución al inconveniente de los niveles de temperatura en la planta mediante las dos posibles soluciones solicitadas por el departamento de Ingeniería de Kimberly-Clark. Una entrada de un nivel de temperatura en función del tiempo, el cual será controlado mediante la apertura o cierre de una válvula o la variación en la velocidad de un motor (bomba) en función de la temperatura. De este bloque se partió para cualquier otra solución vislumbrada para el proyecto.

El siguiente paso fue llegar a un nivel de diseño más específico en donde se dividiera el sistema en subsistemas, de aquí surgió un nivel en donde se definen bloques más específicos (figura 5.10).

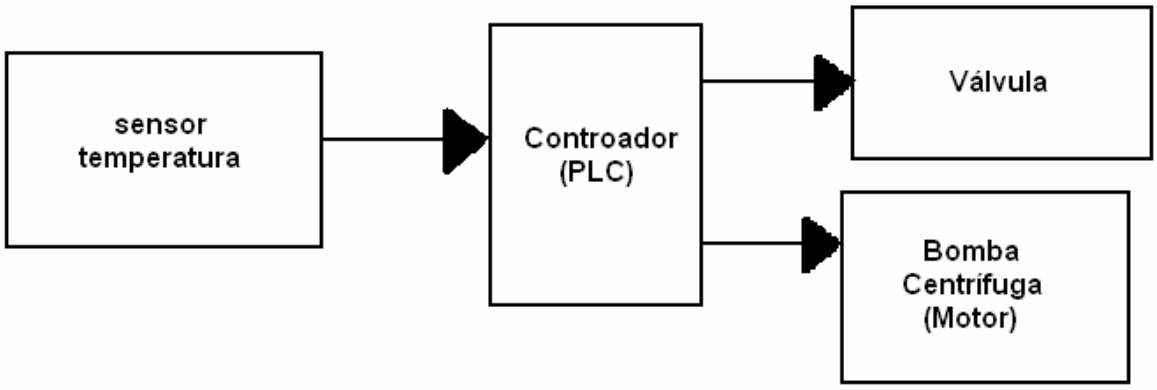


Figura 5.10 Diagrama de bloques de segundo nivel para la solución al problema

En esta subdivisión al sistema (figura 5.10) se muestran bloques más funcionales respecto a la figura 5.9, se aprecia la inclusión del dispositivo capaz de captar el nivel de temperatura (sensor), el controlador (PLC) y los dispositivos que van a ser controlados para llegar a las soluciones propuestas en las figuras 1.2 y 1.3, control de la bomba para las unidades centrales de aire de las máquinas “JOA” y control encendido apagado.

La subdivisión siguiente a este nivel implicó el acondicionamiento de cada una de las señales para lograr los objetivos de intercomunicación entre los dispositivos. Por la longitud que posee cada una de las máquinas en donde se van a instalar los sensores, no basta con colocar un único sensor, sino dos, para que de esta forma capten el nivel de temperatura en un área mayor y sea menos susceptible a errores de muestreo. Debido a la lejanía en que está ubicado el panel principal de control del sistema de aire acondicionado, la señal RTD que brinda el sensor puede verse afectada debido a la resistencia del cable en el trayecto, por lo que se necesitó de un dispositivo que pudiera contrarrestar este factor.

El controlador recibe, envía y procesa todo tipo de señales, mas cada una debe acondicionarse en otro dispositivo antes de ser procesada e interpretada según el tipo de señal, (RTD, analógica de corriente, analógica de voltaje, de relé, digital de 24 voltios, entrada, salida) a estos dispositivos se les llama módulos (de entrada o salida) del PLC y su función es la de indicarle al PLC las posibilidades que tiene tanto para entrada como para salida.

Existen varias formas para cambiar la velocidad de un motor, la forma en que la empresa ha conseguido este objetivo, ha sido mediante el uso de variadores de frecuencia, con lo cual se controla el nivel de corriente efectiva que llega al motor, aparte de que por niveles de economía se le ahorra dinero a la corporación ya que se contaba con uno en la empresa y son dispositivos con una amplia gama de opciones en cuanto a entradas y salidas analógicas (ver hoja de datos en anexo B1), digitales y de comunicación (transmisión de datos), lo mismo que su manipulación (manual o automática).

Con toda esta gama de dispositivos se parte hacia el siguiente nivel en donde aparecerán todos los dispositivos de “hardware” involucrados en la solución (figura 5.11).

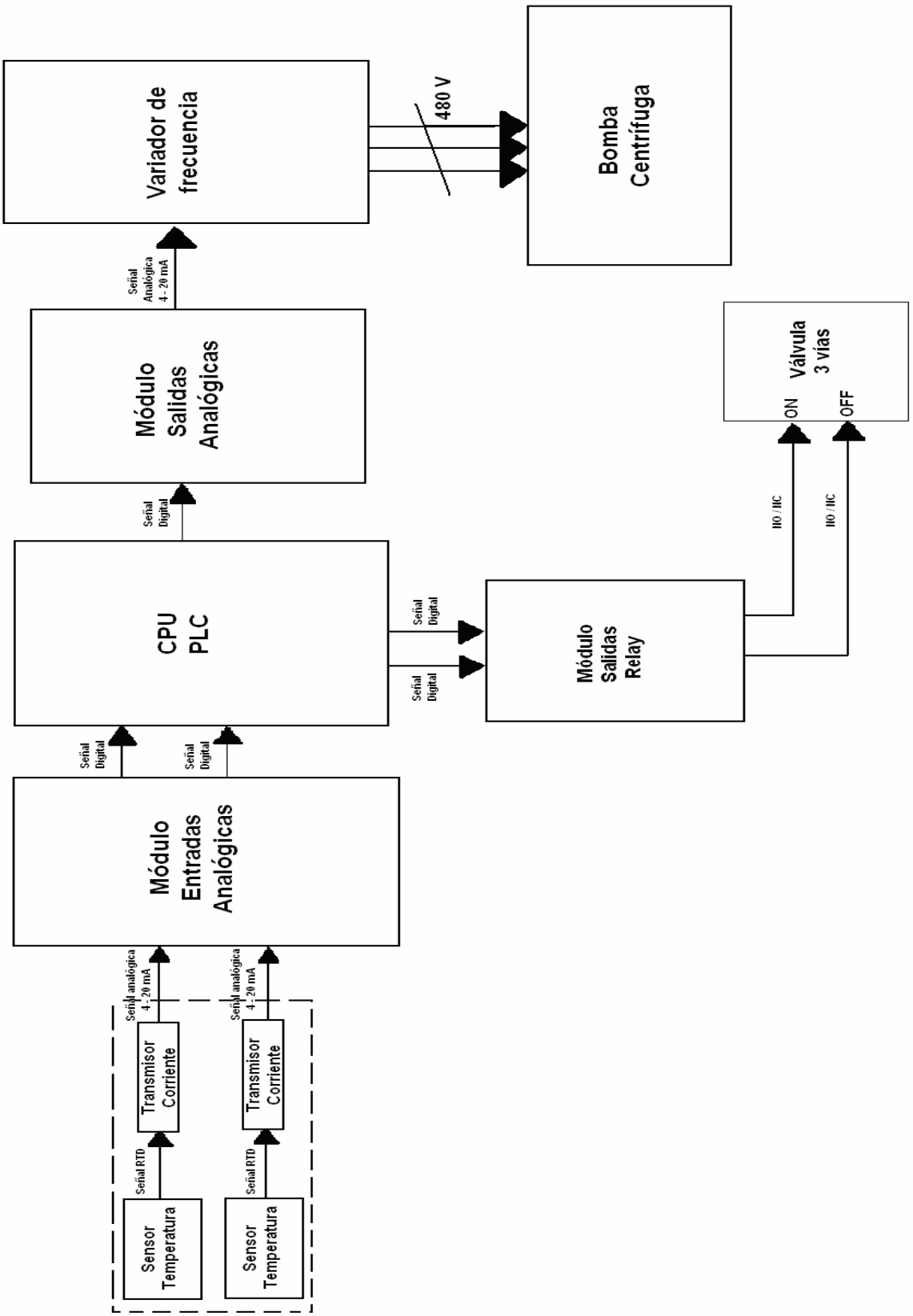


Figura 5.11 Diagrama detallado de dispositivos involucrados en la solución a nivel de hardware

En el diagrama de la figura 5.11 se aprecian todos los dispositivos de “hardware” que intervienen en la solución al sistema, los cuales poseen sus propias características y justificación de uso.

En la figura 5.12 aparecen todos los dispositivos de “hardware” mostrados en detalle a nivel interno, cada uno de sus componentes de “hardware” se interconecta con los otros dispositivos y dan como resultado la solución buscada. Las características de diseño de cada uno se muestran en los siguientes apartados de esta misma sección, al igual que su justificación para ser usados y tomados en cuenta para dar la solución al proyecto. Cabe destacar que en la figura 5.12 se tiene interconectada sólo una electroválvula a pesar de ser cuatro, un solo sensor de temperatura con su respectivo transmisor de corriente a pesar de ser ocho, por consiguiente también se está utilizando un solo canal del módulo de entradas analógicas y dos de las salidas de relé (encendido y apagado).

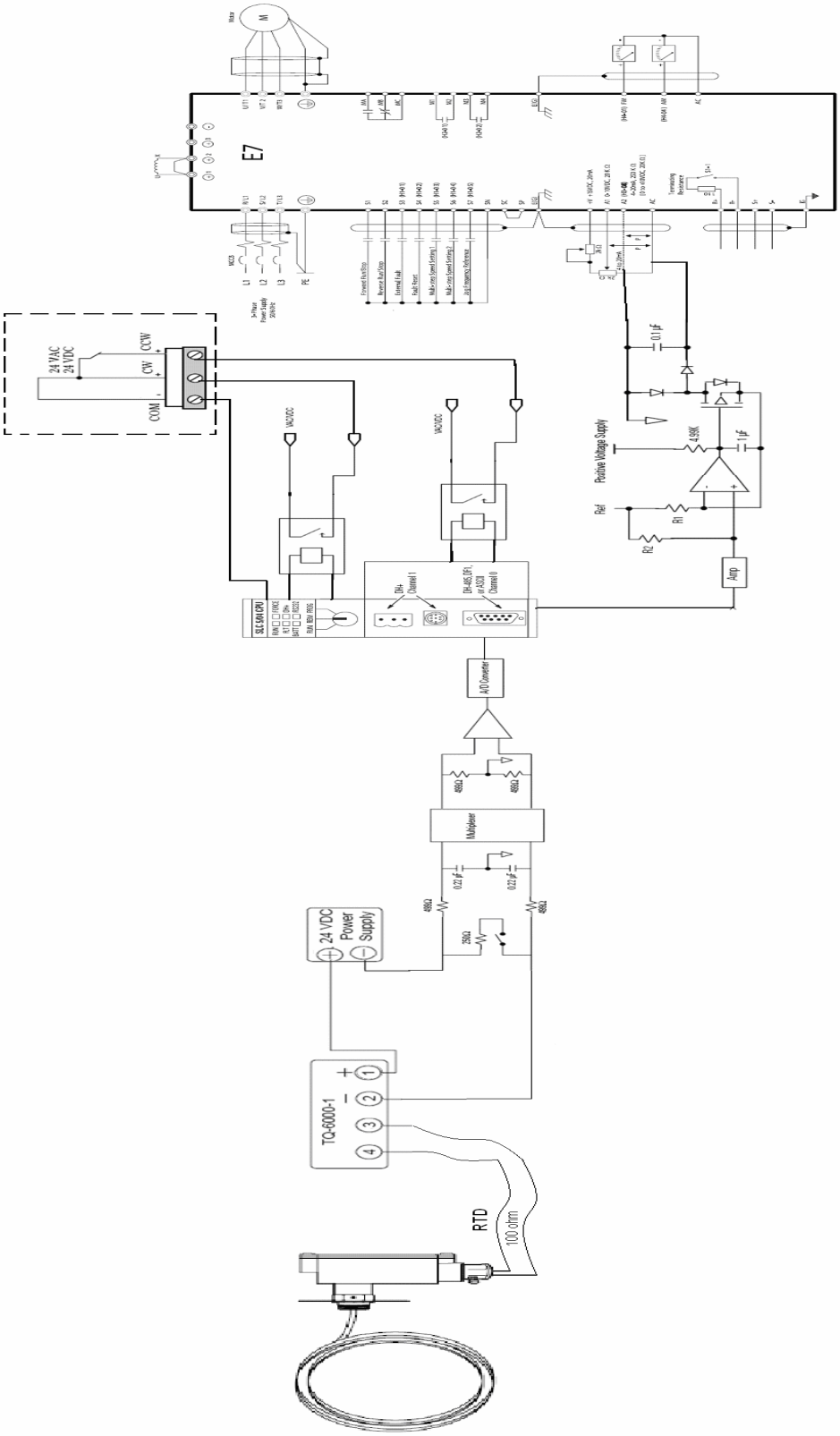


Figura 5.12 Diagrama de cuarto nivel con todos los dispositivos involucrados en el diseño de hardware

5.4.1 Descripción de sensor de temperatura

La temperatura puede ser medida por medio de varios procedimientos, para cada uno de estos se usa un determinado tipo de sensor. La elección de un procedimiento u otro dependerá del rango de temperatura a medir, precisión requerida, mayor o menor dificultad del punto a medir, velocidad de respuesta, entorno y condiciones a efectuar la medición.

Los sensores más utilizados en la industria son los termopares y las termorresistencias (RTD), los primeros son mucho más baratos que los segundos, mas no son tan fiables ni poseen tanta precisión como un sensor RTD, de aquí la escogencia del mismo para el desarrollo del proyecto.

El funcionamiento de un RTD (Resistance Temperature Detector) se basa en una de las propiedades básicas de los metales, la variación de su resistencia eléctrica con la temperatura. El platino es el material más estable y exacto en su relación resistencia / temperatura, es tan reproducible que la resistencia de platino se utiliza como estándar internacional de temperatura de -260° C a 680° C. [20]

El sensor de temperatura es el encargado de medir el nivel de temperatura en el ambiente de producción de cada una de las máquinas productoras de pañales, en la figura 5.13 se puede apreciar su estructura, en el sector derecho de la figura se aprecia el platino, el cual es un material altamente sensible a los cambios en la temperatura, el mismo se encuentra diseñado para que trabaje en forma lineal en un rango que toma los 0°C como 100 Ω y a partir de este valor varía el nivel de resistencia proporcionalmente al nivel de temperatura en 0.39 Ω/°C en teoría (0.42 Ω/°C en la práctica), con rangos relativamente precisos en cuanto a relaciones entre temperatura y nivel de resistencia (tabla 5.5). La longitud del platino que trae al final del sensor es de 10 pies (3.05 m), con lo que capta de mejor forma la temperatura en el medio ambiente de cada máquina, aunado a que hay dos por cada una de las máquinas.

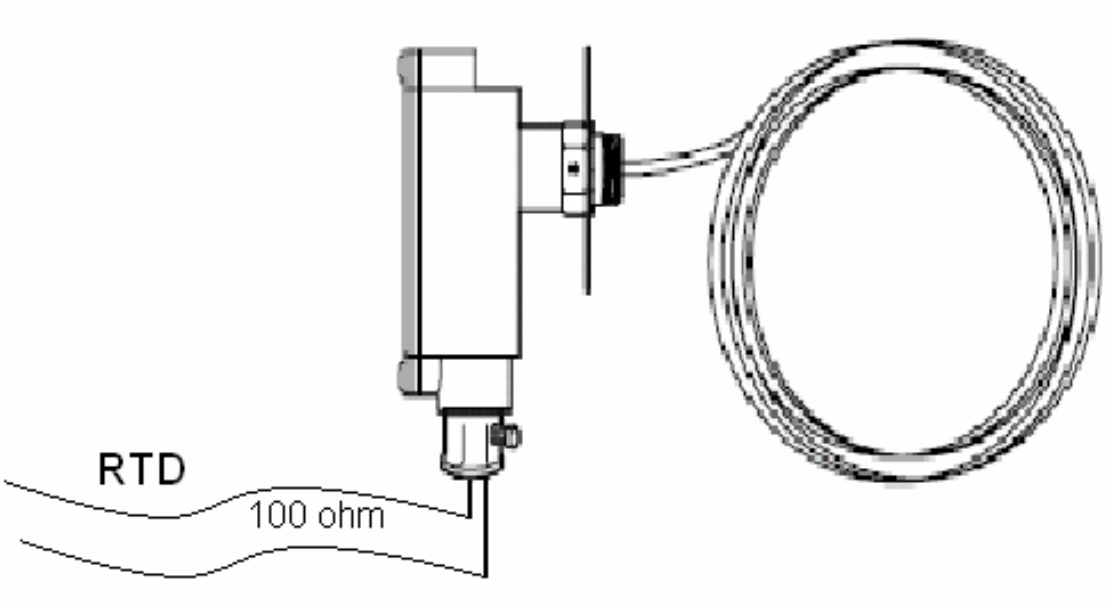


Figura 5.13 Diagrama físico de sensor de temperatura TE – 6337P – 1 [22]

Tabla 5.5 Valores de resistencia respecto a temperatura para el sensor TE – 6337P – 1 [22]

Temperatura		**Resistencia (Ω)**
°F	**°C**	
-50	-46	82.07
-20	-29	88.66
0	-18	93.03
20	-7	97.39
32	0	100.00
50	10	103.90
70	21	108.23
80	27	110.38
90	32	112.53
130	54	121.11
200	93	135.97
275	135	151.70

Se podría notar de la tabla 5.5 en el caso de tabular los datos y trazar la gráfica de la resistencia en función de la temperatura es lineal.

5.4.2 Descripción de transmisor de corriente

Sabiendo que hay una gran distancia entre el gabinete eléctrico de control para el sistema de aire acondicionado y la máquina que se encuentra más alejada del mismo (aproximadamente 80 metros), se decidió colocar transmisores de corriente entre el sensor de temperatura y el cable que conduce la señal hasta el panel de control, según el fabricante (Johnson Controls) [22], por cada 46 metros de cable 18 AWG en este caso, hay 0.56°C de error, con lo que habría más de 1° C de error en este caso, generando un dato falso en el momento de tomar el valor del nivel de temperatura. Este dispositivo requiere de una alimentación de 24 voltios como se aprecia en el diagrama eléctrico de la figura 5.14, dos entradas para recibir los cambios de resistencia eléctrica brindados por el sensor de temperatura y en su misma alimentación se encuentra la señal de corriente que se recibe en el módulo de entradas analógicas, esta señal indica los cambios en el nivel de la temperatura y se ven reflejados según la ecuación 5.30.

$$I_T = 4mA + [16mA * (T°C - 17.8°C) / 55.6°C] \quad (5.30)$$

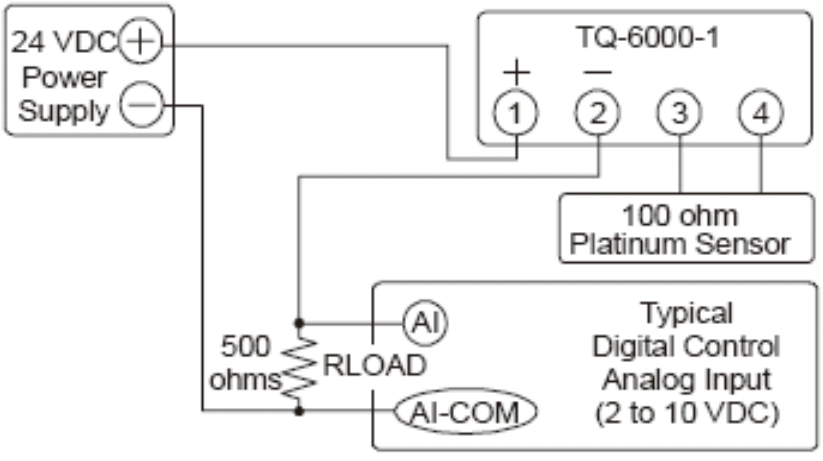


Figura 5.14 Diagrama eléctrico de la conexión del transmisor de corriente TQ – 6000 – 1 al sensor de temperatura y a su respetiva alimentación [22]

En la ecuación 5.30 I_T es la variación de corriente en función de T (temperatura en °C). En la figura 5.14 AI es la señal de corriente que va al módulo de entradas analógicas con su respectivo común. Este dispositivo cumple la función de convertir cambios de temperatura en cambios de corriente eléctrica según la ecuación 5.30; teniendo este dispositivo instalado, se aseguró una recepción de datos correcta a través del cable eléctrico ya que no presenta pérdidas de nivel debido al mismo.

5.4.3 Descripción de módulo de entradas analógicas

Los cambios de temperatura reflejados en cambios en la resistencia eléctrica del sensor TE – 6337P – 1 pasan al transmisor de corriente TQ – 6000 – 1 y se convierten en cambios de corriente que varían en proporción a la temperatura, esta variación se da en el rango de 4 a 20 mA, mismos que son trasladados a través de cable 18 AWG hacia el panel de control del sistema de aire acondicionado, pero estos valores se reciben en forma de datos en un módulo de entradas analógicas para ser procesadas por el PLC. Debido a la presencia de ocho señales de la misma cantidad de sensores, se necesitó la presencia de un módulo capaz de interpretar estos datos y enviarlos al PLC, este dispositivo es el 1746 – NI8, el cual tiene ocho canales para recolectar información en forma analógica, el módulo posee en forma interna ocho DIP switches, los cuales se encargan de recibir señales analógicas de corriente o de voltaje según el estado que seleccione el usuario.

La habilitación o deshabilitación de cada uno de los canales se realizó por medio de “software”, la forma de hacer este control se aprecia en el apartado 5.5 (descripción del “software”). A la entrada puede recibir la misma cantidad de voltaje o corriente eléctrica en cualquier polarización (figura 5.15), según en la configuración en que se encuentre el módulo programado a nivel de “software”, el mismo determina los rangos en que se encuentra el nivel analógico que ingresa al módulo (multiplexor), finalmente una etapa de amplificación antes de hacer la conversión de analógico a digital y enviar los datos al controlador del sistema de aire acondicionado (figura 5.15).

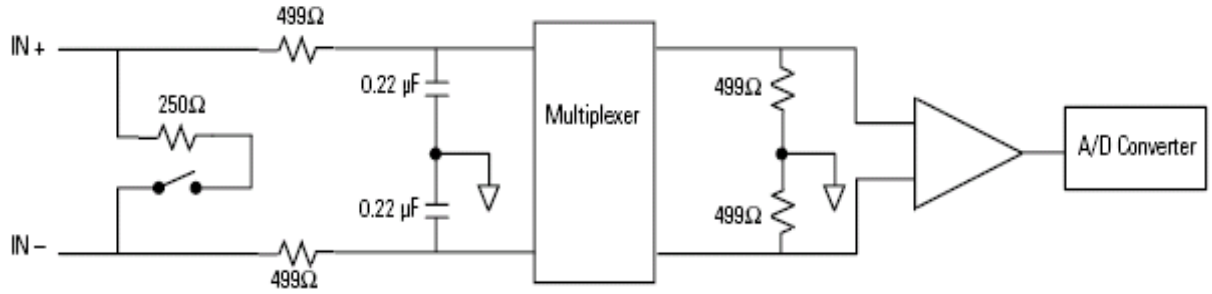


Figura 5.15 Circuito de corriente de entrada para un canal del módulo 1746 – NI8 [17]

5.4.4 Descripción de PLC

El PLC elegido ya era parte del sistema, es el SLC 500, versión 5/04 de Allen Bradley, en un proyecto de control automático el uso de un controlador es indispensable, de aquí la utilización de éste. El uso de un PLC en la empresa se debe a las características que posee para situaciones extremas sin perder sus propiedades para funcionar (temperatura de operación de 0 a 60°C, temperatura de almacenado de - 45 a 85°C, rango de humedad relativa de 5 a 95% entre otras). Posee la capacidad de direccionar 4096 puntos de entrada y 4096 puntos de salida, su comunicación con otros dispositivos como por ejemplo una PC se puede lograr a través de DH+ (Data Highway Plus), sin embargo, para esta aplicación del proyecto, el PLC transmite por comunicación RS – 232, por medio de la cual logra la comunicación con la pantalla de tacto. En el CPU se pueden llevar instrucciones para minimizar la cantidad de líneas de código de programación para una determinada función, logrando con esto el ahorro de memoria para el controlador, tiene capacidad para el manejo de punto flotante, sistemas de control por medio de PID, funciones trigonométricas y exponenciales y gran variedad de conexiones a módulos analógicos dentro de muchas de sus características que lo hacen muy versátil para aplicaciones de control automático.

Tiene una llave para seleccionar el modo en que se desea utilizar el CPU (remoto, corriendo o en programación), dos canales de comunicación con dispositivos externos (DH+ o RS232), tiene una batería interna para proveer la alimentación de la memoria RAM CMOS, posee seis LED indicadores de operación (corriendo, forzado, falla, comunicación DH+, comunicación RS232 y un indicador cuando se está utilizando la batería) e internamente el módulo de memoria ROM (figura 5.16). [17].

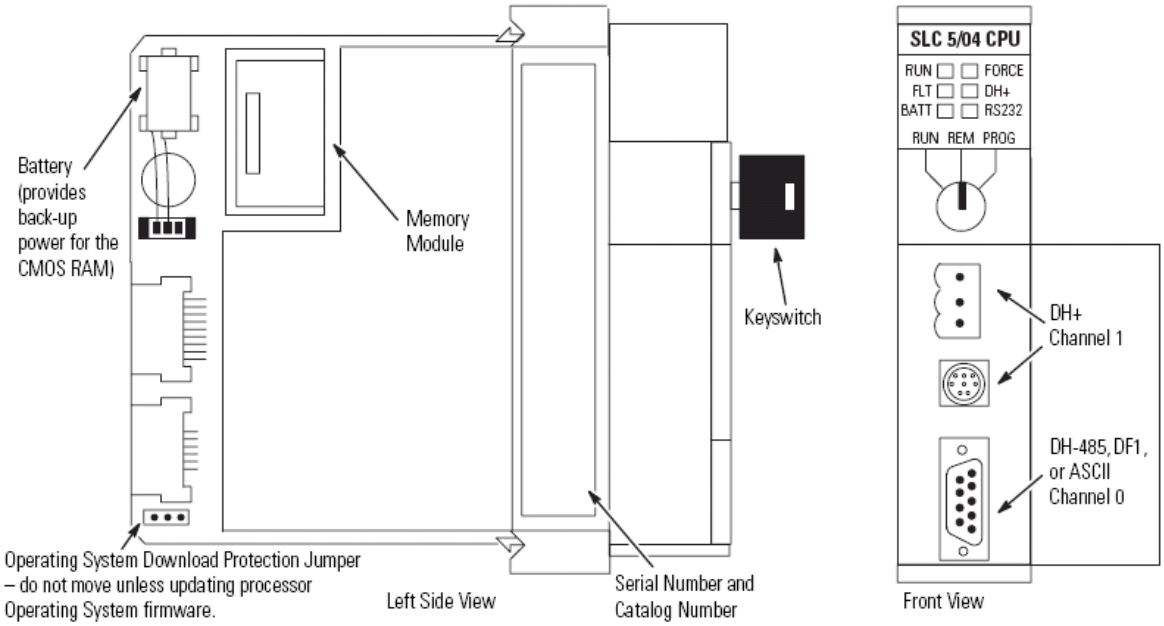


Figura 5.16 Vista lateral y frontal del CPU del PLC SLC 5 / 04 [17]

Si bien esta es la parte de mayor importancia de un controlador, se necesitan de otros dispositivos unidos a éste para su adecuado desempeño; un chasis para la colocación tanto de la fuente de alimentación del PLC como los módulos de entradas y salidas que rigen el mismo. Existen para colocar una variada cantidad de dispositivos en la base, hay para situar cuatro, siete, diez y trece módulos, todos incluyen al CPU del controlador, al chasis donde se ubica el control del sistema de aire acondicionado de la empresa se encuentra un chasis en donde le caben trece módulos, de los cuales se utilizaban once antes de este proyecto, en la actualidad son doce los que se encuentran en uso. Las dimensiones y estructura de esta plataforma se pueden apreciar en la figura 5.17 en donde además se detalla su forma.

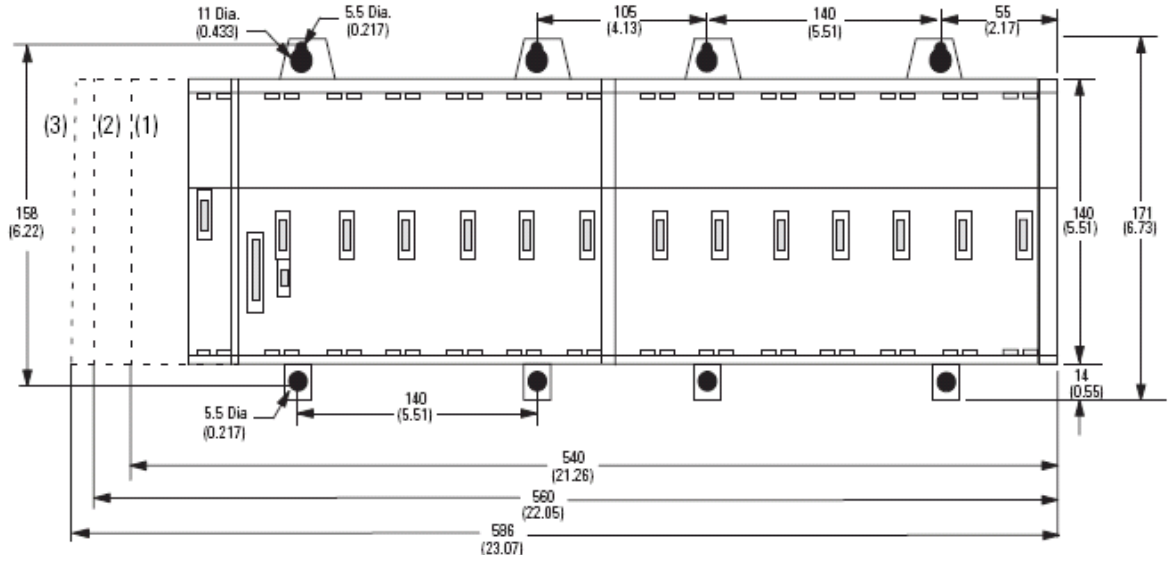


Figura 5.17 Vista frontal de estructura y medidas del chasis del PLC [17]

Las medidas del chasis de la figura 5.17 se encuentran en milímetros, mientras que las que se encuentran entre paréntesis son su equivalente en pulgadas. En el extremo izquierdo de la figura se ubica la fuente de alimentación para el PLC, la cual es una pieza indispensable para el sistema, tanto el controlador como los módulos colocados en el chasis necesitan de 24 voltios de alimentación la cual es brindada por esta fuente. Un diagrama físico de la misma se muestra en la figura 5.18 y su diagrama eléctrico en la figura 5.19.

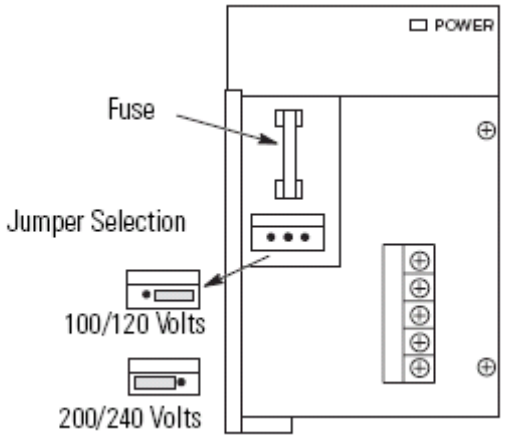


Figura 5.18 Diagrama físico de la fuente de alimentación para el PLC [17]

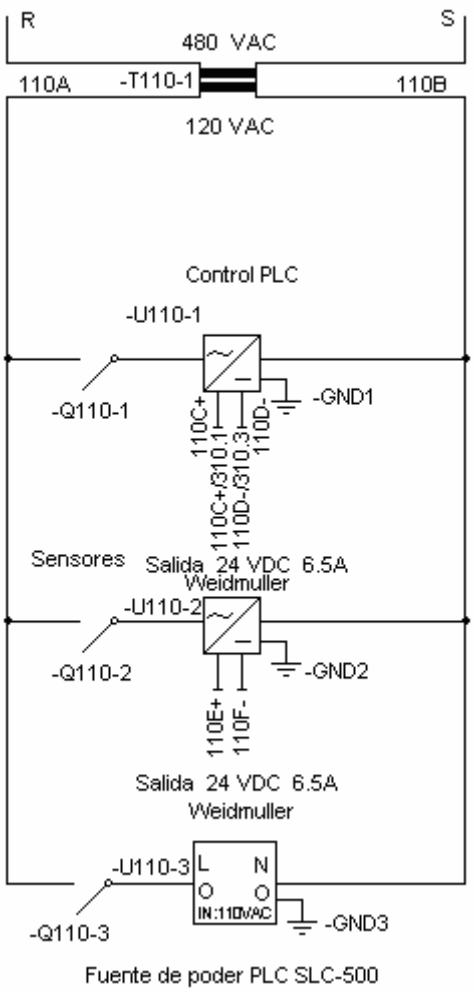


Figura 5.19 Diagrama eléctrico de alimentación al panel de control del sistema de aire acondicionado

En el diagrama de la figura 5.19 se muestra la entrada de 480 VAC, posterior a esto se da la transformación de voltaje a 120 VAC para alimentar cada una de las fuentes del sistema, de aquí la alimentación de las tres fuentes del sistema tanto para los sensores, pantalla de tacto y el PLC, estas tres fuentes brindan 24 VDC.

5.4.5 Descripción de módulo de salidas de relé

Este dispositivo es capaz de colocar una determinada salida en corto circuito o en circuito abierto, simplemente con la indicación por el "software" del programa, la alimentación del PLC es de 24 voltios en corriente directa, por consiguiente este módulo coloca una salida a 24 VDC ó a 0 VDC, las válvulas de tres vías funcionan con 24 voltios en corriente directa o interna, como se apreciará en el apartado 5.2.6. El funcionamiento de un relé es únicamente pasar una posición de normalmente abierta a normalmente cerrada cuando se activa o viceversa, en el caso del funcionamiento de este módulo, cuando un canal recibe la orden de que se active hace que pase de normalmente abierto a normalmente cerrado, o sea, de 0 VDC a 24 VDC, de aquí que el diagrama del circuito sea tan sencillo para un canal como el que se muestra en la figura 5.20 ó como se muestra en el diagrama de conexiones de la figura 5.21 para el módulo en que se utiliza en este proyecto (1746 – OW16 de Allen Bradley).

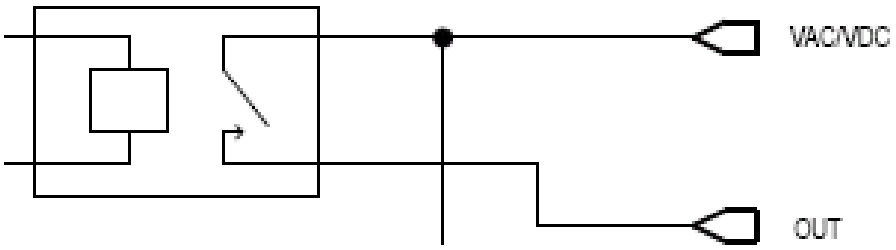


Figura 5.20 Circuito eléctrico para un canal de un módulo de salidas de relé [17]

En el circuito de la figura 5.20, el funcionamiento se basa en el movimiento del interruptor para conectar la entrada de alimentación (VAC/VDC) con la salida (out) cuando el canal es activado.

En la figura 5.21, se muestra lo mismo que en la figura 5.20 sólo que para las ocho entradas del módulo respectivo, en este caso se separan las fuentes de alimentación, una para cuatro salidas y la otra para las cuatro restantes, aunque por lo general se conecta la misma fuente a ambas colocándolas en serie.

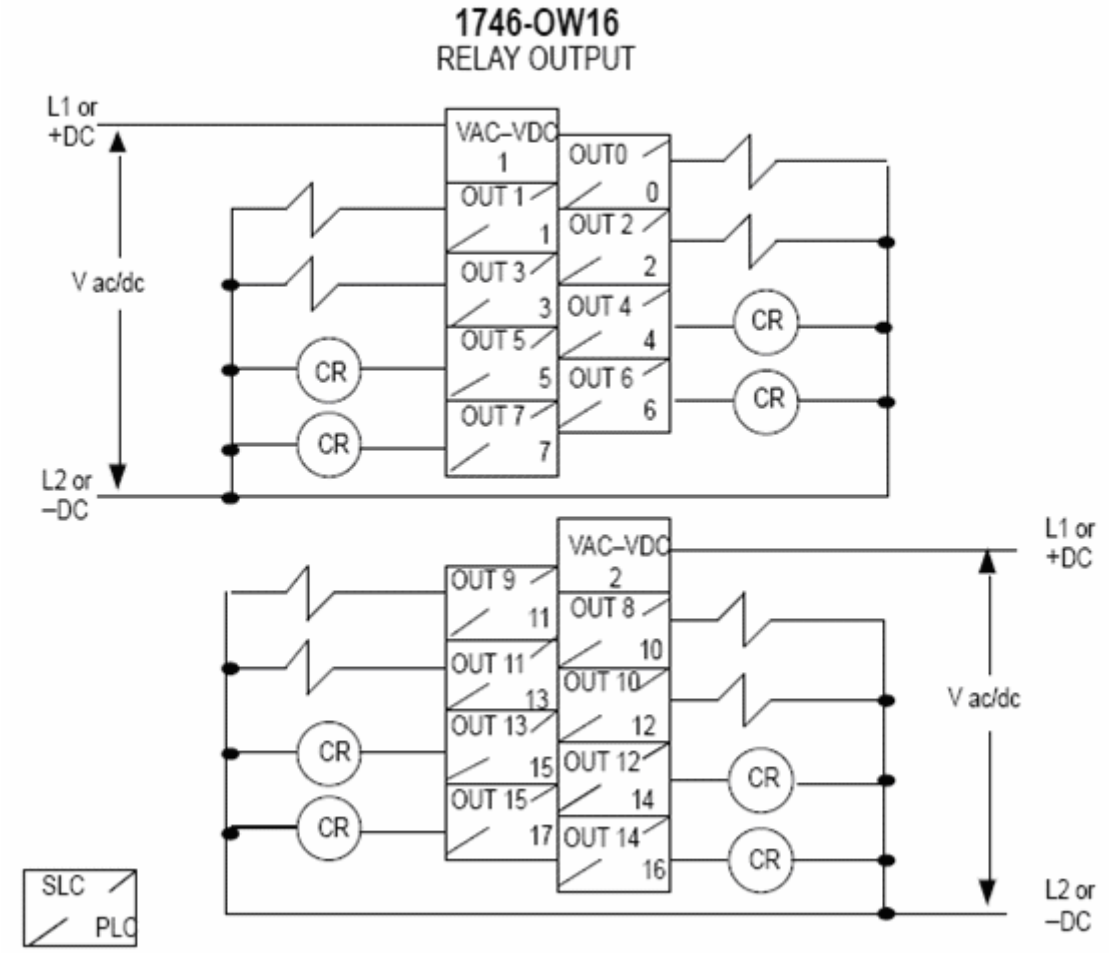


Figura 5.21 Esquema eléctrico del módulo de salidas de relé 1746 – OW16 [17]

5.4.6 Descripción de válvulas de tres vías

El control encendido/apagado para este proyecto consistió en dejar pasar o no el agua al aire de las unidades centrales para enfriarla o no según las restricciones de temperatura que se deseen en el sitio, para este fin se adquirieron e instalaron las válvulas de tres vías, como éstas van a ser controladas en forma automática se necesitó de un actuador para el control, el cual viene junto con las válvulas. Varias vistas de la válvula de mariposa Delta Controls modelo BF6 – 3 – 2200 con el actuador Delta Controls D24 – 210 se aprecian en la figura 5.22.

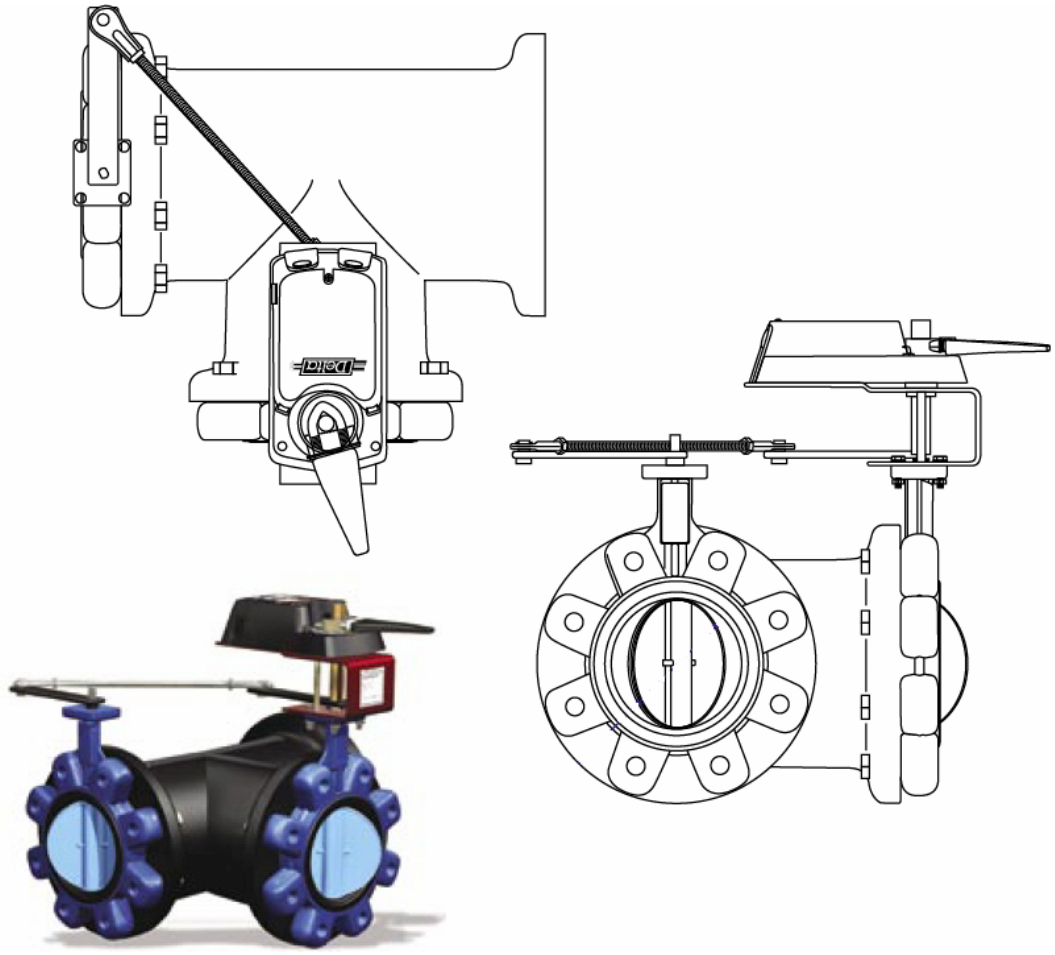


Figura 5.22 Vistas de válvulas de tres vías utilizadas en el proyecto con su respectivo actuador [22]

Las características del actuador de este dispositivo se muestran en el anexo B.5, cabe destacar que el término de mariposa significa que posee una entrada de agua y dos posibles salidas, sin embargo, sólo por una de las dos salidas puede estar fluyendo agua debido precisamente a su estructura. En cuanto al actuador eléctrico, necesita de 24 voltios en corriente directa para cualquiera de ambas salidas que se deseen habilitar, por consiguiente si no se le suministra alimentación alguna (0 V), deja la válvula en la posición en que se encuentra. El diagrama eléctrico de este actuador se muestra en la figura 5.23 en donde CCW significa que el actuador se mueve en contra de las manecillas del reloj CW a favor.

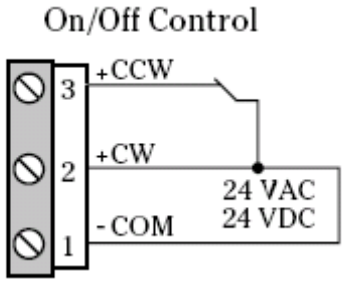


Figura 5.23 Diagrama eléctrico de actuador de válvulas de tres vías [22]

Su torque de salida es de 210 pulgadas – libra, su rotación va de 0 a 90° y puede ser alimentado tanto en corriente directa como en corriente alterna (24 voltios).

5.4.7 Descripción de módulo de salidas analógicas

El dispositivo que controla al variador de frecuencia es un módulo creado para ser dirigido por un PLC, posee salidas analógicas de corriente en este caso (4 – 20 mA) y tiene cuatro canales para este fin. Es el dispositivo 1746 – NO4I de Allen Bradley. De los cuatros canales que dispone el módulo, sólo se va a utilizar uno de ellos para esta aplicación. Este módulo se encuentra instalado en el PLC que controla el sistema de aire acondicionado de la planta, la configuración de este dispositivo se muestra en la figura 5.24, en donde se aprecia la distribución eléctrica de cada canal (salida y común de la señal analógica). También posee una alimentación externa, a diferencia de muchos otros módulos, los cuales reciben el voltaje de alimentación de la misma fuente que se la provee al CPU del PLC.

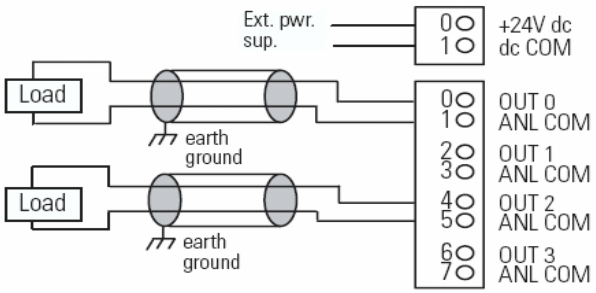


Figura 5.24 Configuración eléctrica de canales para módulo de salidas analógicas 1746 – NO4I [17]

Internamente cada canal es controlado por las indicaciones del CPU del PLC, como el mismo trabaja en forma digital, para poder brindar una señal analógica debe tener un convertidor de analógico a digital internamente, posterior a esta conversión, tiene un amplificador a causa de que el controlador provee señales digitales de baja magnitud en corriente internamente (2.56 µA para el bit menos significativo) y la salida estará en el rango de 4 – 20 mA, la señal saliente de esta etapa pasa a una serie de filtros para brindar un rango exacto de valores al variador de frecuencia, de esta forma el control del motor es el más correcto posible (figura 5.25).

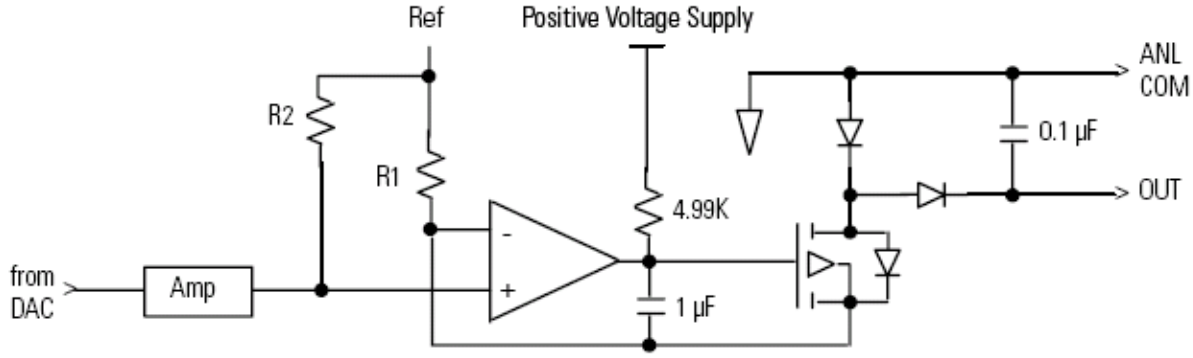


Figura 5.25 Circuito de corriente de salida para un canal del módulo 1746 – NO4I [17]

5.4.8 Descripción de variador de frecuencia

Este dispositivo posee una amplia diversidad de funciones para trabajar en forma controlada los motores. Para este caso se utilizó una bomba centrífuga de 40 HP, por consiguiente, el modelo del variador dependió de la magnitud del voltaje de alimentación del motor (igual para el variador de frecuencia), la corriente nominal del motor y la potencia (en HP), como ambos dispositivos van de la mano, cuando se compró la bomba, también se adquirió su respectivo variador de frecuencia, en este caso, fue el modelo CIMR – E7U4030 de Yaskawa, el cual es un modelo para soportar un motor de una corriente nominal de 67.2 A y una potencia de 40 ó 50 HP. Su configuración eléctrica para las principales entradas y salidas a nivel interno se muestra en la figura 5.26, con mayor detalle en la figura 5.27.

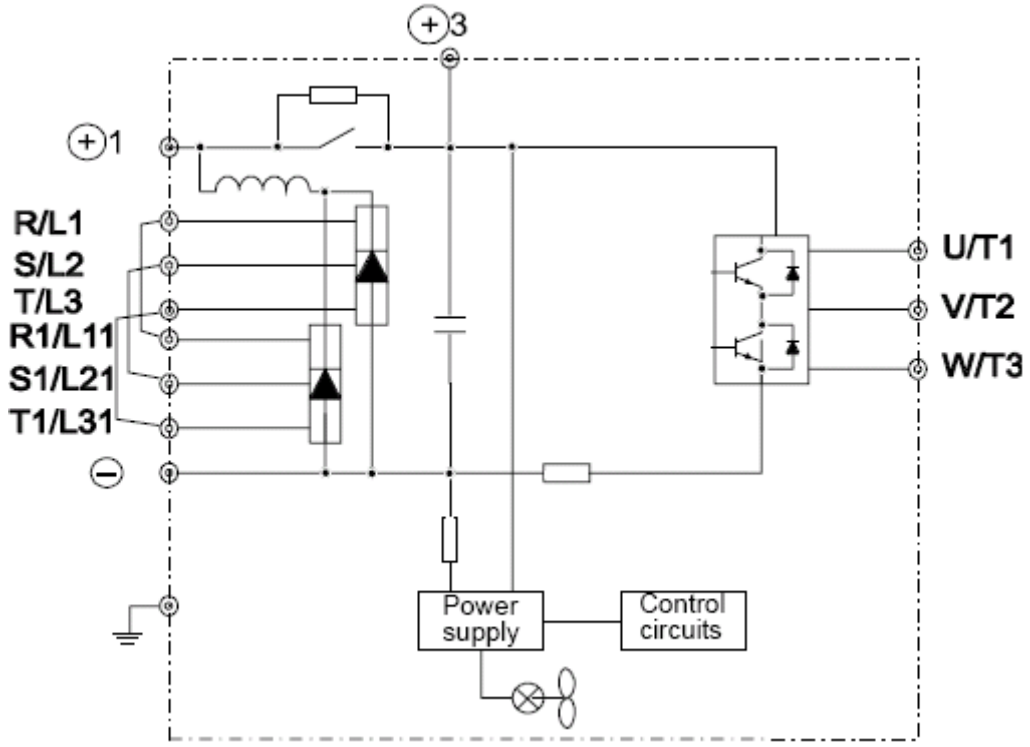


Figura 5.26 Configuración de circuito interno de variador de frecuencia con 480 VAC de alimentación [12]

El variador posee un total de quince entradas (diez digitales y cinco analógicas), diez salidas (siete digitales y tres analógicas) y cinco terminales para comunicación, en lo que respecta a su control. Todas las terminales tanto de entrada como de salida en el variador de frecuencia se aprecian en la figura 5.27, en donde se indican para qué se utiliza cada una. En este proyecto, aparte de las salidas hacia el motor y las entradas tanto de alimentación como de funciones específicas (S1 a S7), se utilizaron las entradas A2 y AC para el control del dispositivo, esta entrada es analógica y vendrá del módulo de salidas analógicas, varía de 4 a 20 mA según la frecuencia a la que indique el control que corre el motor. Además de las entradas y salidas programables por el usuario en forma interna para el correcto uso del variador según lo requerido. En la misma figura se aprecian los contactos de entrada para múltiples funciones, la alimentación, las salidas hacia el motor, las salidas de falla, las entradas de control y las de comunicación.

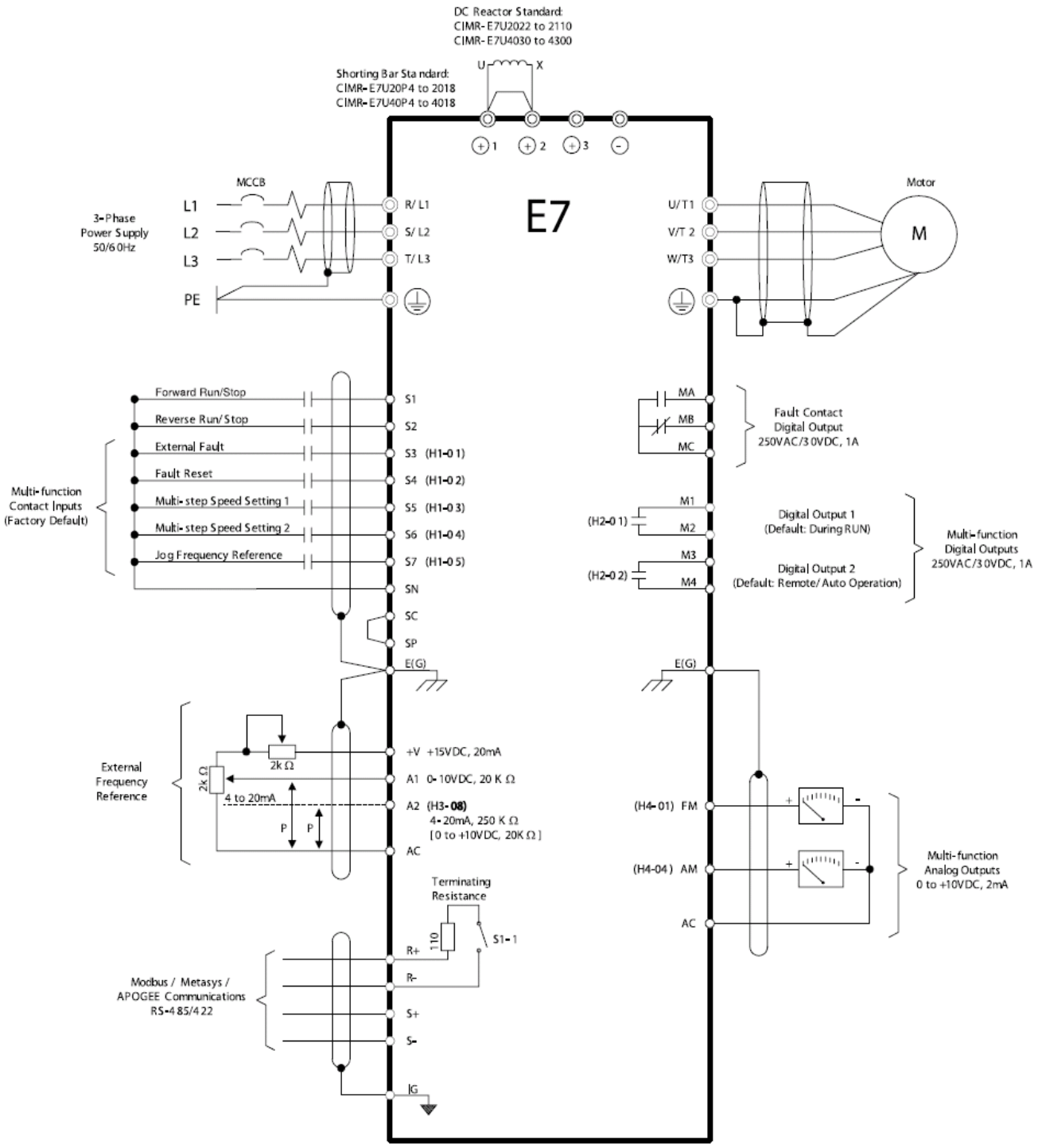


Figura 5.27 Esquema de entradas y salidas para el variador de frecuencia CIMR – E7U4030 [12]

El CIMR – E7U4030 es programable por el usuario según la función a realizar, posee en forma interna 244 parámetros controlables a través de una pantalla de comunicación manual entre el variador y el usuario para efectos de información y de control.

5.4.9 Descripción de bomba centrífuga

Este modelo es el tipo de bomba más utilizado en los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Las partes esenciales de esta bomba centrífuga son el miembro giratorio (el impulsor) y la caja que lo contiene. El impulsor generalmente es movido por un motor eléctrico montado sobre el mismo eje (acoplamiento rígido) o conectado con un acoplamiento flexible. El fluido entra por el centro del impulsor giratorio, es lanzado hacia la voluta y fluye hacia fuera a través del difusor (figura 5.28). El fluido que abandona el impulsor tiene alta energía cinética, la cual es convertida en presión estática en la voluta y el difusor de la manera más eficiente posible. Aun cuando existen varios tipos de impulsores y de cajas, el principio de operación es el mismo.

La bomba que se muestra en la figura 5.28 es de succión simple, el fluido entra al impulsor desde un solo lado. En las bombas de doble succión el fluido entra a la bomba por ambos lados. Una bomba puede funcionar de manera escalonada, con varios impulsores montados sobre el mismo eje, dentro de la misma caja. El fluido que abandona la primera etapa entra al impulsor de la segunda etapa antes de salir de la caja.

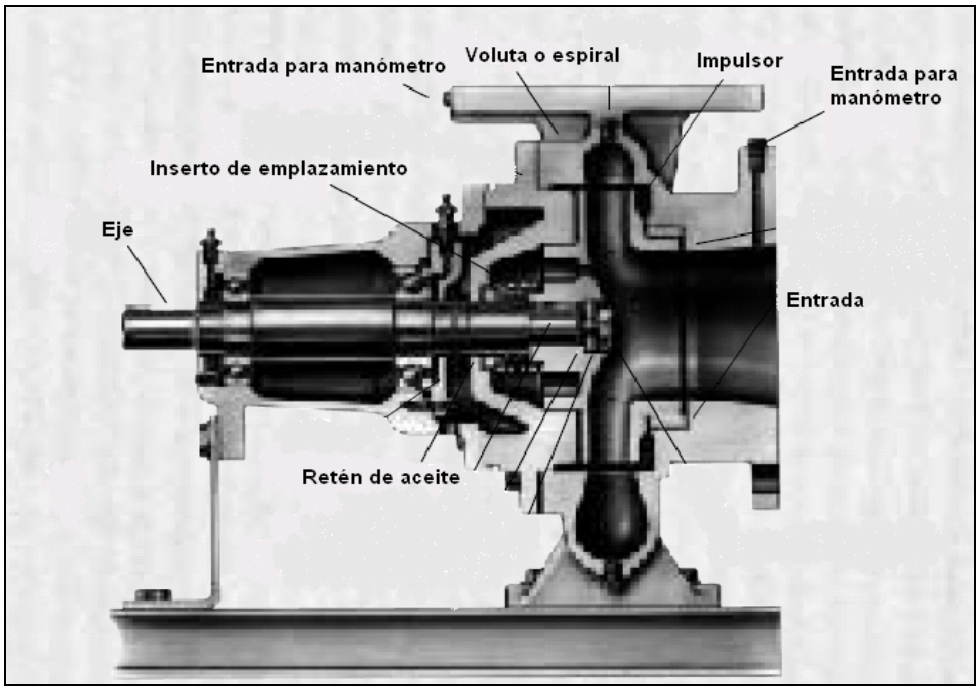


Figura 5.28 Vista interna de una bomba centrífuga con una sola entrada y con acoplamiento flexible [7]

En la figura 5.29 se aprecia una fotografía de la bomba que se utilizó para la realización de este proyecto, la misma es la que se encarga de enviar el flujo de agua hacia las unidades centrales de aire de las máquinas CAI – 01, CAI – 02 y CAI – 03 en forma controlada automáticamente.

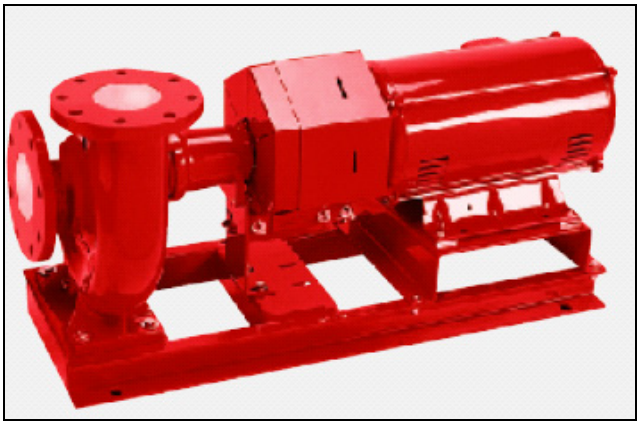


Figura 5.29 Vista de la bomba centrífuga utilizada para impulsar agua hacia la nave 108 [7]

5.5 Descripción del "software"

5.5.1 Descripción de "software" para la utilización de válvulas de tres vías

En el diagrama de flujo de la figura 5.30 se aprecian los posibles caminos y variantes que puede realizar el usuario a través del menú principal de la pantalla de tacto. En este diagrama se muestra el uso tanto en automático como manual para una sola válvula de tres vías, el sistema en cuanto a control encendido/apagado posee cuatro electroválvulas, una para definir el control de temperatura en cada una de las máquinas.

El programa consiste en direccionar por medio de la pantalla sensible al tacto, sectores de memoria dentro del CPU del PLC, estas direcciones se definen directamente en el programa del PLC debido a que se pueden almacenar en forma de números enteros o de punto flotante, de igual forma que la definición de cada bit que es gobernado por medio de la pantalla de tacto. En la pantalla de tacto según el sector presionado se crea una señal que genera un efecto a través comunicación RS – 232 la cual se transmite al PLC, este último, internamente traduce este pulso según el sector de memoria en que se encuentre dentro de la pantalla y la dirección de memoria a la cual está dirigido, para así realizar lo especificado a nivel de "software" en el controlador.

Los bits dentro del programa con lógica de escalera trabajan en forma de relé para habilitar o deshabilitar salidas, así se logra el forzamiento de las válvulas para lograr dejar o no pasar flujo de agua hacia los serpentines de las unidades centrales de aire. Debido a que los actuadores de las válvulas sólo pueden encontrarse en una posición que lo activa ya sea a favor de las manecillas del reloj o en contra, se utilizó una lógica interna para que en una misma línea de código, cuando una esté activa se desactive la otra terminal y viceversa. La lógica de programación en la pantalla de tacto sirvió para lograr que en la interfase se pueda realizar esta situación; el acceso a esta pantalla requiere de una clave para restringir su ingreso a sólo un usuario calificado que manipule esta subrutina.

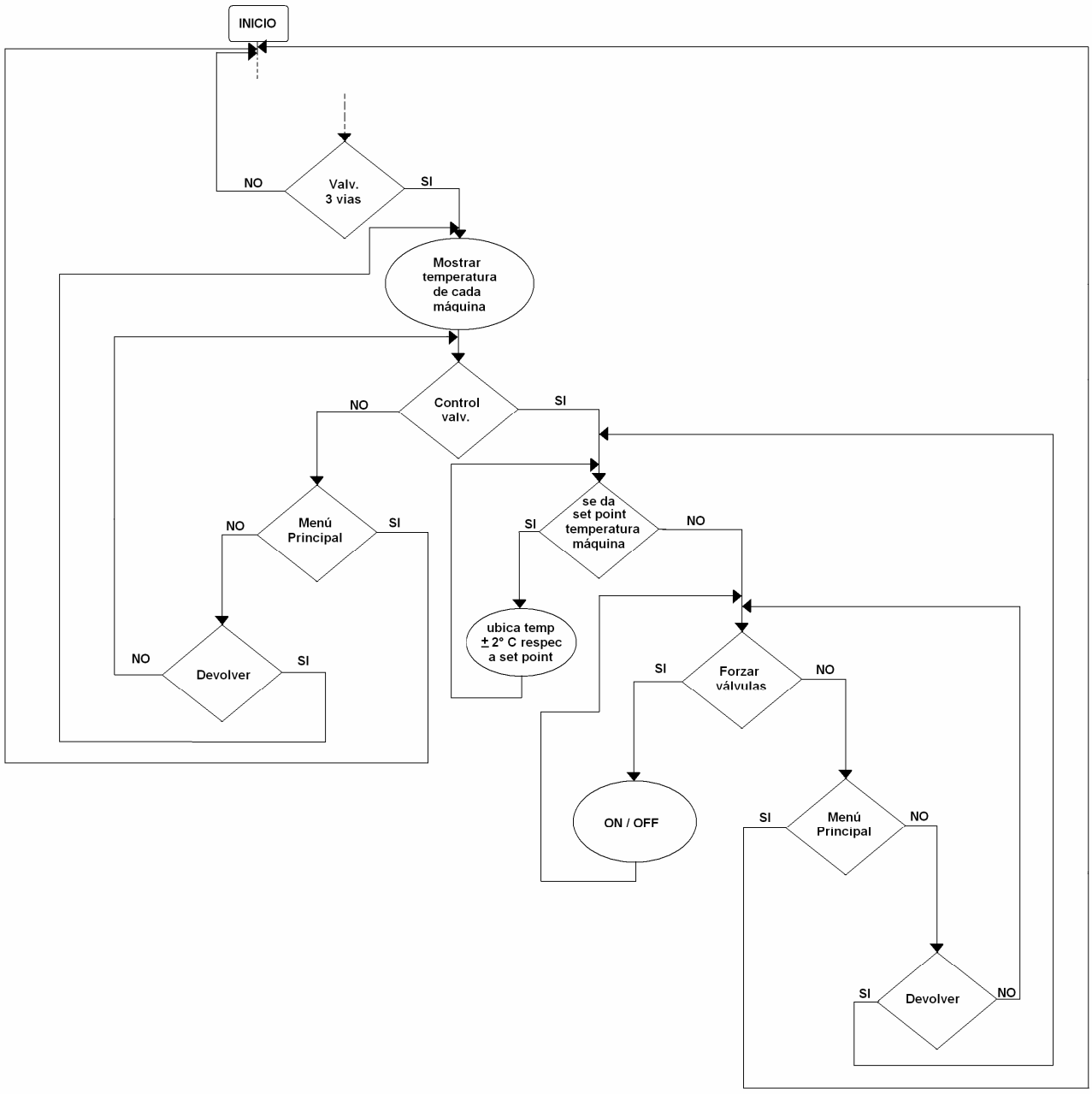


Figura 5.30 Diagrama de flujo de la subrutina de "software" implementada para la pantalla de tacto en cuanto al control de las válvulas de tres vías

Cuando se utiliza el término de punto de referencia, se indica un número entero (“integer”) el cual se almacena en una dirección de números enteros, éstos pasan a un comparador para indicar si el rango de temperatura se mantiene en ± 2°C del indicado, si baja de ese rango desvía el agua para que no llegue al serpentín de la respectiva unidad central de aire, si por el contrario, sube del rango, la válvula envía agua hacia el serpentín de la unidad central de aire nuevamente.

En el programa de “software” para la utilización de las válvulas de tres vías se llevó a cabo mediante lógica de escalera con RSLogix 500 de Allen Bradley, para este programa se siguió una secuencia de pasos para lograr el objetivo buscado. Se recibe una señal analógica que viene de los transmisores de corriente, ésta a su vez, es recibida y procesada en el CPU, cuando se recibe un dato se envía a un sector para que se vaya almacenando en la memoria y procesando, se escala el valor leído desde memoria para que cumpla las especificaciones de entrada y salida requeridas, se promedia, porque posee dos sensores que le envían datos de las condiciones de la temperatura en cada sector de la planta donde se ubica cada máquina, se ubica en una dirección para ser evaluado con el límite inferior del punto de referencia indicado, de igual forma que con el superior, teniendo esta secuencia, se posee el dato necesitado para realizar la comparación respecto al valor del punto de referencia, así se le indica a la válvula si permite o no el paso de agua hacia el serpentín de su respectiva unidad central de aire. Estos valores poseen la capacidad de ser forzados por medio de la pantalla de tacto para hacerle la indicación al actuador de las válvulas de tres vías la dirección a seguir.

La pantalla de tacto posee la capacidad de mostrar los valores según los sectores de memoria del PLC leídos, la dirección en que se ubican los valores de la temperatura son en un sector de punto flotante del CPU, de esta forma se muestran los decimales del valor a leer luego de ser escalado en el programa del controlador.

5.5.2 Descripción de "software" para la bomba que varía el flujo de agua a través del sistema de tuberías

La utilización de la bomba centrífuga en el proyecto se basa en generar mayor o menor cantidad de flujo de agua a través del sistema de tuberías, esto lo realiza por medio de un regulador discreto dentro del controlador (PLC), el cual proporciona los cambios de frecuencia que debe tener a través del tiempo para generar mayor o menor carga de enfriamiento en el sistema, la función se encuentra programada en el CPU del controlador, predice el nivel de temperatura que se va a registrar durante el día y de esta forma le suministra a la bomba los cambios en su frecuencia de alimentación, para así tener un nivel de temperatura relativamente constante y apto para tener conforme al personal que labora en la planta. El sistema posee su propia realimentación, la cual se la suplen los sensores de temperatura ubicados en cada sección de la planta.

La interfase para ver el nivel de temperatura en la planta se aprecia en su mayoría dentro del diagrama de flujo de la figura 5.30, esta solución influye directamente sobre la primera debido a los cambios en el nivel de temperatura generados por la misma, mas éstos no se muestran en este apartado porque serían redundantes. El diagrama de flujo mostrado en esta sección, muestra el desplazamiento a través del menú (pantalla de tacto) en donde se decide si se controla la bomba que envía agua fría al sistema en forma manual o automática, y en caso de ser en forma manual, su respectiva referencia, porque en esta etapa de la solución, el desempeño principal de la regulación en el nivel de temperatura en la planta es proporcionado por el regulador que se encuentra programado dentro del controlador (PLC).

La figura 5.31 muestra las decisiones a tomar en la interfase, el usuario elige si le da una frecuencia determinada para que trabaje el motor (bomba) en forma constante o bien, deja que el regulador actúe en el sistema, prediciendo el nivel de temperatura que puede llegar a alcanzar según la hora del día con su respectiva retroalimentación para posibles correcciones en caso de que no corresponda la predicción.

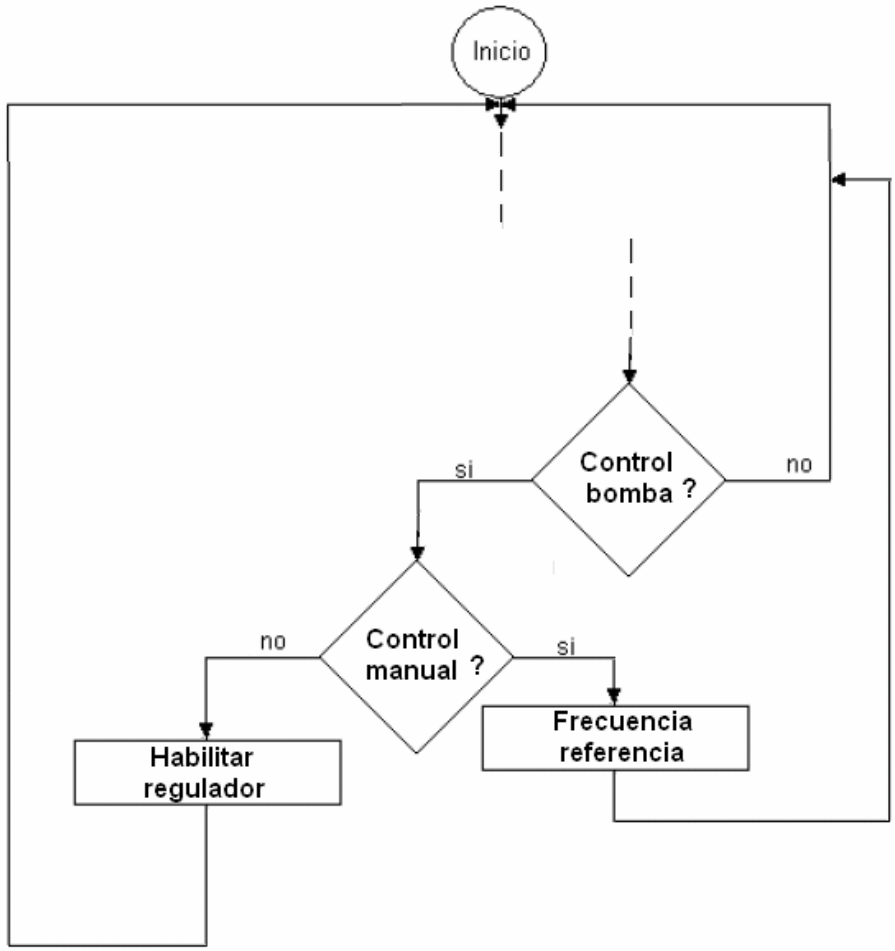


Figura 5.31 Diagrama de flujo de la subrutina de "software" implementada para la pantalla de tacto en cuanto al control de la bomba centrífuga

Las líneas punteadas indican otra funciones del menú principal en donde se pueden acceder, como por ejemplo al que controla las válvulas de tres vías, sin embargo, estas secciones no interesan para efectos de este proyecto, ya que fueron creadas en otro momento, no influyen directamente y no poseen ningún control automático dentro del sistema.

5.5.3 Descripción de "software" para la pantalla de tacto

En lo referente a la pantalla sensible al tacto del sistema de aire acondicionado, se debieron realizar algunas modificaciones para poder implementar la automatización para la nave 108, el diagrama de flujo presentado en la figura 5.32 muestra la ruta tanto para la visualización como para el control del sistema con sus respectivas prioridades.

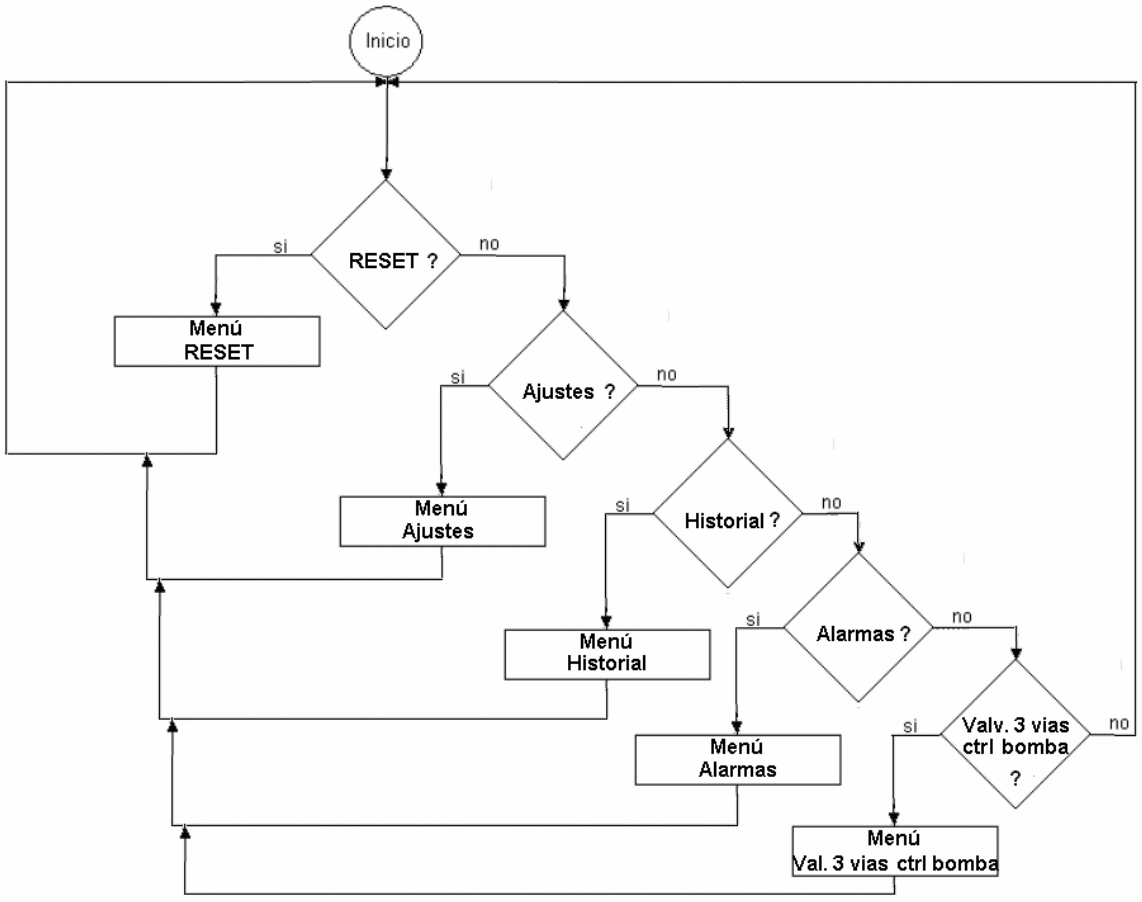


Figura 5.32 Diagrama de flujo de la subrutina principal de la pantalla de tacto

El menú principal se encontraba como se muestra antes de iniciar el proyecto, exceptuando la opción de acceder al menú de las válvulas de tres vías y control de la bomba; la creación de esta elección se agregó debido a la implementación del proyecto de automatización del sistema de aire acondicionado para la nave 108.

El diagrama de flujo de la figura 5.32 muestra lo que presenta la figura 5.33, sin embargo, en esta última figura se aprecia la pantalla de tacto con su respectiva modificación para controlar y observar sus variables.

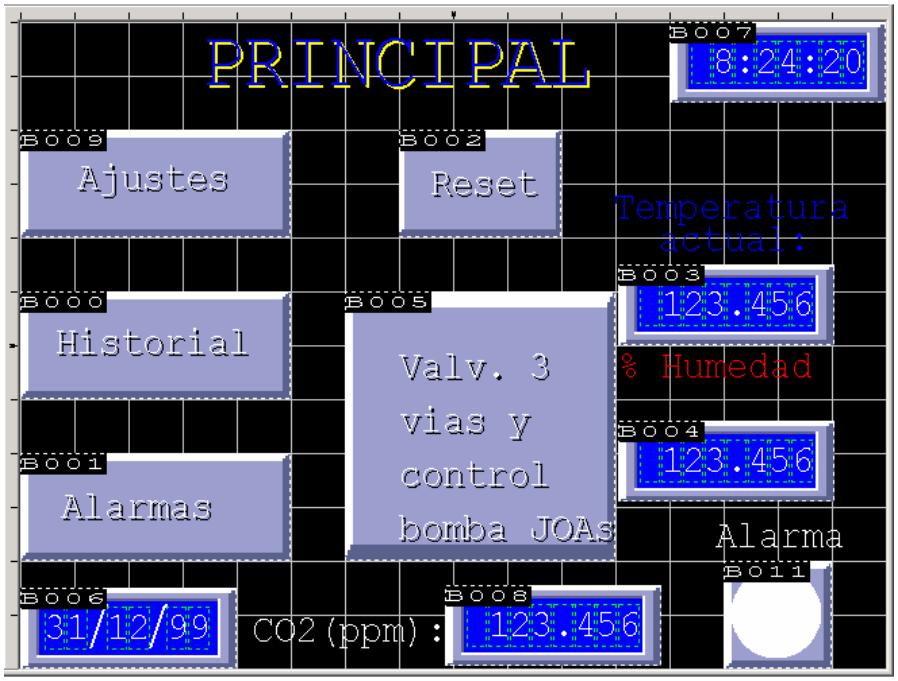


Figura 5.33 Menú principal del sistema de aire acondicionado mostrado por la pantalla de tacto

El menú principal de la pantalla de tacto además de tener subrutinas internas para ingresar a ciertas opciones dentro del sistema, también posee información general de todo el sistema como si se presenta una falla, la fecha y hora, temperatura y humedad actual en la nave 107 entre otras.

En el apéndice A.2 se presenta una parte del manual de usuario para la pantalla de tacto, en esta sección se encuentran los detalles del acceso a la subrutina de manejo de las válvulas de tres vías y control de la bomba que irriga agua para las unidades centrales de aire de la nave 108.

5.6 Diseño del regulador en tiempo discreto

La temperatura de la planta luego de estar deshabilitado el sistema puede subir hasta los 32° C si se deja deshabilitado durante el momento en que la temperatura externa a la planta es mayor, sin embargo, si esto se da en los momentos en que la temperatura externa es menor, también ocurre un calentamiento, pero no con una magnitud tan elevada. En el apartado 6.1 se puede apreciar lo que ocurre ante un escalón en el sistema luego de siete horas de inactividad, la idea de la regulación del sistema es que no ocurran esas oscilaciones en el nivel de temperatura respecto al tiempo y se mantenga relativamente constante. La idea de lo que se desea llevar a cabo mediante la implementación del regulador se podría apreciar en la gráfica de la figura 5.34, en donde el sistema queda estable luego de un escalón, este regulador se hizo en base a la idea de que el sistema siempre se encuentre en funcionamiento. El sistema funcionando en forma constante disminuye su nivel de temperatura luego de 17 horas de encontrarse en uso en lugar de aumentarla, este comportamiento también se puede apreciar en el apartado de resultados (6.1) en la figura 6.2.

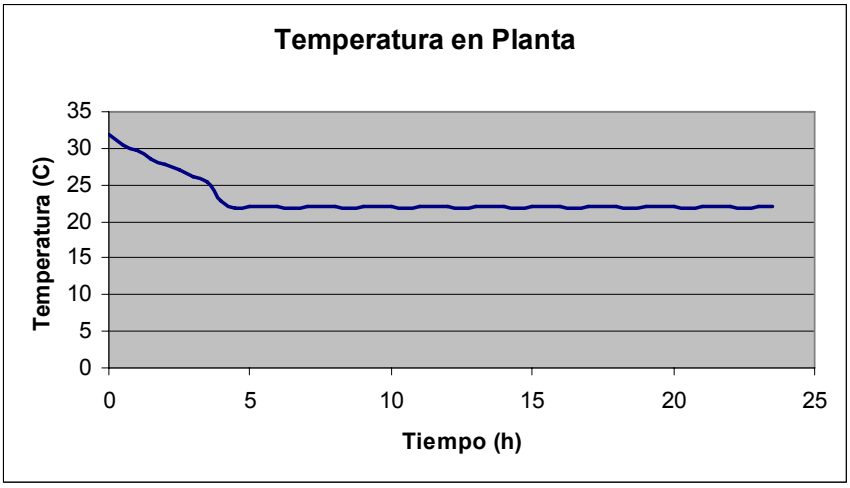


Figura 5.34 Gráfica del comportamiento deseado del sistema luego de haber implementado el regulador

En la gráfica de la figura 5.34 se aprecia una leve oscilación, producto de un eventual error del sistema, el cual no lo afectaría en sus fines de mantener un nivel de temperatura adecuado para el buen desempeño de sus empleados, esta temperatura se mantendría cercana a los 22°C tomando este valor como punto de referencia. Esta cercanía se desea que oscile entre los 21.9°C y los 22.1°C, o sea, que la diferencia sea de $\pm$ 0.1°C.

Para la escogencia del regulador en tiempo discreto, se debe trabajar en base al modelo de la planta según las ecuaciones 5.16 y 5.17 tomadas del apartado 5.1. Para la escogencia de un tiempo de muestreo, se recomienda utilizar un T menor a la décima parte de la constante de tiempo dominante, para este caso específico sería 1/10 de una hora, lo cual viene a ser 6 minutos, sin embargo, como debe ser menor, se escogió de 1/12, lo cual equivale a 5 minutos o 0.0833 en términos de una hora.

$$G(z) = \frac{2.05565z^{-2}}{(z - 0.9605)} \tag{5.16}$$

$$G(z) = \frac{2.05565z^{-2}}{(z - e^{-0.0403T})} \tag{5.17}$$

La ecuación 5.17 representa el modelo de la planta en función de Z, sin embargo, para que los cambios en el nivel de carga térmica presentes en la planta se lleven a cabo de una forma adecuada, es necesario que posea un regulador, el cual se va a realizar suponiendo que la temperatura de la planta oscila entre 21.9° C y 22.1° C cuando se estabiliza luego de la entrada ante un escalón y variaciones de la temperatura externa, este comportamiento se aprecia en la figura 6.2. Ante esta situación, realizando el mismo desarrollo de la ecuación 5.1 hasta la 5.15, el modelo de la planta con el regulador en función de Z incorporado quedaría como se muestra en la ecuación 5.31. En esta ecuación se hace la diferencia respecto a la 5.16 que también está designada como G(z), a ésta se le asignó G1(z).

$$G1(z) = \frac{2.20547z^{-2}}{(z - 0.96245557)} \tag{5.31}$$

Entonces se considera el esquema básico de control a lazo cerrado de la figura 5.35, en donde se muestra el diagrama de bloque en que aparecen la planta, el regulador y el sensor en la retroalimentación.

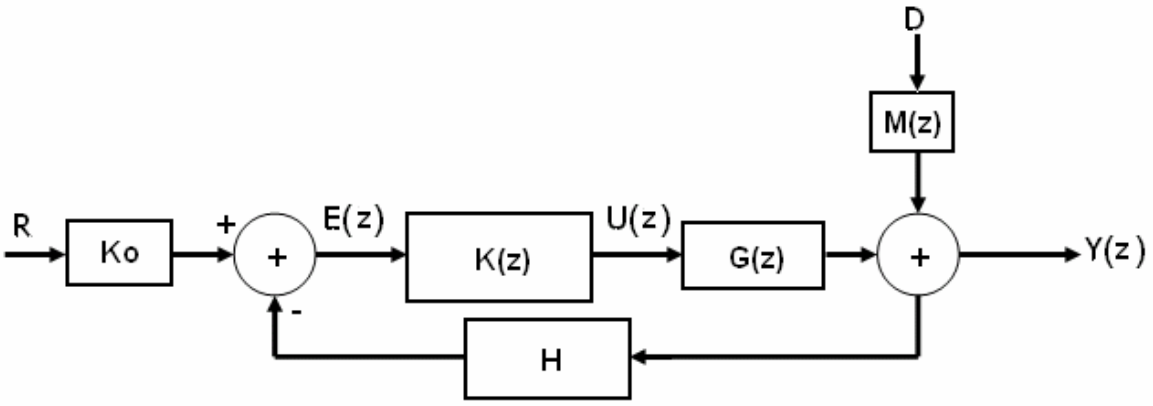


Figura 5.35 Esquema básico en diagrama de bloques de lo deseado para regular el sistema de aire acondicionado de la planta

En el diagrama de bloques de la figura 5.35 se muestra R que representa una constante, E(z) representa la entrada al sistema antes del regulador K(z), U(z) es la entrada a la planta después del regulador, D equivale a la perturbación del sistema y M(z) su función de transferencia asociada, H es el sensor y Y(z) equivale a la salida del sistema. Todo está en función de Z, exceptuando R que es una constante y D son las unidades de la perturbación, las cuales se transforman a Z en M(z), H es la retroalimentación, la cual tiene otras unidades respecto a Z, de aquí la presencia de Ko para pasar la constante de entrada (R) a las mismas unidades respecto a H.

Cabe destacar que en el diagrama de la figura 5.35, la perturbación tiene un modelo exacto, sin embargo el mismo no ha sido medido. Aquí es donde surge el control por modelo interno al controlador o IMC (Internal Model Control), la cual es una técnica de control moderna, esta idea se basa en seleccionar un modelo del sistema controlado en lazo cerrado en combinación con el modelo estimado del proceso en lazo abierto, sujeto a la restricción de la realizabilidad física.

Normalmente se desea que Y(z)=R y en vista de que el sensor H, de momento no se va a utilizar, a causa de que el sensor es sólo en caso de errores dentro del sistema, o sea, se va a predecir el modelo de la planta según los datos tomados para realizar el modelo matemático de la misma y de igual forma, se va a predecir y revisar su comportamiento cada período de muestreo (T). Por consiguiente, el valor del sensor para este caso en que la temperatura en la planta va a ser la adecuada, será uno. Bajo esta condición se obtiene lo que se refleja en el modelo matemático de la planta presentado en la sección 5.1, es una aproximación burda de la planta a controlar, esto se debe a que es una aplicación práctica.

Una forma de determinar las perturbaciones D(z) es sustraer la respuesta medida de la planta Y(z) de la respuesta predicha de la planta, este diagrama se presenta en la figura 5.36, a partir de la cual se determina la ecuación 5.32.

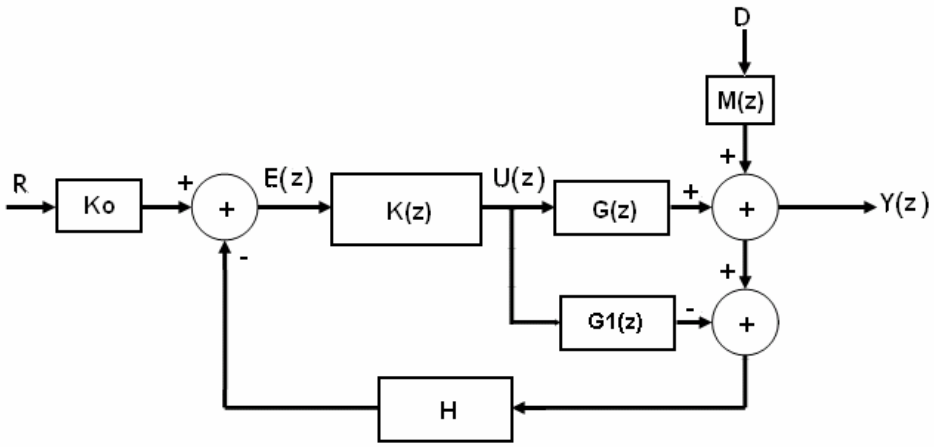


Figura 5.36 Esquema en diagrama de bloques de lo deseado para regular el sistema de aire acondicionado utilizando una función de transferencia para la planta

El diagrama de la figura 5.36 muestra que a partir de un modelo de la planta también se puede obtener un modelo para la perturbación en función de otras variables, la ecuación 5.32 muestra tal situación.

$$D1(z) = Y(z) - G1(z) * U(z) \tag{5.32}$$

D1 representa las perturbaciones estimadas. La ecuación 5.32 se puede volver a escribir como aparece en la ecuación 5.33 para obtener el valor del regulador buscado, el cual también se presenta en esta ecuación.

$$U(z) = K(z) * \left[R(z) - D1(z)\right] \Rightarrow K(z) = \frac{1}{G1(z)} \tag{5.33}$$

Tomando en cuenta la ecuación 5.33, se puede obtener el regulador tomando como función inversa del modelo de la planta tal y como se observa en la ecuación 5.34.

$$K(z) = \frac{(z - 0.96245557)}{2.20547 z^{-2}} \tag{5.34}$$

Pasando al dominio discreto:

$$\frac{M(z)}{E(z)} = \frac{(z - 0.96245557)}{2.20547 z^{-2}} \Rightarrow M(z) * (2.20547 z^{-2}) = E(z) * (z - 0.96245557)$$

$$E(z)*(z-e^{-0.038267}) = M(z)*2.20547z^{-2} \Rightarrow E(z)*(1-e^{-0.038267}z^{-1}) = M(z)*2.20547z^{-1}$$

$$Z^{-1}\left\{M(z)*2.20547z^{-1}\right\} = Z^{-1}\left\{E(z)*(1-e^{-0.038267}z^{-1})\right\} \Rightarrow 2.20547m(k-1) = e(k) - e^{-0.038267}e(k-1)$$

$$e(k) = 2.20547m(k-1) + e^{-0.038267}e(k-1)$$

El regulador representado en tiempo discreto debió ser programado dentro del PLC, como el "software" en que se programa dentro de un controlador de esta clase no posee las características como para introducir el regulador y lograr el respectivo control, se pasó la ecuación de diferencias a pseudo–código para lograr un nivel de entendimiento del proceso de transformación de "software" en el CPU del controlador. El pseudo–código optimizado por medio de precálculo quedó como se muestra a continuación [13].

```
label init
        e(k-1)=0;
        m(k)=0;
        m(k-1)=0;
        p(k)=0;
        K1=2.71828exp(0.038267);
        K2=2.20547;
        time= T;
        EnableTimer(time);
        EnableInterruptTimer(proc);

label loop
        goto loop;

label proc
        do begin
        in(m(k));
                e(k)=p(k);
        out(e(k));
```

```
e(k-1)=e(k);
m(k-1)=m(k);
m(k)=m(k+1);
        p(k)=m(k)-K2m(k-1)+K1e(k-1);
end;
```

El pseudo–código mostrado anteriormente representa el programa que contendría un computador digital, sin embargo, en lógica de escalera para un PLC la programación es diferente, por lo que se debió convertir el programa anterior u otro que realizara la misma función pero en lógica de escalera.

El código lo que muestra es una etiqueta de inicio del programa que regula el nivel de temperatura en la planta, o sea, el inicio de la subrutina donde se encuentra el regulador, posteriormente inicializa las variables de entrada, tanto el valor actual como el anterior; el valor anterior indica el valor que tenía la variable de entrada un período de muestreo antes del valor actual. También inicializa la ecuación a ser evaluada, le asigna valor a las constantes del sistema, las cuales dependen del tiempo de muestreo del sistema, inicializa el tiempo de muestreo, habilita el temporizador y su interrupción, esto en lógica de escalera sería colocarle valores a ciertas posiciones de memoria dentro del PLC e invocar una llamada a una subrutina.

Dada esta situación generaría una etiqueta para que el proceso sea cíclico, esto en un controlador industrial no debe implementarse, ya que el sistema lo trae por defecto; ya en lo que es el procedimiento a realizar, se genera la entrada del valor actual, a la salida se traslada el valor de la ecuación del regulador, posteriormente le genera al valor anterior el valor actual una vez transcurrido el tiempo de muestreo, lo mismo ocurre a su entrada, sólo que en el siguiente período le asigna al valor de entrada el valor futuro, el cual es precisamente el que predice el regulador, así le asigna a la ecuación el valor actual de la entrada menos dos veces la segunda constante multiplicada por el valor de su entrada pasado mas el valor de su salida pasada multiplicada por la primera constante. Con este se daría por terminada esta subrutina, la cual se actualizaría cada período de muestreo.

Finalmente el diagrama de bloques de todo el sistema queda como se presenta en la figura 5.37.

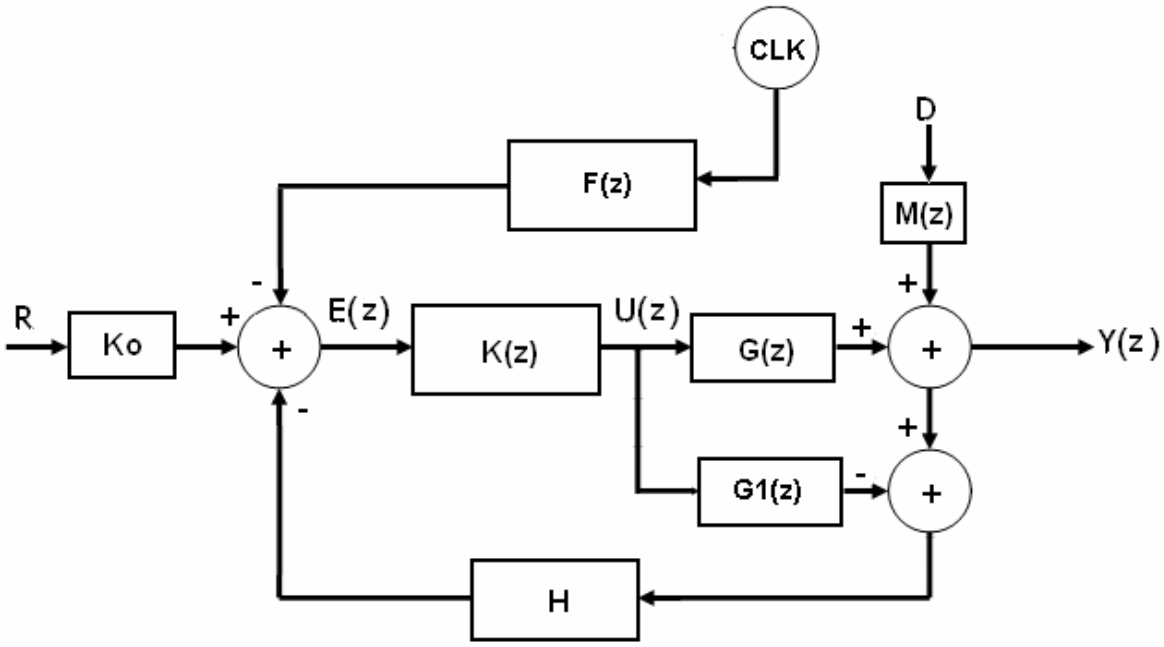


Figura 5.37 Esquema en diagrama de bloques del sistema con su respectiva regulación

La figura 5.37 muestra la variante respecto a la 5.36 que se introduce la predicción del sistema (F(z)) respecto al tiempo del día en que se encuentre el sistema funcionando, la perturbación principal al sistema es la radiación solar, sin embargo, esta perturbación no se midió para la solución al problema, pero debido a la consecución de muchas mediciones se logró obtener la respuesta promedio de las perturbaciones, de aquí la implementación de un reloj como una función de transferencia específica que regula el sistema, esta predicción no siempre se cumple, en ese hipotético caso es cuando entra en funcionamiento la retroalimentación (sensor de temperatura H).

Capítulo 6: Análisis de resultados

En esta sección se presentan las mediciones de temperatura y su respectivo análisis, tanto antes como después de automatizar el sistema, de forma similar que interna y externamente de la planta para determinar un promedio de mediciones en cuanto a la temperatura, así como la determinación del modelo matemático para el sistema.

6.1 Resultados

En la tabla 6.1 se muestran algunas de las mediciones de temperatura en la planta (nave 108) ante una puesta en marcha del sistema, o sea, el equivalente a un escalón luego de siete horas de inactividad, en un momento en que las cargas térmicas son menores en la planta. Las mediciones se hicieron el 14 y 15 de septiembre, 2, 3, 17 y 18 de noviembre, 14, 15, 29 y 30 de diciembre y 26 y 27 de enero, se tomó un promedio de todas a las horas indicadas y dieron los resultados de la tabla 6.1.

Las mediciones se llevaron a cabo sin que el sistema estuviera automatizado, únicamente con el arrancado del “chiller”. El sistema para esta medición no fue detenido a la medianoche como era costumbre durante los días indicados en los que se realizaron las mediciones.

Se llevaron a cabo un total de 51 mediciones en los tramos de temperatura, suficientes para dar una característica de la respuesta del sistema ante un arranque imprevisto, de aquí la presentación de la gráfica que aparece en la figura 6.1, la cual se tomó a partir de valores que se encuentran en la tabla 6.1 y otros que se omitieron, los cuales se presentan en forma completa en el apéndice A.6.1, ya que no aportan cambios significativos en el sistema. Cabe destacar que el escalón que se da en este caso es negativo debido a las características del sistema de bajar el nivel de temperatura, sin embargo, si se cambia su signo se tendrá un escalón partiendo de 28.4° C como referencia y tomando la acción de bajar la temperatura de manera ascendente.

Tabla 6. 1 Valores de temperatura promedio en la planta ante un escalón sin automatizar el sistema de aire acondicionado

Sector	Temperatura (°C)	Hora
Máquina CAI – 01	28.4	7:01 a.m.
Máquina CAI – 01	25.3	8:40 a.m.
Máquina CAI – 01	24.1	10:35 a.m.
Máquina CAI – 01	25.4	12:03 p.m.
Máquina CAI – 01	25.5	12:29 p.m.
Máquina CAI – 02	25.0	1:29 p.m.
Máquina CAI – 02	23.5	3:36 p.m.
Máquina CAI – 02	22.8	5:33 p.m.
Máquina CAI – 02	22.6	6:33 p.m.
Máquina CAI – 02	21.8	8:05 p.m.
Máquina CAI – 02	20.9	9:02 p.m.
Máquina CAI – 02	18.7	11:39 p.m.
Máquina CAI – 03	18.0	12:36 a.m.
Máquina CAI – 03	17.4	2:06 a.m.
Máquina CAI – 03	16.8	4:38 a.m.
Máquina CAI – 03	17.2	6:31 a.m.

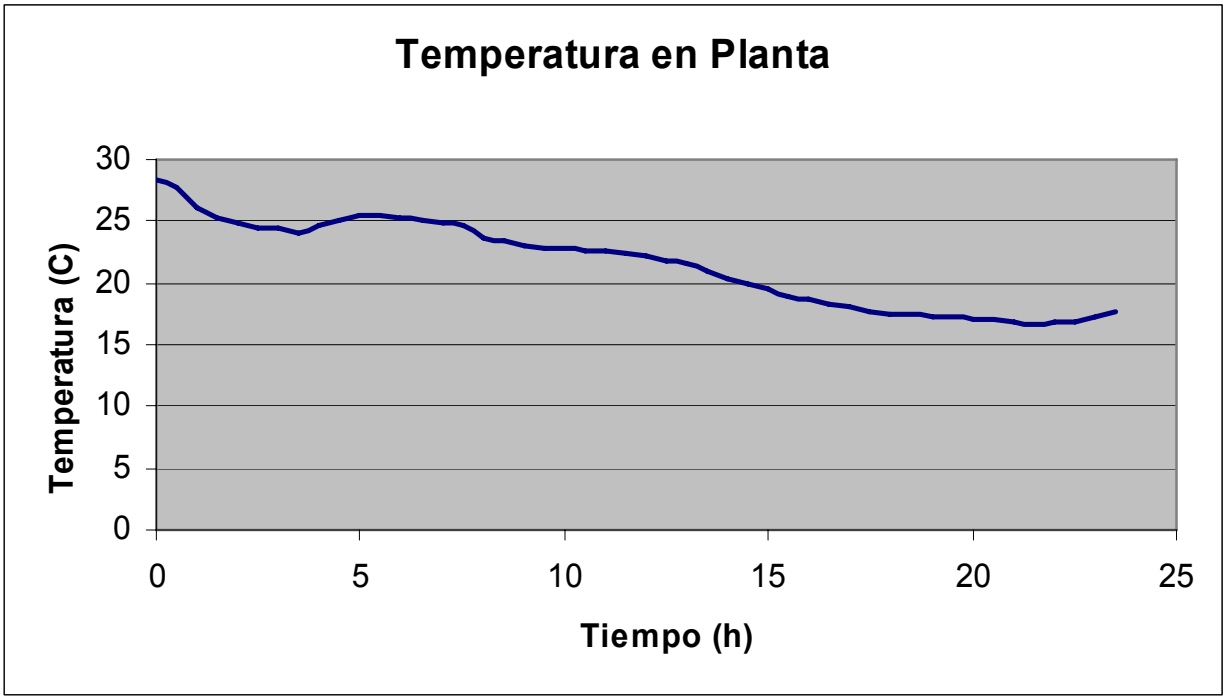


Figura 6.1 Gráfica del desempeño del sistema de aire acondicionado sin automatizar

El nivel de temperatura en el exterior para estos días osciló según lo mostrado en la tabla 6.2 en promedio según la hora, e influyó en cierto modo con la magnitud leída en el interior de la planta, este fue proporcional mientras el sistema estuviera encendido y estable (aproximadamente entre 9:30 a.m. y 6:00 p.m.).

Tabla 6.2 Valores de temperatura promedio a nivel externo de la planta para diferentes horas y días

Nivel de temperatura externa en la planta (°C)	Hora del día
18.1	7:09 a.m.
19.3	8:10 a.m.
19.9	9:09 a.m.
21.3	10:10 a.m.
22.4	11:12 a.m.
23.5	12:01 p.m.
24.6	1:15 p.m.
24.7	2:02 p.m.
24.9	3:06 p.m.
24.5	4:10 p.m.
23.3	5:11 p.m.
22.0	6:13 p.m.
20.9	7:14 p.m.
18.9	8:13 p.m.
18.3	9:19 p.m.
17.9	10:11 p.m.
17.3	11:00 p.m.
16.9	12:08 a.m.
16.6	1:03 a.m.
16.0	2:02 a.m.
15.9	3:09 a.m.
15.8	4:10 a.m.
15.9	5:10 a.m.
17.2	6:10 a.m.

Tabla 6.3 Valores de temperatura en la planta una vez el sistema funcionando en forma automática apagando el "chiller" a las doce de la noche

Temperatura (°C)	Tiempo (h)
28.5	0
26.1	1
24.8	2
24	3.5
25	4.5
25.6	5.5
24.8	7
23.8	8
22.9	9.5
22.6	11
22.3	13.5
22.1	15
22	16
22.1	17.5
24.4	19.5
25.9	21
27.6	23

Los valores de la tabla 6.3 muestran el nivel de temperatura en la nave 108 con el sistema funcionando en forma automática, estos valores se empiezan a incrementar luego de 17 horas de estar en uso debido a que el "chiller" se apagaba a las doce de la noche y se volvía a encender a las siete de la mañana, en la gráfica de la figura 6.2 se muestra el resultado de esta tabla.

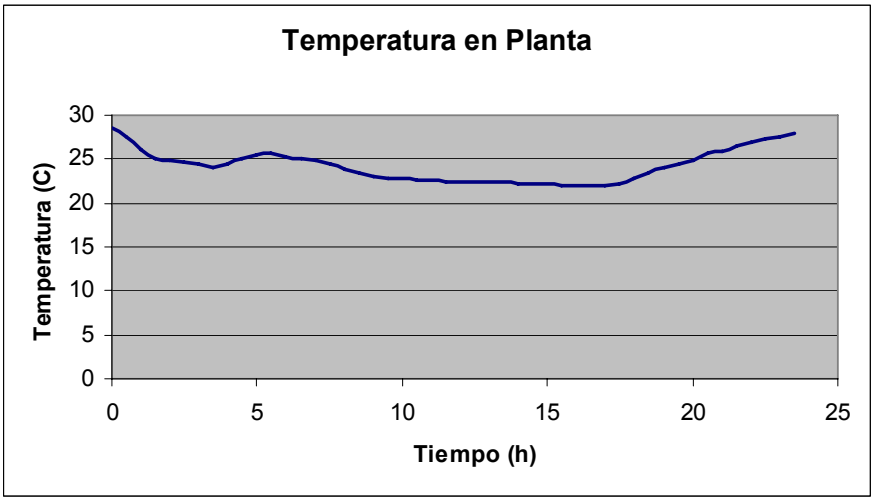


Figura 6.2 Gráfica del desempeño del sistema de aire acondicionado una vez automatizado el sistema apagando el "chiller" a las doce de la noche

Tabla 6.4 Valores de temperatura en la planta una vez el sistema funcionando en forma automática

Temperatura (°C)	Tiempo (h)
28.5	0
26.1	1
24.8	2
24	3.5
25	4.5
25.6	5.5
24.8	7
23.8	8
22.9	9.5
22.6	11
22.3	13.5
22.1	15
22	16
21.9	21
22	23

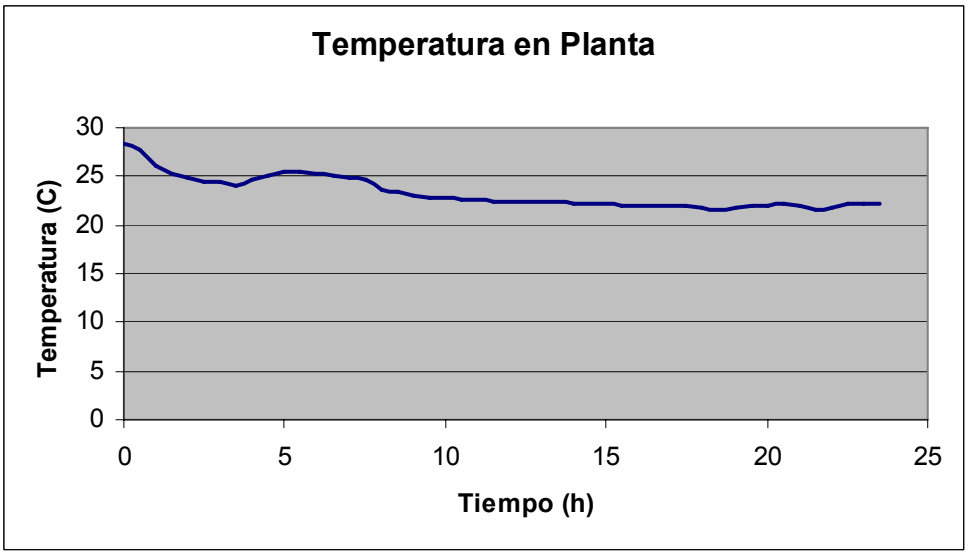


Figura 6.3 Gráfica del desempeño del sistema de aire acondicionado una vez automatizado el sistema

En la figura 6.3, la gráfica está formada por los datos brindados en la tabla 6.4, estos valores son algunos de los más relevantes, ya que la cantidad de mediciones fueron mayores tanto en esta tabla como en la 6.3, la diferencia de ambas mediciones radica en cuanto a que las que se encuentran en la tabla 6.3 fueron tomadas apagando el “chiller” a las doce de la noche, mientras que las de la tabla 6.4, fueron tomadas con todo el sistema funcionando en forma continua.

Más resultados interesantes se muestran en la tabla 6.5, aquí cómo varía la temperatura conforme pasa el tiempo y cambia la frecuencia de la bomba para enviar agua a las unidades centrales de aire; todas estas variaciones se dan como respuesta a un escalón, o sea, teniendo el sistema deshabilitado y luego habilitándolo en forma repentina.

Tabla 6.5 Valores de temperatura en la planta según la hora del día y la frecuencia con la que trabaja la bomba

Hora del día	Temperatura (°C)	Frecuencia enviada a bomba (Hz)
7:03 a.m.	31.6	59.97
9.05 a.m.	27.8	59.98
10:01 a.m.	26.1	59.9
11:00 a.m.	24.7	59.85
12:02 p.m.	24.5	59.88
12:33 p.m.	24.4	59.15
1:05 p.m.	24.5	59.25
1:32 p.m.	24.6	59.35
2:06 p.m.	23.4	59.02
3:01 p.m.	23.2	57.23
4:02 p.m.	22.9	57.05
5:04 p.m.	22.8	54.17
6:06 p.m.	22	47.56
7:03 p.m.	22.1	38.65
8:05 p.m.	22	22.55
10:05 p.m.	22	23.59
11:04 p.m.	21.9	24.45
12:01 a.m.	21.9	24.89
1:33 a.m.	21.8	13.13
2:34 a.m.	22	26.31
4:01 a.m.	21.9	20.5
5:35 a.m.	22.1	29.87

Tabla 6.6 Valores de temperatura en la planta según la hora del día y la posición de las válvulas de tres vías en la nave 108 con un punto de referencia de 24°C

Hora del día	Temperatura (°C)	Posición de válvulas
7:03 a.m.	31.4	Encendido
9.05 a.m.	27.6	Encendido
10:01 a.m.	26	Encendido
11:00 a.m.	24.5	Encendido
12:02 p.m.	24.5	Encendido
12:33 p.m.	24.4	Encendido
1:05 p.m.	24.5	Encendido
2:32 p.m.	24.8	Encendido
3:06 p.m.	23.5	Encendido
4:01 p.m.	22.2	Encendido
5:02 p.m.	21.9	Apagado
6:04 p.m.	22.8	Apagado
7:06 p.m.	23	Apagado
8:03 p.m.	24.1	Apagado
9:05 p.m.	25	Apagado
11:05 p.m.	26	Apagado
12:04 a.m.	23.9	Encendido
1:01 a.m.	21.8	Apagado
2:33 a.m.	22.8	Apagado
3:34 a.m.	24	Apagado
5:01 a.m.	25.9	Apagado
6:35 a.m.	24.1	Encendido

6. 2 Análisis

La gráfica que aparece en la figura 6.1 representa el modelo del nivel de temperatura que se desarrolla en la planta con el paso del tiempo suponiendo que se enciende a la hora cero y se deshabilita 17 horas después. Este comportamiento es el que en realidad seguía la planta antes de automatizar el sistema, se deshabilitaba el "chiller" cuando el nivel de temperatura exterior a la planta era el más bajo, este hecho interactuaba con el nivel de cargas térmicas internas para aumentar el nivel de la temperatura hasta 28.4°C aproximadamente.

En caso de no deshabilitar al sistema luego de 17 horas de mantenerse en uso, los niveles de temperatura bajaron a una magnitud cercana a los 15° C, lo cual es un nivel incómodo para cualquier tipo de labor. De aquí la decisión de que el sistema siempre estuviera habilitado con la posibilidad de mantener el nivel de temperatura constante. En la tabla 6.2 se puede apreciar que el nivel externo de la temperatura influye directamente sobre el nivel de cargas térmicas a nivel interno, de aquí que el sistema se deshabilite después de 17 horas continuas de estar funcionando, hora que equivalía a las 12 de la noche, mientras su habilitación equivalía a las 7 a.m.

Los valores expuestos en la tabla 6.2 muestran el nivel de temperatura externo a la planta, el cual influye directamente sobre el nivel de temperatura interno, esto indica que las cargas térmicas de la planta son casi constantes y la temperatura interna es proporcional a los cambios en el exterior, específicamente a la radiación solar, estos valores ayudaron a determinar que la influencia y el comportamiento podía ser predecible y de aquí la justificación del regulador predecible en el tiempo. El nivel exterior de temperatura se eleva mayormente a las horas cercanas a cuando el país se encuentra en el meridiano, en contraparte, disminuye por las horas de la noche y madrugada.

El nivel de temperatura alcanzado en la planta una vez en funcionamiento el sistema, se aprecia en la tabla 6.3 y la gráfica de la figura 6.2, la temperatura en la planta se regula en forma considerable, el nivel alcanzado en las horas cercanas al medio día, es relativamente elevado, pero no es debido a una falla, sino que el sistema a esa hora estaba corriendo casi a plena carga con respecto a su capacidad, pero aún así, no se anuló en forma adecuada el nivel de cargas térmicas, en la que respecta a las horas de la tarde y noche sí se reguló bien el nivel de temperatura, pero como a media noche se apagó el “chiller”, no hubo un enfriamiento del agua que circulaba por el sistema, lo cual causó un evidente aumento en el nivel de las cargas térmicas a pesar de ser las horas en las que se encuentra a más baja temperatura a nivel externo.

Los datos de la tabla 6.4 y la gráfica de la figura 6.3, reflejan prácticamente la misma situación que la tabla 6.3 y la figura 6.2, la única variante aparte de décimas de diferencia en cuanto a los datos, es que el “chiller” no fue deshabilitado a las doce de la noche, lo rescatable de estos resultados es que el regulador funcionó adecuadamente a pesar que el nivel de temperatura externo de la planta decayera en horas de la madrugada. También se muestra el desempeño de la retroalimentación, la misma se nota debido a las oscilaciones de más en el sistema, las cuales son casi imperceptibles, pero con los cambios “abruptos” en el nivel de temperatura se nota. Estos cambios a pesar de ser muy pequeños, para el regulador son significantes.

La tabla 6.5 muestra la dependencia que tiene la temperatura tanto para la hora del día en que se encuentra el sistema en funcionamiento como para la frecuencia de entrada a la bomba que envía agua al sistema. La perturbación al sistema se da principalmente por la radiación solar, esta situación implica varios cambios de temperatura en todo el día, los cuales se intentan cancelar con cambios en la magnitud de la frecuencia a la que trabaja la bomba. Como se aprecia en la tabla 6.5, durante la madrugada la bomba envía poco flujo de agua al sistema, precisamente por las condiciones de temperatura exterior.

La tabla 6.6 muestra los datos obtenidos con el sistema funcionando con válvulas de tres vías, esta solución únicamente admite que el sistema esté funcionando en su totalidad o esté deshabilitado. Se puede apreciar que si se le da un punto de referencia de 24°C, el sistema permanece habilitado hasta que su nivel de temperatura baje de los 22°C y permanece apagado hasta que suba de los 26°C. Lo cual viene a reforzar la solución con válvulas de tres vías, en donde el sistema funciona dentro de un rango en el cual se da un punto de referencia $\pm$ 2°C tal y como se esperaba.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1 Con el sistema de aire acondicionado funcionando en forma automática, no es necesaria la deshabilitación del “chiller”.

2 Los variadores de frecuencia son los dispositivos utilizados por excelencia para regular la velocidad en motores industriales.

3 La mayor influencia sobre el nivel de cargas térmicas en la planta es debido al nivel de temperatura externa.

4 En un sistema en donde se deba transportar una señal analógica de corriente a larga distancia, existen pérdidas de la misma debido a la resistencia del conductor.

5 Un controlador industrial (PLC) maneja una amplia cantidad de entradas y salidas de un sistema así como su respectiva regulación.

6 A mayor cantidad de temperatura en la planta, fluye mayor cantidad de agua por las tuberías del sistema de aire acondicionado.

7 Las perturbaciones al sistema se pueden anular prediciendo el momento en que se darán.

8 Una válvula de tres vías apagada equivale a no enfriar el aire que circula por una unidad central.

9 Deshabilitar el “chiller” durante las horas de la madrugada, genera tensión térmica en los empleados que laboran durante ese turno.

10 El modelado práctico de una planta a nivel industrial no es preciso.

7.2 Recomendaciones

1 En caso de haber una falla de energía, revisar la interfase del variador de frecuencia directamente.

2 En caso de fallar alguno de los sensores de temperatura o transmisores de corriente, colocar el sistema de aire acondicionado a funcionar en forma manual.

3 En caso de fallar una de las dos bombas de suministro de agua helada, colocar el sistema en forma manual y dejar sólo una habilitada para todo el sistema.

4 Cuando el sistema esté funcionando con válvulas de tres vías, no colocarle un punto de referencia muy bajo porque el sistema no apagaría las válvulas de tres vías.

5 Cuando el sistema esté funcionando con válvulas de tres vías, no colocarle un punto de referencia muy alto porque el sistema no encendería las válvulas de tres vías y conllevaría a una temperatura muy elevada la planta (punto de referencia + 2°C).

6 En caso de problemas en el “chiller” debido a que el agua de retorno esté a una temperatura casi de 1°C, forzar las válvulas de tres vías para que estén encendidas en forma permanente.

Bibliografía

1. Bryan William, Handbook of Fundamentals. 2ª ed, New York: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, INC. 1974.

2. Cabrera, Marlon; Hernández, Jorge. Ahorro de Energía y Agua en la Industria Hotelera, Sistemas HVAC [en línea]. Alliance To Save Energy, < http://www.ase.org/uploaded_files/eeip/HVAC.pdf > [Consultada: 17 agosto 2005].
   En esta página se encuentra información acerca del ahorro de energía en edificios, plantas y empresas.

3. Climatización y eficiencia energética [en línea] Caloryfrío.com el punto de encuentro, 2004.<http://www.caloryfrio.com/ GestorConocimiento/consultec/aireacondicionado> [Consultada: 19 agosto 2005].
   Esta página describe y explica los conceptos de calor, frío, transferencia térmica y temperatura entre otros.

4. Consejo colombiano de seguridad [en línea] Cisred, 2004. <http://www.cisred.com/> [Consultada: 10 octubre 2005].
   Esta página posee gran cantidad de archivos concernientes a la seguridad integral, salud ocupacional y protección ambiental.

5. Cómo citar recursos electrónicos [en línea] Universidad de Barcelona, 1997. <http://www.ub.es/biblio/citae-e.htm#refe> [Consultada: 17 agosto 2005].
   Aquí se encuentra información acerca de cómo hacer citas bibliográficas de toda clase bajo un determinado estándar.

6. El calor [en línea] Termodinámica – APF216A, 2000 - 2005. <http://www.fisicanet.com.ar> [Consultada: 18 agosto 2005].
En esta página se encuentra una amplia cantidad de información acerca de varios conceptos de física aplicables en muchos campos.

7. ESP – PARTS Online [en línea] Bell & Gossett ITT Industries, 2004. <http://fhaspapp.ittind.com/parts/BG--SearchForPartsByPartialDescription.asp?page=33&Whole_Number=SERIES~SP~1510> [Consultada: 7 septiembre 2005].
En esta página se encuentra diferente literatura e información con respecto al fabricante Bell & Gossett y sus productos industriales.

8. Estrucplan on line [en línea] Producciones, 2005. <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=166> [Consultada: 7 octubre 2005].
Página que trata información de prevención de accidentes en el trabajo.

9. Fundamentos de termodinámica [en línea] Universidad Autónoma de Madrid, 2004. <http://joule.qfa.uam.es> [Consultada: 8 agosto 2005].
En esta página se hace referencia a los contenidos de varios cursos que se imparten en la Universidad Autónoma de Madrid.

10. Gutiérrez T., Maribel; Calvo V., Nidia. Normas de presentación de los informes de prácticas de especialidad, tesis, seminarios y otros del ITCR en formato digital, junio 2000 [en línea]. I.T.C.R. < http://www.itcr.ac.cr/biblioteca/servicios/tutoriales_linea/normas_presentacion.htm> [Consultada: 7 septiembre 2005].
En esta página se encuentra la guía y las normas para presentar tesis en formato digital a la biblioteca del ITCR.

11. Hernández C., Vicente, diciembre 2002 [en línea]. UPC. <http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0109103-155648/ > [Consultada: 7 octubre 2005].
Esta página tiene un trabajo de tesis acerca de construcciones arquitectónicas de la universidad UPC.

12. Industrial AC Drives 1/8 thru 1750 Horse power [en línea]. Yaskawa, 2004<http://www.yaskawa.com/site/products.nsf/productGroup/ACDrives.html> [Consultada: 7 septiembre 2005].
Página de Yaskawa Electric Corporation en donde se pueden encontrar diferentes productos del fabriante Yaskawa así como sus características técnicas.

13. Interiano, Eduardo. Control Automático, febrero 2006 [en línea]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, < http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/ > [Consultada: 10 febrero 2006].
Información con respecto al curso de control automático que se imparte en la escuela de Ingeniería en eléctrónica del I.T.C.R. por el profesor Eduardo Interiano.

14. Introducción a la Teoría de Transferencia de Calor [en línea] Valencia: Thermoequipos C.A. Tecnología de Avanzada, 2004. <http://thermoequipos.com.ve/mostrar_art.php?IdArt=3> [Consultada: 24 agosto 2005].
Aquí hay gran cantidad de información acerca de los conceptos de termodinámica y equipos que se relacionan con el mismo tema.

15. Kuo, Benjamín C. Sistemas de control automático. 7 ed. México: Pearson Educación, 1996.

16. La Salud y la Seguridad en el Trabajo, Ergonomía [en línea] Organización Internacional del Trabajo, 1997. < http://training.itcilo.it/actrav_cdrom2/es/osh/ergo/ergoa.htm> [Consultada: 8 agosto 2005].
Esta página muestra información sobre medidas de seguridad en el trabajo y muchos otros aspectos que atañen a la seguridad laboral.

17. Literature library [en línea]. Rockwell Automation. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/public/documents/webassets/browse_category.hcst [Consultada: 10 enero 2006].
La página citada contiene información de dispositivos Allen Bradley de Rockwell Automation.

18. Mahía, Ramón, junio, 1998 [en línea] Formulación y solución de ecuaciones lineales en diferencias con coeficientes constantes en el contexto del análisis de series temporales. < http://www.uam.es/personal_pdi/economicas/rmc/doctorado/DIFERENCIAS.PDF > [Consultada: 8 octubre 2005].
Esta página forma parte de una tesis doctoral enmarcada en el área del análisis de cointegración de Ramón Mahía y dirigida por D. José Vicéns Otero en la Universidad Autónoma de Madrid.

19. McQuiston, Faye; Parker, Jerald; Spitler, Jeffrey. Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Análisis y diseño. México: Editorial Limusa, 2003.

20. Medición de temperatura [en línea]. Google, < http://72.14.203.104/search?q=cache:Km-NHkwJ-r8J:www.aei3.com/p/fondoeditorialytematico/articles > [Consultada: 6 enero 2006].
Dirección en la cual se encuentra información de temperatura y mediciones de la misma.

21. Mery, Domingo. Controladores Lógicos Programables, noviembre 1994 [en línea]. Universidad Católica de Chile. <http://www2.ing.puc.cl> [Consultada: 20 agosto 2005].
Esta página muestra información con respecto a diferentes cursos que se imparten en la Universidad Católica de Chile.

22. Online product literature [en línea]. Johnson Controls, < http://cgproducts.johnsoncontrols.com/default.aspx?topframe.aspx&0 > [Consultada: 6 enero 2006].
Página en donde se encuentra información de dispositivos Johnson Controls.

23. Products & Services [en línea]. York Internacional. <http://www.york.com/products/esg/products/YorkEngineeredProducts.asp?cnt_Model_ID=63&Display=23&View=ON&ShowSubsID=63&Model=63> [Consultada: 20 setiembre 2005].
En esta página se ubica toda clase de información respecto a los dispositivos de refrigeración y aire acondicionado de marca York.

24. ScreenCreator user manual [en línea]. Automation Direct. <http://www.automationdirect.com/static/manuals/dppgmsw/dppgmsw.html> [Consultada: 6 enero 2006].
En esta dirección se hayan datos de “hardware” y “software” concernientes a la pantalla de tacto de marca Automation Direct.

25. Vannorsdall, Scott. Engineering Safety Referente Material, junio 2003 [en línea]. K – C Internal. <http://www.kcc.com> [Consultada: 30 agosto 2005].
Está es la página interna en red de la corporación (intranet) y dispone todo tipo de información referente a la corporación a nivel internacional y nacional.

26. Velez, Carlos Mario. Sistemas de control [en línea]. Universidad EAFIT, < http://www.control-systems.net > [Consultada: 22 agosto 2005].

La página citada ofrece información de sistemas de control brindada por la Universidad EAFIT.

Apéndice

A.1 Glosario y abreviaturas

Aire acondicionado: es aquel que ha sido acondicionado para proporcionar confort ambiental.

BCM: Base Cost Modular. Máquina fabricadora de pañales.

BTU: British Termal Unit. Unidad térmica británica. Es la cantidad de calor necesario que se debe sustraer a 1 libra de agua para disminuir su temperatura 1° F. Una BTU es equivalente a 252 calorías.

Caloría: es la cantidad de agua que se le debe añadir a 1 kg de agua a 15° C de temperatura para aumentar esta temperatura en 1°C. Equivale a 4 BTU.

Calor latente: es el calor, que sin afectar a la temperatura, es necesario adicionar o sustraer a una sustancia para el cambio de su estado físico. Específicamente en psicometría, el calor latente de fusión del hielo es hf = 79.72 kcal / kg.

Calor sensible: es el calor empleado en una variación de temperatura, de una sustancia cuando se le comunica o sustrae calor.

"Chiller": equipo refrigerante utilizado para disminuir y mantener la temperatura en sectores industriales.

CMOS: tecnología para la fabricación de transistores y dispositivos electrónicos.

CPU: unidad central de procesamiento de una computadora personal, de un controlador o equipo electrónico.

Entalpía: es la suma del calor sensible y el latente en kilocalorías por kilogramo de una sustancia entre un punto arbitrario de referencia y la temperatura y estado considerado.

Tensión térmica: condiciones ambientales que provocan la insatisfacción en el cuerpo de los seres humanos.

"Hardware": se refiere a todo lo que representa dispositivos electrónicos tangibles, o sea, dispositivos físicos.

Humedad absoluta: es el peso por unidad de volumen de aire, expresada en gramos por metro cúbico de aire.

Humedad específica: es el peso del vapor de agua por unidad de peso de aire seco, expresada en gramos por kilogramo de aire seco.

Humedad relativa: es la relación entre la presión real del vapor de agua contenida en el aire húmedo y la presión del vapor saturado a la misma temperatura. Se mide en tanto por ciento.

Infiltración: Caudal de aire que penetra en el espacio acondicionado desde el exterior a través de las soluciones de continuidad de los cierres.

"JOA": máquina hecha por el fabricante Curt Joa S.A. Máquina fabricadora de pañales.

LED: diodo que activa una señal lumínica cuando está polarizado en forma directa, o sea, cuando conduce corriente.

NEC: código eléctrico nacional (National Electric Code). Código estándar para electricidad en Estados Unidos.

NFPA: agencia nacional de protección contra el fuego (National Fire Protection Agency). Agencia de Estados Unidos para provenir incendios.

OSHA: administración de seguridad y salud ocupacional. (Occupational Safety and Health Administration). Organismo internacional encargado de la seguridad y la salud ocupacional.

PC: computadora personal por sus siglas en inglés (personal computer).

PID: de la teoría de control automático se define como un regulador que tiene parte proporcional, integral y derivativa.

PLC: controlador lógico programable. Módulo electrónico compuesto por dispositivos de estado sólido.

RAM: tipo de memoria volátil, o sea, que requiere de alimentación eléctrica para no perder la información que se encuentra en ésta.

Refrigeración: Proceso de tratamiento del aire que controla, al menos, la temperatura máxima de un local.

Relé: dispositivo electrónico que sirve como interruptor, el cual pasa de abierto a cerrado o viceversa ante la presencia de una señal de activación ya sea baja o alta.

ROM: tipo de memoria no volátil, o sea, que no requiere tener una alimentación eléctrica para retener los datos que se encuentran en la misma.

SAM: material súper absorbente. Gel derivado del petróleo con capacidad de absorber líquido equivalente a 30 veces su peso.

"Software": es referido a todo lo representa programación de dispositivos electrónicos.

Zona de confort: son unas condiciones dadas de temperatura y humedad relativa bajo las que se encuentran confortables la mayor parte de los seres humanos. Estas condiciones oscilan entre los 22°C y los 27°C. (71 – 80°F) de temperatura y del 40 al 60% de humedad relativa.

A.2 Manual de usuario

Al iniciar la utilización del sistema de aire acondicionado, aparecerá el menú principal, el cual le brindará varias opciones de ingreso a subrutinas: “reset”, ajustes, válvulas de tres vías y control de bomba “JOA´s”, historial y alarmas. La figura A.2.1 muestra la vista de la pantalla principal.

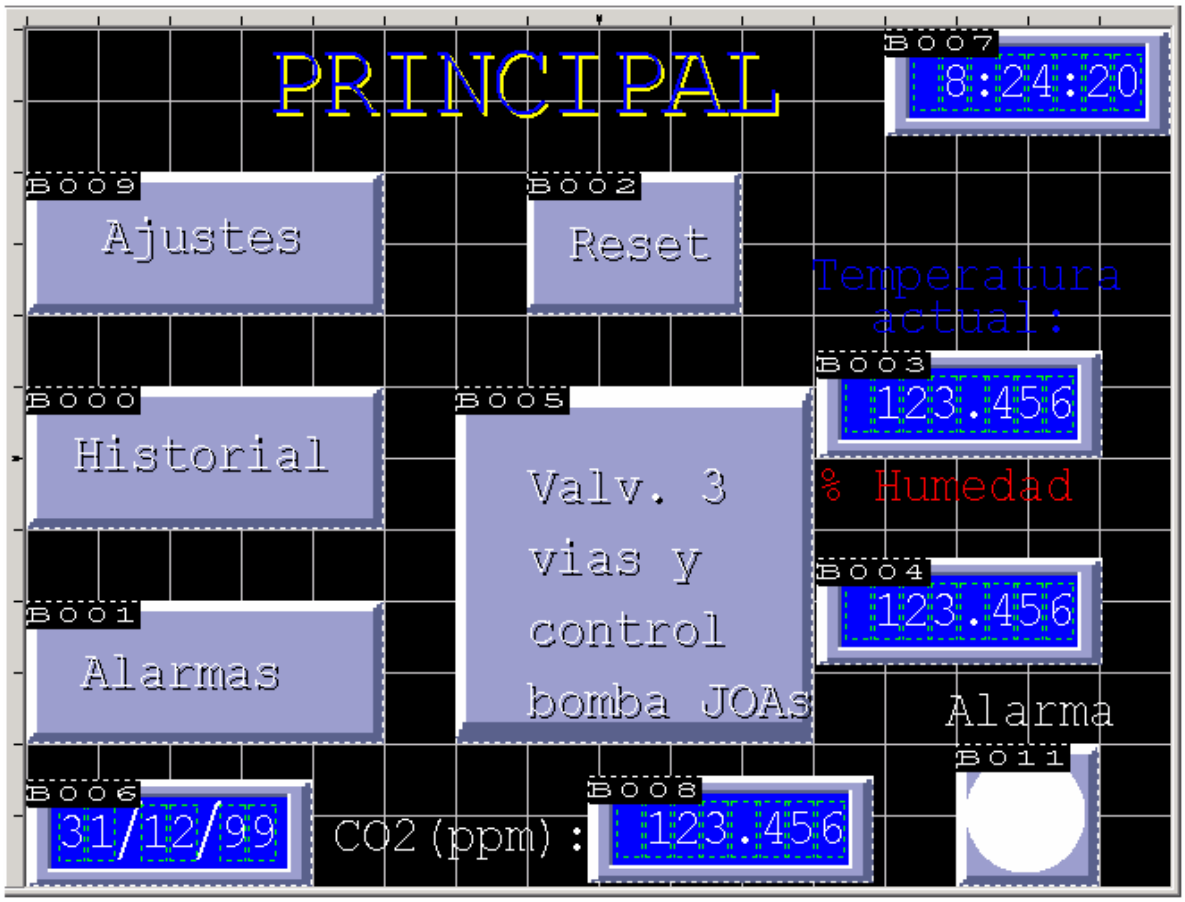


Figura A.2.1 Menú principal de la pantalla de tacto

Al ingresar a la subrutina de válvulas de tres vías y control de bomba “JOA´s”, se encuentra el nivel de temperatura a la cual se halla cada una de las máquinas productoras de pañales. La figura A.2.2 muestra la interfase implementada para observar la magnitud de temperatura por máquina.

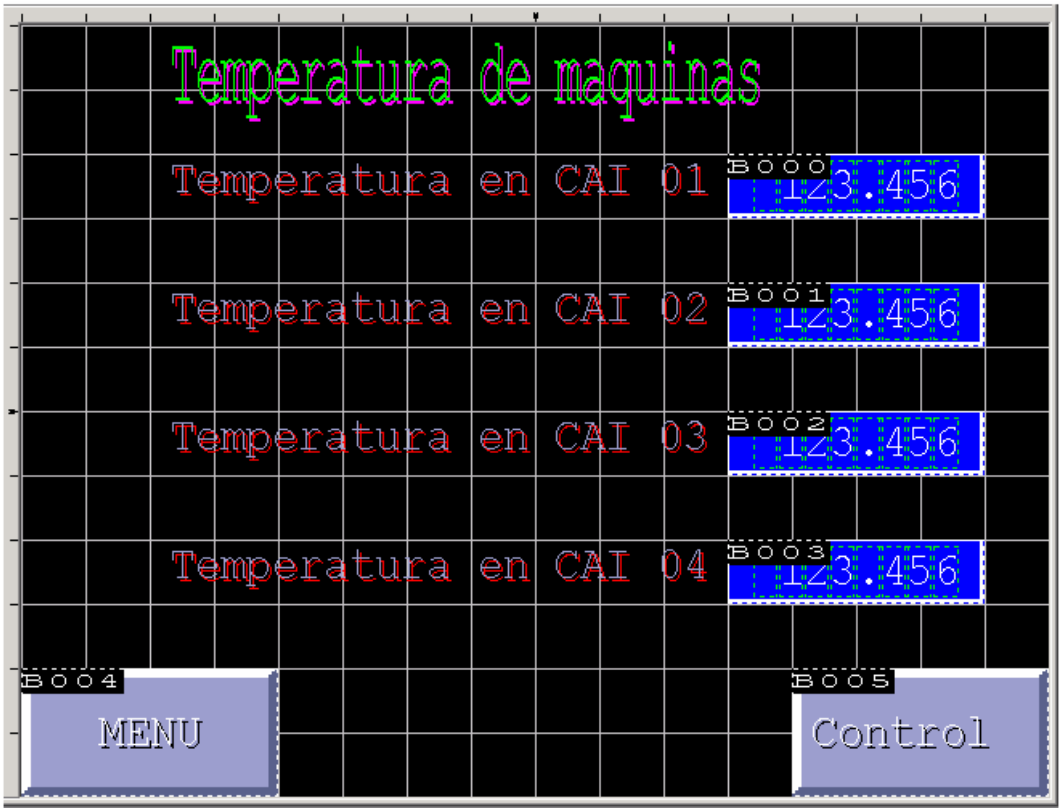


Figura A.2.2 Menú para observar el nivel de temperatura en cada una de las máquinas productoras de pañales

Si se ingresa a “MENU”, se devuelve a la pantalla del menú principal, si se ingresa a “Control”, se estará accediendo a una subrutina para controlar las válvulas de tres vías y la bomba de “JOA´s”, esta sección requiere de permiso para poderse manipular, por consiguiente, el acceso a dicha subrutina requiere de clave especial para su ingreso. La vista de esta pantalla se muestra en la figura A.2.3, si se digita la clave correcta y se oprime el botón “ENT”, se ingresaría a la primera pantalla para controlar las válvulas de tres vías y la bomba de “JOA´s”, por el contrario, si no se digita la contraseña correcta, no se permitirá el acceso a las subrutinas de control. También posee la opción de cancelar la acción en caso de no querer ingresar a estas subrutinas o en caso de no saber la clave de acceso.

En caso de requerir ingresar al control de las válvulas de tres vías y bomba de "JOA´s" y no conozca la clave de acceso, comunicarse con el encargado de facilidades en la empresa para su obtención.

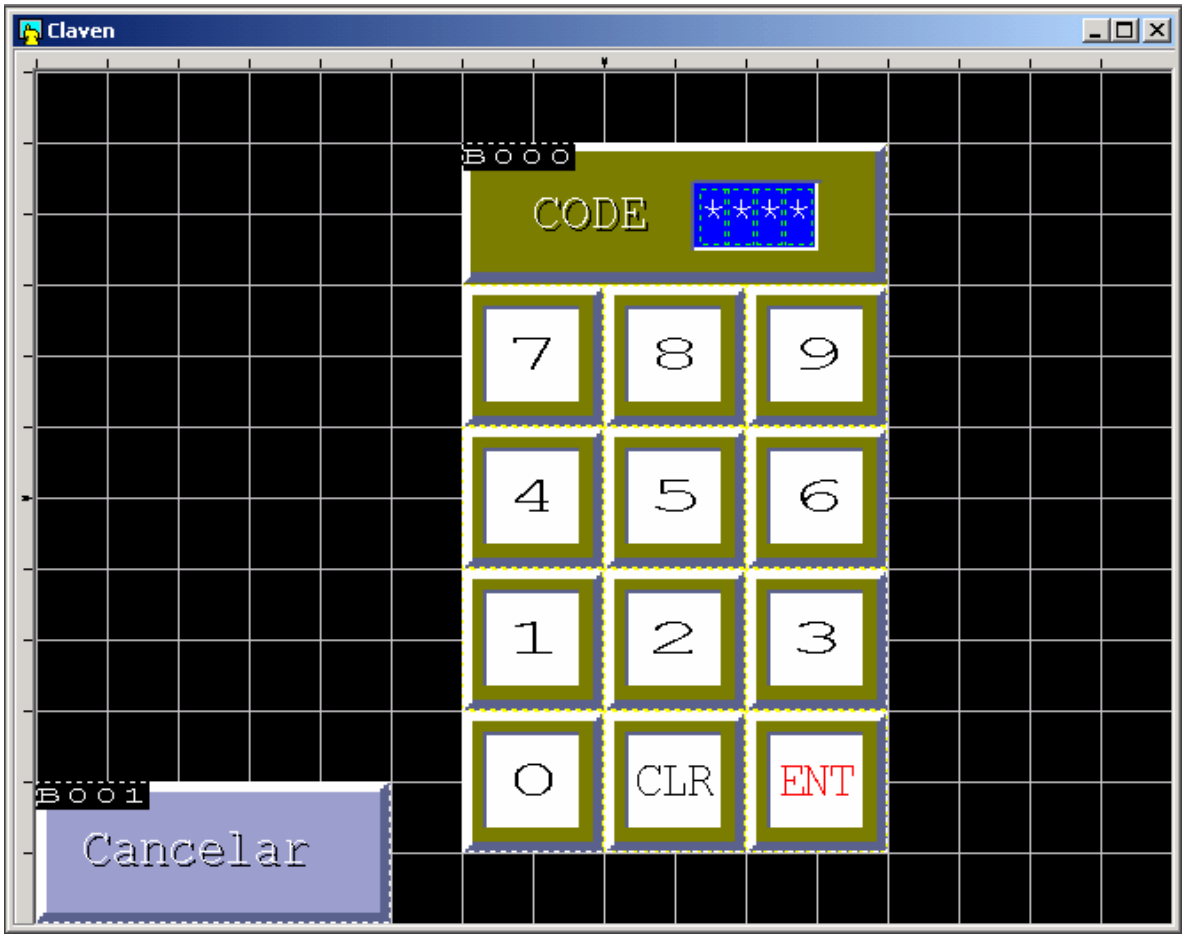


Figura A.2.3 Pantalla de restricción para ingreso a control de válvulas de tres vías y bomba de "JOA´s"

En caso de haber ingresado la clave correcta, aparecería la primera pantalla para el control de las válvulas de tres vías específicamente, la cual brinda la opción de colocarle un punto de referencia a la temperatura de las máquinas productoras de pañales CAI – 01 y CAI – 02. Este punto de referencia se encuentra restringido de los 17°C a los 28°C. La pantalla también presenta la opción de devolverse a la pantalla en que se muestra la temperatura de cada una de las máquinas ("BACK"), regresar al menú principal ("MENU") o avanzar al siguiente control para las válvulas de tres vías ("NEXT").

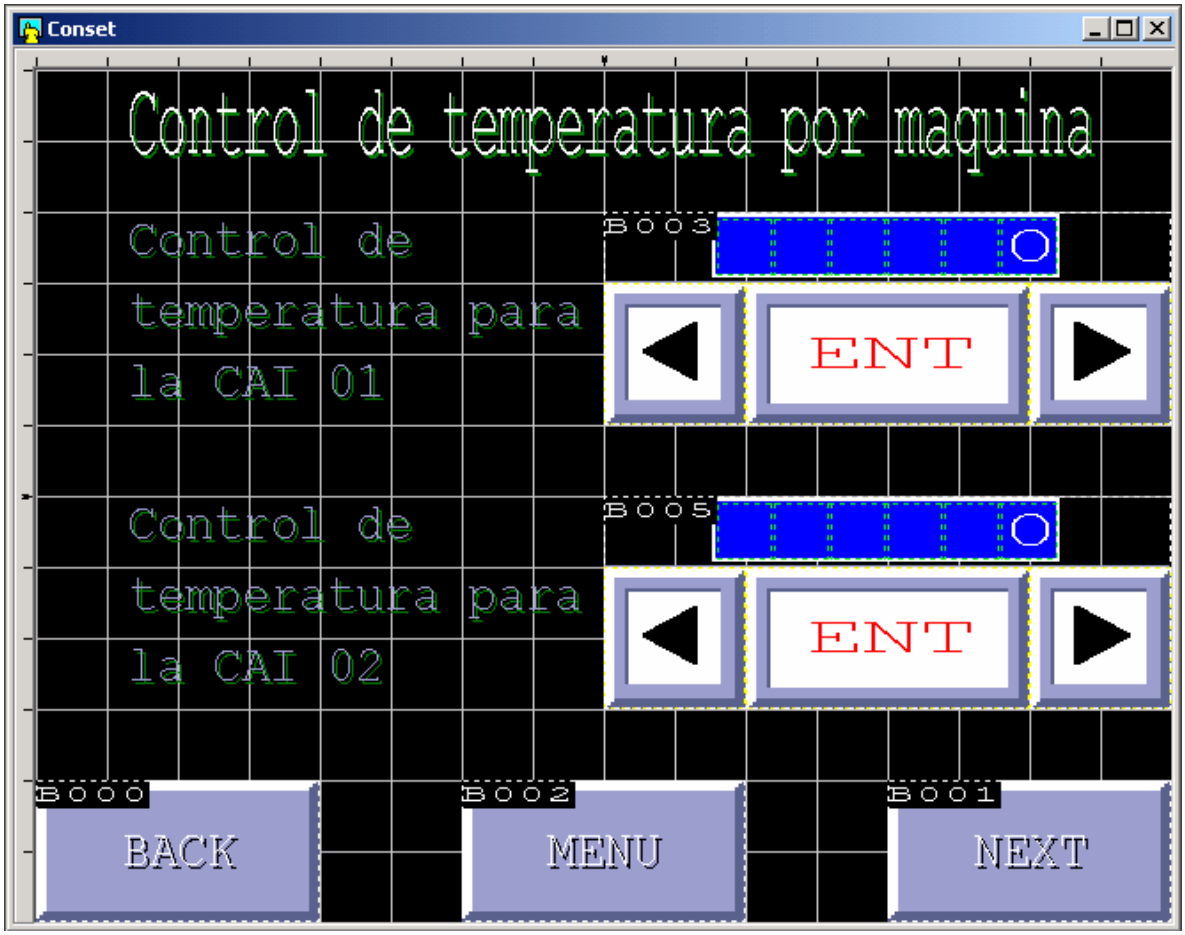


Figura A.2.4 Pantalla para colocarle un punto de referencia al nivel de temperatura en las máquinas CAI – 01 y CAI – 02 utilizando las válvulas de tres vías

En caso de ingresar a la subrutina de “NEXT”, se entraría a una pantalla similar a la de la figura A.2.4, salvo las diferencias presentadas en la figura A.2.5. El botón “BACK” hace que la pantalla de tacto muestre la figura A.2.4, “NEXT” hace que muestre la siguiente pantalla para el control de las válvulas de tres vías. Sin embargo, a partir de esta pantalla se puede ingresar al control de la bomba que envía agua al sistema de tuberías para enfriar la nave 108.

En caso de acceder a la subrutina de control de la bomba, se ingresaría a una pantalla y en caso de dar la opción de “NEXT” se ingresaría a otra, primero se va a mostrar la secuencia de pasos para continuar con el control para las válvulas de tres vías y posteriormente para el control de la bomba de “JOA´s”.

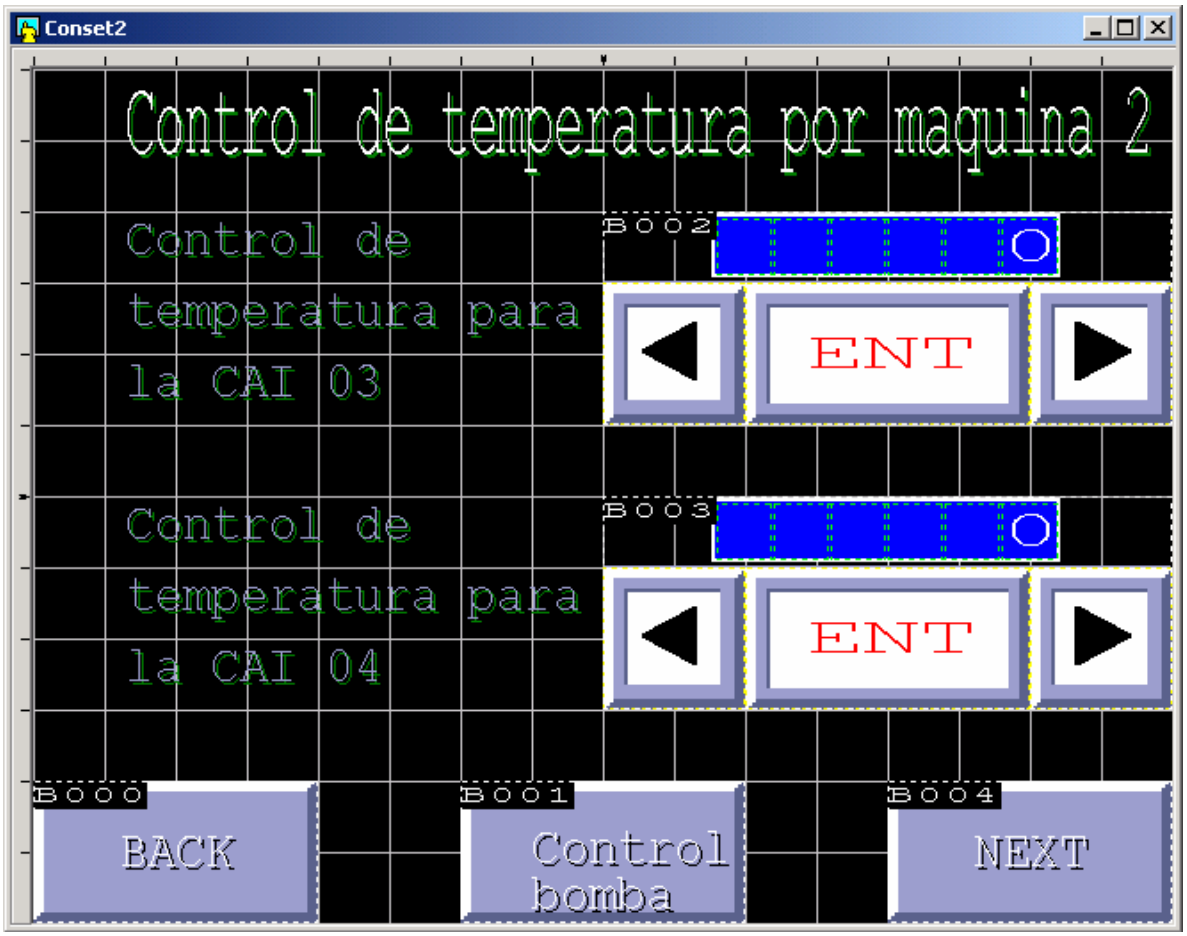


Figura A.2.5 Pantalla para colocarle un punto de referencia al nivel de temperatura en las máquinas CAI – 03 y CAI – 04 utilizando las válvulas de tres vías

La figura A.2.6 muestra la próxima pantalla para control de las válvulas de tres vías (oprimiendo botón “NEXT”); en la misma aparece un interruptor, el cual es condicional respecto a utilizar las válvulas de tres vías en forma manual o automática, en la misma pantalla aparece la opción de devolverse a la que aparece en la figura A.2.5, o manipular las válvulas de tres vías. En la figura A.2.6 hay una nota, en la cual se informa que las válvulas de tres vías sólo se pueden manipular si el interruptor se encuentra en “SI”, de lo contrario, aunque se ingrese a la siguiente función y cambien el estado de las válvulas (de apagado a encendida o viceversa), el efecto no se va a presentar. La próxima pantalla sólo funciona si se tiene el interruptor de la figura A.2.6 en “SI”.

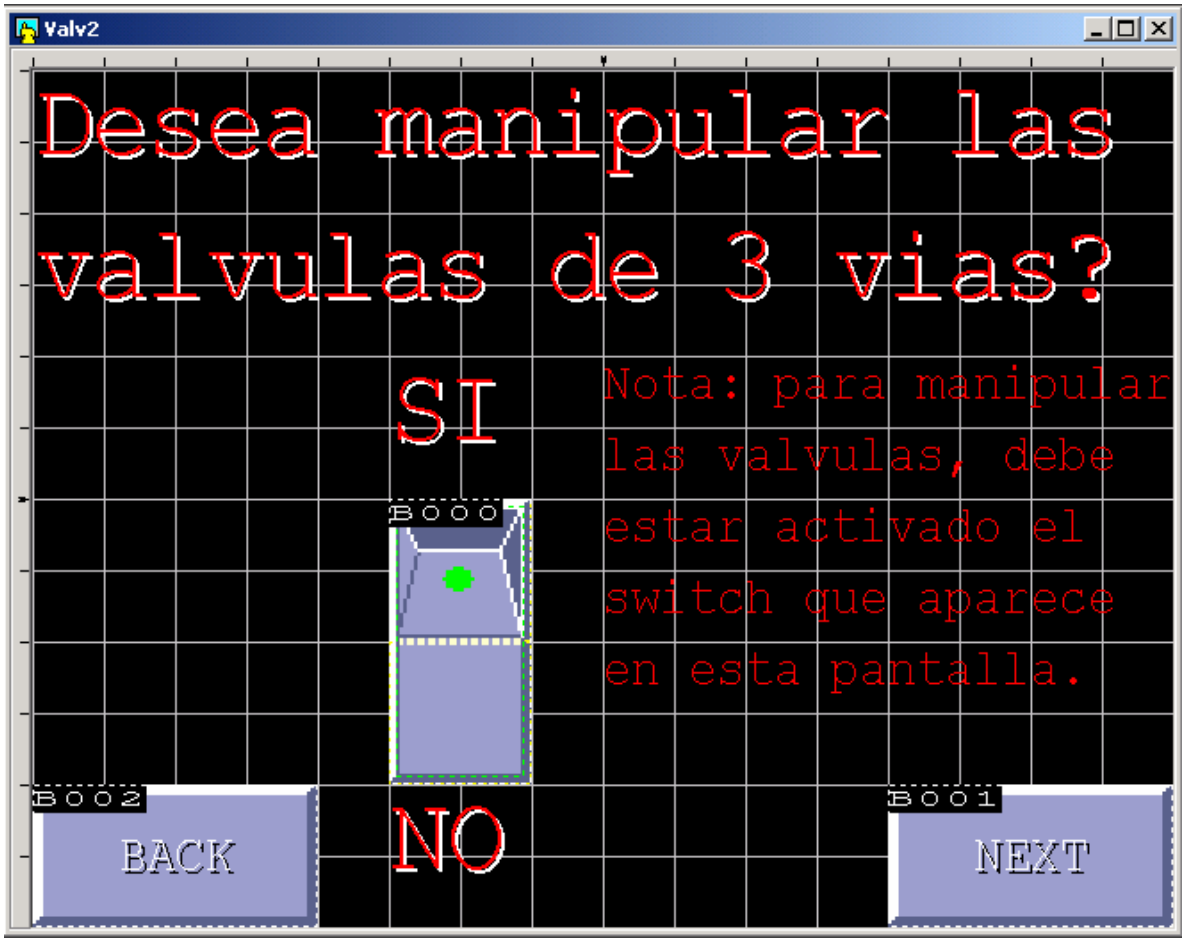


Figura A.2.6 Pantalla para indicar el uso de las válvulas de tres vías (en manual o automático)

En caso de que el interruptor de la figura A.2.6 se encuentre ubicado en “SI”, se pueden manipular las válvulas de tres vías presionando el área donde aparece el botón con la palabra “NEXT”, así se consigue pasar a la última pantalla para control de las válvulas de tres vías, ésta aparece en la figura A.2.7 y además de la opción de colocar las válvulas en encendido o apagado, posee también la elección de regresar a la pantalla anterior a esta (figura A.2.6) o ir al menú principal.

La pantalla mostrada en la figura A.2.7 es para manipular cada una de las cuatro válvulas de tres vías (una por unidad central de aire) e indicar si se desea que se encuentren encendidas o apagadas.

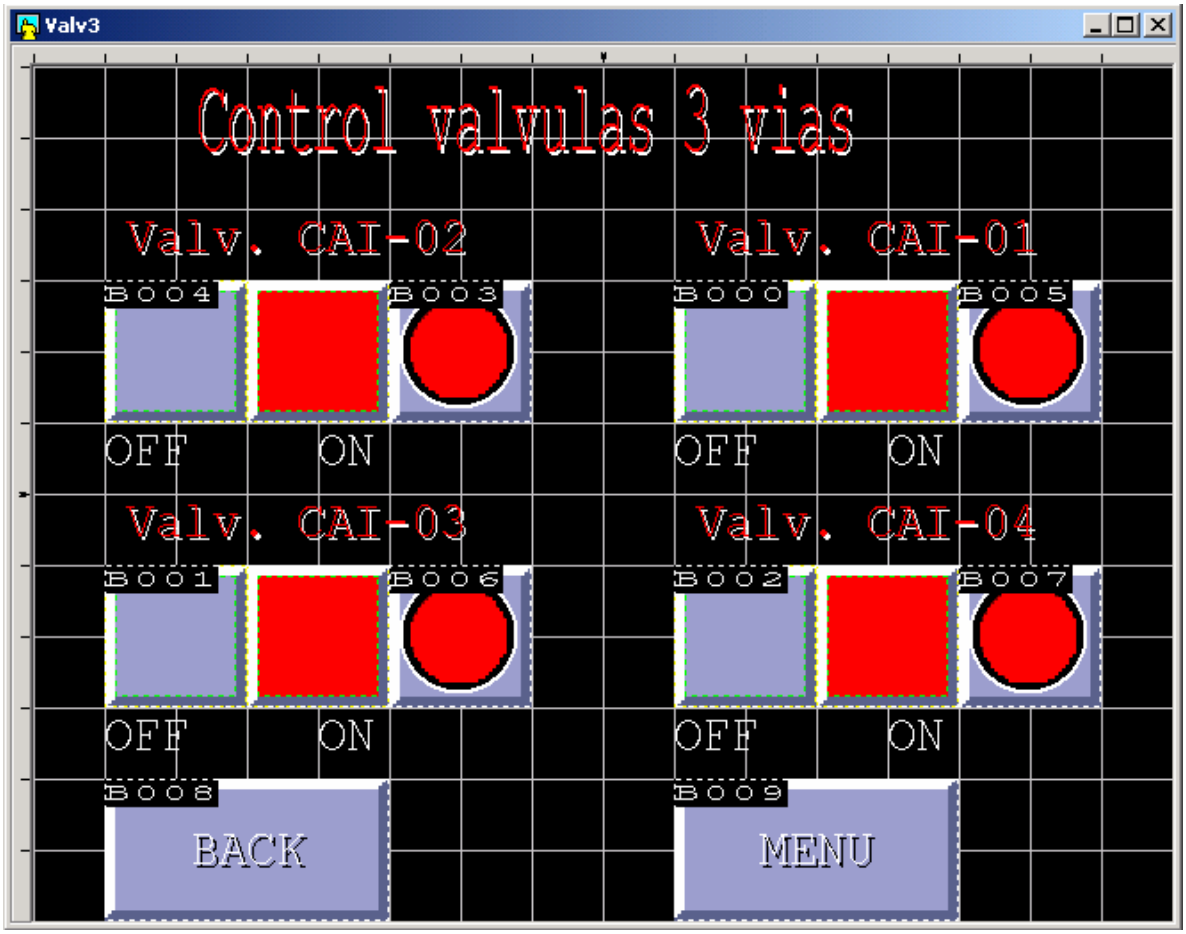


Figura A.2.7 Pantalla para colocar en encendido o apagado cada una de las válvulas de tres vías

Regresando al control del motor, para lograr el acceso al mismo se debe recurrir a la pantalla que aparece en la figura A.2.5 e ingresar a “Control bomba”. Aparecerá la pantalla que se muestra en la figura A.2.8, la cual es para controlar la bomba centrífuga que envía agua fría al sector de la nave 108, la misma sólo posee dos controles, los cuales son si desea que funcione en forma manual o automática, si se desea que funcione en forma manual, tiene un punto de referencia para indicarle a la bomba a qué frecuencia funcionará según el dato suministrado en esta pantalla por el usuario.

La pantalla mostrada en la figura A.2.8 también tiene la opción de regresar a la pantalla de la figura A.2.5 o al menú principal.

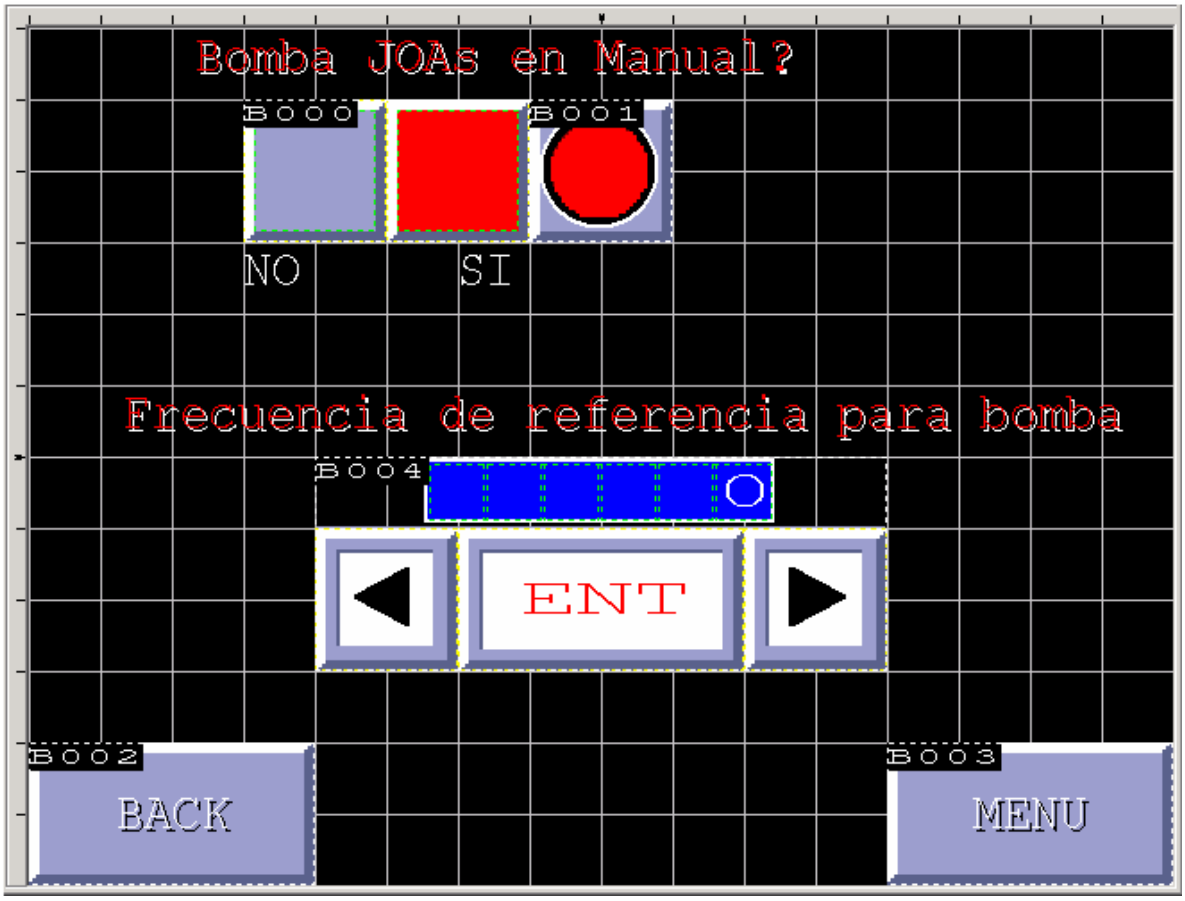


Figura A.2.8 Pantalla para indicar si se desea o no manipular la bomba y ponerle un punto de referencia a la misma en caso de funcionar en forma manual

A.3 Información sobre la empresa

A.3.1 Descripción de la empresa

La empresa Kimberly-Clark Corporation fue fundada en 1872 por John A. Kimberly y Charles B. Clark. El primer producto de la empresa fue papel periódico. En 1928 cambió su nombre de Kimberly-Clark & Company al que ostenta actualmente, Kimberly-Clark Corporation. En la década de 1950, comenzó sus operaciones en el Reino Unido, México, y Alemania. En la década de los años 60´s continuó su expansión con 17 nuevas plantas. Hoy Kimberly-Clark tiene operaciones en más de 40 países.

La meta de Kimberly-Clark Corporation es llegar a ser reconocida como una de las cinco mejores empresas del mundo en cuanto a personal capacitado, productos y generación de ganancias a los accionistas. En 1980, Kimberly-Clark inició en Costa Rica como una distribuidora de sus productos, traídos principalmente de El Salvador y Honduras. Es en 1989 que Kimberly-Clark Costa Rica (KCCR) se traslada al Parque Industrial de Cartago. Ahí inicia sus operaciones manufactureras de pañales desechables.

Actualmente, la empresa no solo se dedica a la producción de pañales desechables, sino que también fabrica productos como papel higiénico, toallas de papel, servilletas y toallas sanitarias.

La gerencia de la planta de KCCR en Cartago se encuentra regida por el Señor Juan Agüero Arroyo. En el nivel jerárquico, continúan los departamentos de Compras, Calidad, y Producción de Pañales. En el mismo nivel se encuentran las Gerencias de Mantenimiento, Ingeniería de Proyectos y Operaciones de Área de Toallas. Además de las bodegas de Producto Terminado. y Materias Primas.

A.3.2 Descripción del departamento en el que se realizó el proyecto

El departamento de ingeniería de la empresa, principalmente realiza proyectos dentro de la planta para suplir las necesidades internas de los diferentes departamentos dentro de Kimberly – Clark. Asimismo, el departamento resuelve los eventuales problemas que se le puedan presentar a los departamentos de calidad, producción, desarrollo y mantenimiento mediante la realización de proyectos interdisciplinarios, así como las respectivas labores de mantenimiento.

El encargado de esta área (jefe de ingeniería) es el Ing. Guido Montero.

A.3.3 Antecedentes prácticos

El primer antecedente que se conoce para intentar solucionar el problema de la temperatura interna en la planta, fue la colocación por vez primera del "chiller", las torres de enfriamiento y las unidades centrales de aire, lo cual vino a solucionar el inconveniente de la temperatura, sólo en el sector de la BCM (también conocida como CAI 04); también se implementó el control de la humedad en este sector, sin embargo, para poder lograr este control se necesitaba la presencia de aire caliente, el cual sólo lo podían suministrar las calderas, las cuales, a pesar de estar instaladas, no contaban con los permisos para su puesta en marcha (ver plano físico del sistema de tuberías para los diferentes lazos de agua en figura 3.1). Esto hace que el sistema, aunque tenga la posibilidad de controlar humedad, no lo utilice, esto sólo lo hace útil para acondicionar el aire. Por medio de una serie de sensores que regulan el paso del flujo de agua y temperatura de la nave entre otros.

El nombre de este último proyecto es: "Automatización del Sistema de Aires Acondicionados de la nave 107 para Kimberly – Clark Cartago: Control de Arranque y Fallas de las Bombas e Interfase Hombre - Máquina", fue ejecutado por Carlos Enrique Vargas Cordero y Róger A. Arroyo Araya en el segundo semestre del año 2003, fue asesorado por Ing. Luis Paulino Méndez del Instituto Tecnológico de Costa Rica e Ing. Gerardo León Quintero de Kimberly-Clark Cartago.

En esa ocasión, se desarrolló el “software” necesario para automatizar el sistema de aire acondicionado de la nave 107 de la planta. Se diseñó la etapa de conexión entre los motores del sistema y el controlador (PLC) escogido en esa ocasión por ellos, tanto para el arranque como para el control de fallas; se implementó una rutina para el arranque y detección de fallas de las torres de enfriamiento, también se implementó el compensador digital para el control de velocidad de la bomba de agua fría. Se realizaron los diagramas de las conexiones del PLC con cada uno de los dispositivos utilizados en el proyecto. Se implementó un compensador digital para el control de velocidad de la bomba de agua caliente, a la vez que también se calcularon las cargas térmicas para la nave 107. Cuenta con un solo ducto para el suministro de aire acondicionado a la nave, el cual es un sistema multizonal (ver plano físico de ductos de la nave 107 en figura 3.5).

Este proyecto en la actualidad no funciona adecuadamente respecto a lo previsto, porque el control automático de las bombas presentó muchas fallas luego de su implementación, mientras que tampoco se pudo utilizar la bomba de agua caliente debido a la falta de permisos para colocar en funcionamiento a las calderas. El sistema en la actualidad funciona en forma manual.

Este último proyecto se hizo pensando en requisitos mínimos para mantener las condiciones de temperatura y humedad relativa, el sistema permitió el arranque manual y automático de todos los dispositivos involucrados en la regulación climática de la nave; en la automatización se utilizó un PLC SLC500 de Allen Bradley. En el proyecto se implementó un regulador PI para el control de velocidad de las bombas. Ante esta modificación, el sistema de aire acondicionado quedó de la forma que se muestra en la figura 3.1, la cual corresponde a esta primera implementación para solucionar el problema, que se llevó a cabo en la nave 107 de la planta en el sector de pañales.

A.4 Hoja de información del proyecto

Información del estudiante:

Nombre: Mauricio Alvarado Bolaños

Cédula: 2 – 528 – 844 **Carné ITCR:** 9921795

Dirección de su residencia en época lectiva: 100 metros este, 150 sur y 50 oeste la Universidad Florencio del Castillo, Cartago.

Dirección de su residencia en época no lectiva: 100 metros este de la Escuela de Zaragoza de Palmares, Alajuela.

Teléfono en época lectiva: 306 – 9356 **Teléfono época no lectiva:** 453 – 2346

Email: cartelerillo@yahoo.com.mx

Información del proyecto:

Nombre del Proyecto: Diseño e implementación de la automatización de un sistema de aire acondicionado.

Area del Proyecto: Automatización Industrial.

Información de la empresa:

Nombre: Kimberly - Clark Corporation.

Zona: Cartago, El Guarco, Parque Industrial.

Dirección: Parque Industrial de Cartago, carretera a Pérez Zeledón.

Teléfono: 590 - 0900

Fax: 573-7425

Actividad Principal: Fabricación de productos de protección personal.

Información del encargado en la empresa:

Nombre: Guido Montero.

Puesto que ocupa: Jefe de Ingeniería.

Departamento: Proyectos / Ingeniería.

Profesión: Ingeniero en Electrónica.

Grado académico: Bachillerato Universitario.

Teléfono: 590 - 0915

Email: guido.montero@kcc.com

Información del asesor en la empresa:

Nombre: Mauricio Muñoz Arias

Puesto que ocupa: Ingeniero en Electrónica de planta.

Departamento: Producción.

Profesión: Ingeniero en Electrónica

Grado académico: Licenciatura

Teléfono: 590 - 0994

Email: mauricio.a.munoz@kcc.com

A. 5 Tablas generales para cálculos de carga térmica en la nave 108 de la planta

Tabla A.5.1 Tasas máximas recomendadas de infiltración para diseño a través de ventanas y puertas exteriores [1]

Componente	Tasa de infiltración
Ventanas	0.75 CFM/ft de fisura
Puertas	1.0 CFM/ft de fisura

Tabla A.5.2 Diferencias de conducción de carga de enfriamiento a través de un vidrio [1]

Hora	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
CLTDF	0	-2	-2	0	4	9	13	14	12	8	4	2

Tabla A.5.3 Diferencias de temperaturas para cargas de enfriamiento (DTCE) para calcular cargas debidas a techos planos, 1°F [1]

Techo No.	Descripción de la construcción	Hora Peso, lb/ft²	Valor de U, BTU/h Ft²·°F	Hora solar, h 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
				Sin cielo raso suspendido																							
1.	Lámina de metal con aislamiento de 1 o 2 in	7 (8)	0.213 (0.124)	1	−2	−3	−3	−5	−3	6	19	34	49	61	71	78	79	77	70	59	45	30	18	12	8	5	3
2.	Madera de 1 in con aislamiento de 1 in	8	0.170	6	3	0	−1	−3	−3	−2	4	14	27	39	52	62	70	74	74	70	62	51	38	28	20	14	9
3.	Concreto ligero de 4 in	18	0.213	9	5	2	0	−2	−3	−3	1	9	20	32	44	55	64	70	73	71	66	57	45	34	25	18	13
4.	Concreto pesado de 1a 2 in con aislamiento de 2 in	29	0.206 (0.122)	12	8	5	3	0	−1	−1	3	11	20	30	41	51	59	65	66	66	62	54	45	36	29	22	17
5.	Madera de 1 in con aislamiento de 2 in	19	0.109	3	0	−3	−4	−5	−7	−6	−3	5	16	27	39	49	57	63	64	62	57	48	37	26	18	11	7
6.	Concreto ligero de 8 in	24	0.158	22	17	13	9	6	3	1	1	3	7	15	23	33	43	51	58	62	64	62	57	50	42	35	28
7.	Madera de 2.5 in con con aislamiento de 1 in	13	0.130	29	24	20	16	13	10	7	6	6	9	13	20	27	34	42	48	53	55	56	54	49	44	39	34
8.	Concreto ligero de 8 in	31	0.126	35	30	26	22	18	14	11	9	7	7	9	13	19	25	33	39	46	50	53	54	53	49	45	40
9.	Concreto pesado de 4 in con aislamiento de 1 o 2 in	52 (52)	0.200 (0.120)	25	22	18	15	12	9	8	8	10	14	20	26	33	40	46	50	53	53	52	48	43	38	34	30
10.	Madera de 2.5 in con aislamiento de 2 in	13	0.093	30	26	23	19	16	13	10	9	8	9	13	17	23	29	36	41	46	49	51	50	47	43	39	35
11.	Sistema de terrazas de techo	75	0.106	34	31	28	25	22	19	16	14	13	13	15	18	22	26	31	36	40	44	45	46	45	43	40	37
12.	Concreto pesado de 8 in con aislamiento de 1 o 2 in	75 (75)	0.192 (0.117)	31	28	25	22	20	17	15	14	14	16	18	22	26	31	36	40	43	45	45	44	42	40	37	34
13.	Madera de 4 in con aislamiento de 1 o 2 in	17 (18)	0.106 (0.078)	38	36	33	30	28	25	22	20	18	17	16	17	18	21	24	28	32	36	39	41	43	43	42	40
				Con cielo raso suspendido																							
1.	Lámina de acero con aislamiento de 1 o 2 in	9 (10)	0.134 (0.092)	2	0	−2	−3	−4	−4	−1	9	23	37	50	62	71	77	78	74	67	56	42	28	18	12	8	5
2.	Madera de 1 in con aislamiento de 1 in	10	0.115	20	15	11	8	5	3	2	3	7	13	21	30	40	48	55	60	62	58	51	44	37	30	37	25
3.	Concreto ligero de 4 in	20	0.134	19	14	10	7	4	2	0	0	4	10	19	29	39	48	56	62	65	64	61	54	46	38	30	24
4.	Concreto pesado de 2 in con aislamiento de 1 in	30	0.131	28	25	23	20	17	15	13	13	14	16	20	25	30	35	39	43	46	47	46	44	41	38	35	32
5.	Madera de 1 in con aislamiento de 2 in	10	0.083	25	20	16	13	10	7	5	5	7	12	18	25	33	41	48	53	57	57	56	52	46	40	34	29
6.	Concreto ligero de 8 in	26	0.109	32	28	23	19	16	13	10	8	7	8	11	16	22	29	36	42	48	52	54	54	51	47	42	37
7.	Madera de 2.5 in con aislamiento de 1 in	15	0.096	34	31	29	26	23	21	18	16	15	15	16	18	21	25	30	34	38	41	43	44	44	42	40	37
8.	Concreto ligero de 8 in	33	0.093	39	36	33	29	26	23	20	18	15	14	14	15	17	20	25	29	34	38	42	45	46	45	44	42
9.	Concreto pesado de 4 in con aislamiento de 1 o 2 in	53 (54)	0.128 (0.090)	30	29	27	26	24	22	21	20	20	21	22	24	27	29	32	34	36	38	38	38	37	36	34	33
10.	Madera de 2.5 in con aislamiento de 2 in	15	0.072	35	33	30	28	26	24	22	20	18	18	18	20	22	25	28	32	35	38	40	41	41	40	39	37
11.	Sistema de terrazas de techo	77	0.082	30	29	28	27	26	25	24	23	22	22	22	23	23	25	26	28	29	31	32	33	33	33	33	32
12.	Concreto pesado con aislamiento de 1 a 2 in	77 (77)	0.125 (0.088)	29	28	27	26	25	24	23	22	21	21	22	23	25	26	28	30	32	33	34	34	34	33	32	31
13.	Madera de 4 in con aislamiento de 1 o 2 in	19 (20)	0.082 (0.064)	35	34	33	32	31	29	27	26	24	23	22	21	22	22	24	25	27	30	32	34	35	36	37	36

Reproducido con permiso del *1985 Fundamentals ASHRAE Handbook & Product Directory.*

Tabla A.5.4 Diferencias de temperaturas para cargas de enfriamiento (DTCE) para calcular cargas de paredes al sol, 1°F [1]

Latitud norte, orientación de pared	Hora solar, h 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Hora de la DTCE máxima	DTCE mínima	DTCE máxima	Diferencia de DTCE
Paredes grupo A																												
N	14	14	14	13	13	13	12	12	11	11	10	10	10	10	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	2	10	14	4
NE	19	19	19	18	17	17	16	15	15	15	15	15	16	16	17	18	18	18	19	19	20	20	20	20	22	15	20	5
E	24	24	23	23	22	21	20	19	19	18	19	19	20	21	22	23	24	24	25	25	25	25	25	25	22	18	25	7
SE	24	23	23	22	21	20	20	19	18	18	18	18	18	19	20	21	22	23	23	24	24	24	24	24	22	18	24	6
S	20	20	19	19	18	18	17	16	16	15	14	14	14	14	14	15	16	17	18	19	19	20	20	20	23	14	20	6
SW	25	25	25	24	24	23	22	21	20	19	19	18	17	17	17	17	18	19	20	22	23	24	25	25	24	17	25	8
W	27	27	26	26	25	24	23	22	21	20	19	19	18	18	18	18	19	19	20	22	23	25	26	26	1	18	27	9
NW	21	21	21	20	20	19	19	18	17	16	16	15	15	14	14	14	15	15	16	17	18	19	20	21	1	14	21	7
Paredes grupo B																												
N	15	14	14	13	12	11	11	10	9	9	9	8	9	9	9	10	11	12	13	14	14	15	15	15	24	8	15	7
NE	19	18	17	16	15	14	13	12	12	13	14	15	16	17	18	19	19	20	20	21	21	21	20	20	21	12	21	9
E	23	22	21	20	18	17	16	15	15	15	17	19	21	22	24	25	26	26	27	27	26	26	25	24	20	15	27	12
SE	23	22	21	20	18	17	16	15	14	14	15	16	18	20	21	23	24	25	26	26	26	26	25	24	21	14	26	12
S	21	20	19	18	17	15	14	13	12	11	11	11	11	12	14	15	17	19	20	21	22	22	22	21	23	11	22	11
SW	23	26	25	24	22	21	19	18	16	15	14	14	13	13	14	15	17	20	22	25	27	28	28	28	24	13	28	15
W	29	28	27	26	24	23	21	19	18	17	16	15	14	14	14	15	17	19	22	25	27	29	29	30	24	14	30	16
NW	23	22	21	20	19	18	17	15	14	13	12	12	12	11	12	12	13	15	17	19	21	22	23	23	24	11	23	12
Paredes grupo C																												
N	15	14	13	12	11	10	9	8	8	7	7	8	8	9	10	12	13	14	15	16	17	17	17	16	22	7	17	10
NE	19	17	16	14	13	11	10	10	11	13	15	17	19	20	21	22	22	23	23	23	23	22	21	20	20	10	23	13
E	22	21	19	17	15	14	12	12	14	16	19	22	25	27	29	29	30	30	30	29	28	27	26	24	18	12	30	18
SE	22	21	19	17	15	14	12	12	12	13	16	19	22	24	26	28	29	29	29	29	28	27	26	24	19	12	29	17
S	21	19	18	16	15	13	12	10	9	9	9	10	11	14	17	20	22	24	25	26	25	25	24	22	20	9	26	17
SW	29	27	25	22	20	18	16	15	13	12	11	11	11	13	15	18	22	26	29	32	33	33	32	31	22	11	33	22
W	31	29	27	25	22	20	18	16	14	13	12	12	12	13	14	16	20	24	29	32	35	35	35	33	22	12	35	23
NW	25	23	21	20	18	16	14	13	11	10	10	10	10	11	12	13	15	18	22	25	27	27	27	26	22	10	27	17
Paredes grupo D																												
N	15	13	12	10	9	7	6	6	6	6	6	7	8	10	12	13	15	17	18	19	19	19	18	16	21	6	19	13
NE	17	15	13	11	10	8	7	8	10	14	17	20	22	23	23	24	24	25	25	24	23	22	20	18	19	7	25	18
E	19	17	15	13	11	9	8	9	12	17	21	27	30	32	33	33	32	32	31	30	29	26	24	22	16	8	33	25
SE	20	17	15	13	11	10	8	8	10	13	17	22	26	29	31	32	32	32	31	30	28	26	24	22	17	8	32	24
S	19	17	15	13	11	9	8	7	6	6	7	9	12	16	20	24	27	29	29	29	27	26	24	22	19	6	29	23
SW	28	25	22	19	16	14	12	10	9	8	8	8	10	12	16	21	27	32	36	38	38	37	34	31	21	8	38	30
W	31	27	24	21	18	15	13	11	10	9	9	9	10	11	14	18	24	30	36	40	41	40	38	34	21	9	41	32
NW	25	22	19	17	14	12	10	9	8	7	7	8	9	10	12	14	18	22	27	31	32	32	30	27	22	7	32	25
Paredes grupo E																												
N	12	10	8	7	5	4	3	4	5	6	7	9	11	13	15	17	19	20	21	23	20	18	16	14	20	3	22	19
NE	13	11	9	7	6	4	5	9	15	20	24	25	25	26	26	26	26	26	25	24	22	19	17	15	16	4	26	22
E	14	12	10	8	6	5	6	11	18	26	33	36	38	37	36	34	33	32	30	28	25	22	20	17	13	5	38	33
SE	15	13	10	8	7	5	5	8	12	19	25	31	35	37	37	36	34	33	31	28	26	23	20	17	15	5	37	32
S	15	12	10	8	7	5	4	3	4	5	9	13	19	24	28	32	34	33	31	29	26	23	20	17	17	3	34	31
SW	22	18	15	12	10	8	6	5	5	6	7	9	12	18	24	32	38	43	45	44	40	35	30	26	19	5	45	40
W	26	21	17	14	11	9	7	6	6	6	7	9	11	14	20	27	36	43	49	49	45	40	34	29	20	6	49	43
NW	20	17	14	11	9	7	6	5	5	5	6	8	10	13	16	20	26	32	37	38	36	32	28	24	20	5	38	33
Paredes grupo F																												
N	8	6	5	3	2	1	2	4	6	7	9	11	14	17	19	21	22	23	24	23	20	16	13	11	19	1	24	23
NE	9	7	5	3	2	1	5	14	23	28	30	29	28	27	27	27	27	26	24	22	19	16	13	11	11	1	30	29
E	10	7	6	4	3	2	6	17	28	38	44	45	43	39	36	34	32	30	27	24	21	17	15	12	12	2	45	43
SE	10	7	6	4	3	2	4	10	19	28	36	41	43	42	39	36	34	31	28	25	21	18	15	12	13	2	43	41
S	10	8	6	4	3	2	1	1	3	7	13	20	27	34	38	39	38	35	31	26	22	18	15	12	16	1	39	38
SW	15	11	9	6	5	3	2	2	4	5	8	11	17	26	35	44	50	53	52	45	37	28	23	18	18	2	53	51
W	17	13	10	7	5	4	3	3	4	6	8	11	14	20	28	39	49	57	60	54	43	34	27	21	19	3	60	57
NW	14	10	8	6	4	3	2	2	3	5	8	10	13	15	21	27	35	42	46	43	35	28	22	18	19	2	46	44
Paredes grupo G																												
N	3	2	1	0	-1	2	7	8	9	12	15	18	21	23	24	24	25	26	22	15	11	9	7	5	18	-1	26	27
NE	3	2	1	0	-1	9	27	36	38	35	30	26	24	23	23	26	25	23	18	14	11	9	7	5	9	-1	39	40
E	4	2	1	0	-1	11	31	47	54	55	50	40	33	31	30	29	27	24	19	15	12	10	8	6	10	-1	55	56
SE	4	2	1	0	-1	5	18	32	42	49	51	48	42	36	32	30	27	24	19	15	12	10	8	6	11	-1	51	52
S	4	2	1	0	-1	0	1	5	12	22	31	39	45	46	43	37	31	25	20	15	12	10	8	5	14	-1	46	47
SW	5	4	3	1	0	0	2	5	8	12	16	24	30	38	39	39	43	44	42	37	24	17	13	10	16	0	63	63
W	6	5	3	2	1	1	2	3	5	8	11	15	19	27	41	56	67	72	67	48	30	20	15	11	17	1	72	71
NW	5	3	2	1	0	0	2	5	8	11	15	18	21	22	37	47	55	55	41	25	17	13	10	7	18	0	55	55

Reproducido con permiso del *1985 Fundamentals, ASHRAE Handbook & Product Directory.*

Tabla A.5.5 Descripción de grupos de construcción de paredes [1]

Grupo No. Descripción de la construcción	Peso, lb/ft²	Valor de U, BTU/(h-ft²-°F)	Capacidad calorífica, BTU/(ft²-°F)
Ladrillo de vista de 4 in + (Ladrillo)			
C Espacio de aire + ladrillo de vista de 3 in	83	0.358	18.3
D Ladrillo común de 4 in	90	0.415	18.4
C Aislamiento de 1 in o espacio de aire + ladrillo común de 4 in	90	0.174-0.301	18.4
B Aislamiento de 2 in + ladrillo común de 4 in	88	0.111 ver A.7	18.5
B Ladrillo común de 8 in	130	0.302	26.4
A Aislamiento o espacio de aire + ladrillo común de 8 in	130	0.154-0.243	26.4
Ladrillo de vista de 4 in + *(Concreto pesado)*			
C Espacio de aire + concreto de 2 in	94	0.350	19.7
B Aislamiento de 2 in + concreto de 4 in	97	0.116	19.8
A Espacio de aire o aislamiento + concreto de 8 in o más	143-190	0.110-0.112	29.1-38.4
Ladrillo de vista de 4 in + *(bloque de concreto ligero o pesado)*			
E Bloque de 4 in	62	0.319	12.9
D Espacio de aire o aislamiento + bloque de 4 in	62	0.153-0.246	12.9
D Bloque de 8 in	70	0.274	15.1
C Espacio de aire o aislamiento de 1 in + bloque de 6 u 8 in	73-89	0.221-0.275	15.5-18.5
B Aislamiento de 2 in + bloque de 8 in	89	0.096-0.107	15.5-18.6
Ladrillo de vista de 4 in + *(azulejo de barro)*			
D Azulejo de 4 in	71	0.381	15.1
D Espacio de aire + azulejo de 4 in	71	0.281	15.1
C Aislamiento + azulejo de 4 in	71	0.169	15.1
C Azulejo de 8 in	96	0.275	19.7
B Espacio de aire o aislamiento de 1 in + azulejo de 8 in	96	0.142-0.221	19.7
A Aislamiento de 2 in + azulejo de 8 in	97	0.097	19.8
Pared de concreto pesado + *(acabado)*			
E Concreto de 4 in	63	0.585	12.5
D Concreto de 4 in + aislamiento de 1 o 2 in	63	0.119-0.200	12.5
C Aislamiento de 2 in + concreto de 4 in	63	0.119	12.7
C Concreto de 8 in	109	0.490	21.9
B concreto de 8 in + aislamiento de 1 o 2 in	110	0.115-0.187	22.0
A Aislamiento de 2 in + concreto de 8 in	110	0.115	21.9
E Concreto de 12 in	156	0.421	31.2
A Concreto de 12 in + aislamiento	156	0.113	31.3
Bloque de concreto ligero y pesado + *(acabado)*			
F Bloque de 4 in + espacio de aire o aislamiento	29-36	0.161-0.263	5.7-7.2
E Aislamiento de 2 in + bloque de 4 in	29-37	0.105-0.114	5.8-7.3
E Bloque de 8 in	41-57	0.294-0.402	6.3-11.3
D Concreto de 8 in + espacio de aire o aislamiento	41-57	0.149-0.173	8.3-11.3
Azulejo de barro + *(acabado)*			
F Azulejo de 4 in	39	0.419	7.8
F Azulejo de 4 in + espacio de aire	39	0.303	7.8
E Azulejo de 4 in + aislamiento de 1 in	39	0.175	7.9
D Aislamiento de 2 in + azulejo de 4 in	40	0.110	7.9
D Azulejo de 8 in	63	0.296	12.5
C Azulejo de 8 in + espacio de aire o aislamiento de 1 in	63	0.151-0.231	12.6
B Aislamiento de 2 in + azulejo de 8 in	63	0.099	12.6
Pared de lámina *(cortina metálica)*			
G Con o sin espacio de aire + 1, 2 o 3 in de aislamiento	5-6	0.091-0.230	0.7
Pared de bastidor			
G Aislamiento de 1 a 3 in	16	0.081-0.178	3.2

Reproducido con permiso de *1985 Fundamentals ASHRAE Handbook & Product Directory*

Tabla A.5.6 Corrección de la DTCE por latitud y mes, para aplicar a paredes y techos, latitudes norte, 1°F [1]

Latitud	Mes	N	NNE NNW	NE NW	ENE WNW	E W	ESE WSW	SE SW	SSE SSW	S	HORA
0	Dic	-3	-5	-5	-5	-2	-0	3	6	9	-1
	Ene/Nov	-3	-5	-4	-4	-1	-0	2	4	7	-1
	Feb/Oct	-3	-2	-2	-2	-1	-1	0	-1	0	0
	Mar/Sept	-3	0	1	-1	-1	-3	-3	-5	-8	-1
	Abr/Ago	5	4	3	0	-2	-5	-6	-8	-8	-2
	May/Jul	10	7	5	0	-3	-7	-8	-9	-8	-4
	Jun	12	9	5	0	-3	-7	-9	-10	-8	-5
8	Dic	-4	-6	-6	-6	-3	0	4	8	12	-5
	Ene/Nov	-3	-5	-6	-5	-2	0	3	6	10	-4
	Feb/Oct	-3	-4	-3	-3	-1	-1	1	2	4	-1
	Mar/Sept	-3	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-4	0
	Abr/Ago	2	2	2	0	-1	-4	-5	-7	-7	-1
	May/Jul	7	5	4	0	-2	-5	-7	-9	-7	-2
	Jun	9	6	4	0	-2	-6	-8	-9	-7	-2
16	Dic	-4	-6	-8	-8	-4	-1	4	9	13	-9
	Ene/Nov	-4	-6	-7	-7	-4	-1	4	8	12	-7
	Feb/Oct	-3	-5	-5	-4	-2	0	2	5	7	-4
	Mar/Sept	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0	0	-1
	Abr/Ago	-1	0	-1	-1	-1	-3	-3	-5	-6	0
	May/Jul	4	3	3	0	-1	-4	-5	-7	-7	0
	Jun	6	4	4	1	-1	-4	-6	-8	-7	0
24	Dic	-5	-7	-9	-10	-7	-3	3	9	13	-13
	Ene/Nov	-4	-6	-8	-9	-6	-3	3	9	13	-11
	Feb/Oct	-4	-5	-6	-6	-3	-1	3	7	10	-7
	Mar/Sept	-3	-4	-3	-3	-1	-1	1	2	4	-3
	Abr/Ago	-2	-1	0	-1	-1	-2	-1	-2	-3	0
	May/Jul	1	2	2	0	0	-3	-3	-5	-6	1
	Jun	3	3	3	1	0	-3	-4	-6	-6	1
32	Dic	-5	-7	-10	-11	-8	-5	2	9	12	-17
	Ene/Nov	-5	-7	-9	-11	-8	-4	2	8	12	-15
	Feb/Oct	-4	-6	-7	-8	-4	-2	4	8	11	-10
	Mar/Sept	-3	-4	-4	-4	-2	-1	3	5	7	-5
	Abr/Ago	-2	-2	-1	-2	0	-1	0	1	1	-1
	May/Jul	1	1	1	0	0	-1	-1	-3	-3	1
	Jun	1	2	2	1	0	-2	-2	-4	-4	2
40	Dic	-6	-8	-10	-13	-10	-7	0	7	10	-21
	Ene/Nov	-5	-7	-10	-12	-9	-6	1	8	11	-19
	Feb/Oct	-5	-7	-8	-9	-6	-3	3	8	12	-14
	Mar/Sept	-4	-5	-5	-6	-3	-1	4	7	10	-8
	Abr/Ago	-2	-3	-2	-2	0	0	2	3	4	-3
	May/Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Jun	1	1	1	0	1	0	0	-1	-1	2
48	Dic	-6	-8	-11	-14	-13	-10	-3	2	6	-25
	Ene/Nov	-6	-8	-11	-13	-11	-8	-1	5	8	-24
	Feb/Oct	-5	-7	-10	-11	-8	-5	1	8	11	-18
	Mar/Sept	-4	-6	-6	-7	-4	-1	4	8	11	-11
	Abr/Ago	-3	-3	-3	-3	-1	0	4	6	7	-5
	May/Jul	0	-1	0	0	1	1	3	3	4	0
	Jun	1	1	2	1	2	1	2	2	3	2
56	Dic	-7	-9	-12	-16	-16	-14	-9	-5	-3	-28
	Ene/Nov	-6	-8	-11	-15	-14	-12	-6	-1	2	-27
	Feb/Oct	-6	-8	-10	-12	-10	-7	0	6	9	-22
	Mar/Sept	-5	-6	-7	-8	-5	-2	4	8	12	-15
	Abr/Ago	-3	-4	-4	-4	-1	1	5	7	9	-8
	May/Jul	0	0	0	0	2	2	5	6	7	-2
	Jun	2	1	2	1	3	3	4	5	6	1

Reproducido con permiso del *1979 ASHRAE Load Calculations Manual*

Tabla A.5.7 Tasas de ganancia de calor debidas a los ocupantes del recinto acondicionado [1]

TABLA 6.11. TASAS DE GANANCIA DE CALOR DEBIDA A LOS OCUPANTES DEL RECINTO ACONDICIONADO*

Actividad	Aplicaciones típicas	Calor total por adulto masculino			Calor total ajustado*			Calor sensible			Calor latente		
		Watts	Btuh	kcal/h	Watts	Btuh	kcal/h	Watts	Btuh	kcal/h	Watts	Btuh	kcal/h
Sentado en reposo	Teatro, cine	115	400	100	100	350	90	60	210	55	40	140	30
Sentado, trabajo muy ligero, escritura	Oficinas, hoteles, apartamentos	140	480	120	120	420	105	65	230	55	55	190	50
Sentado, comiendo	Restaurante	150	520	130	170	580[c]	145	75	255	60	95	325	80
Sentado, trabajo ligero, mecanografía	Oficinas, hoteles, apartamentos	185	640	160	150	510	130	75	255	60	75	255	65
Parado, trabajo ligero o camina despacio	Tiendas minoristas, bancos	235	800	200	185	640	160	90	315	80	95	325	80
Trabajo ligero de banco	Fábricas	255	880	220	230	780	195	100	345	90	130	435	110
Caminando 3 mph trabajo libro trabajo con máquinas pesadas	Fábricas	305	1040	260	305	1040	260	100	345	90	205	695	170
Boliche		350	1200	300	280	960	240	100	345	90	180	615	150
Baile moderado	Salón de baile	400	1360	340	375	1280	320	120	405	100	255	875	220
Trabajo pesado, trabajo con máquinas pesadas, levantar pesas	Fábricas	470	1600	400	470	1600	400	165	565	140	300	1035	260
Trabajo pesado, ejercicios atléticos	Gimnasios	585	2000	500	525	1800	450	185	635	160	340	1165	290

* Nota: Los valores de la tabla se basan en una temperatura de bulbo seco de 78°F. Para 80°F BS, el calor total queda igual, pero el valor del calor sensible se debe disminuir en aproximadamente 8% y los valores del calor latente se deben aumentar proporcionalmente.

[a] La ganancia total ajustada de calor se basa en el porcentaje normal de hombres, mujeres y niños en la aplicación que se menciona, bajo la hipótesis de que la ganancia por mujer adulta representa un 85% de la del hombre adulto, y la de un niño el 75%.

[c] Calor total ajustado para comer en un restaurant, que incluye 60 BTU/h del alimento por individuo (30 BTU sensibles y 30 BTU latentes).

[d] Para el boliche, se considera una persona por pista tirando y las demás sentadas (400 BTU/h) o paradas y caminando lentamente (970 BTU/h)

Reproducido con permiso del *1985 Fundamentals. ASHRAE Handbook & Product Directory.*

Tabla A.5.8 Requisitos de ventilación para ocupantes [1]

	Personas estimadas por 100 ft² de área de piso	Aire de ventilación necesario por persona	
		FCM Mínimos	FCM Recomendados
RESIDENCIAL			
Viviendas de una unidad			
Salas y recámaras	5	5	7–10
Cocinas, baños	–	20	30–50
Viviendas de unidades múltiples			
Salas y recámaras	7	5	7–10
Cocinas, baños	–	20	30–50
COMERCIAL			
Sanitarios públicos	100	15	20–25
Comercios			
Pisos de venta (sótanos y plantas bajas)	30	7	10–15
Pisos de venta (pisos superiores)	20	7	10–15
Comedores	70	10	15–20
Cocinas	20	30	35
Cafeterías	100	30	35
Hoteles, moteles			
Recámaras	5	7	10–15
Salas	20	10	15–20
Baños	–	20	30–50
Salas de belleza	50	25	30–35
Peluquerías	25	7	10–15
Estacionamientos	–	1.5	2–3
Teatros			
Vestíbulos	150	20	25–30
Auditorios (no se fuma)	150	5	5–10
Auditorios (permitido fumar)	150	10	10–20
Boliches, zona de asientos	70	15	20–25
Gimnasios y arenas			
Pisos de ejercicios	70	20	25–30
Vestidores	20	30	40–50
Áreas de público	150	20	25–30
Piscinas	25	15	20–25
Oficinas			
Espacio de oficinas en general	10	15	15–25
Salas de juntas	60	25	30–40
INSTITUCIONAL			
Escuelas			
Salones de clase	50	10	10–15
Auditorios	150	5	5–7.5
Gimnasios	70	20	25–30
Bibliotecas	20	7	10–12
Vestidores	20	30	40–50
Hospitales			
Recámaras sencillas y dobles	15	10	15–20
Guarderías	20	10	15–20
Salas de cirugía, salas de parto	–	20	–

Tabla A.5.9 Resistencia térmica de materiales aislantes y de construcción [1]

Descripción	Densidad lb/ft³	Resistencia (R)	
		Por pulgada	Por espesor nominal
TABLEROS			
Tableros, paneles, contrapisos, recubrimientos			
Productos de tabla de madera			
Tablero de asbesto cemento	120	0.25	– –
Tablero de asbesto cemento 0.125 in	120	– –	0.03
Tablero de asbesto cemento 0.25 in	120	– –	0.06
Tablero de yeso 0.375 in	50	– –	0.32
Tablero de yeso 0.5 in	50	– –	0.45
Tablero de yeso 0.625 in	50	– –	0.56
Triplay	34	1.25	– –
Triplay 0.25 in	34	– –	0.31
Triplay 0.375 in	34	– –	0.47
Triplay 0.5 in	34	– –	0.62
Triplay 0.625 in	34	– –	0.77
Triplay o tableros de madera 0.75 in	34	– –	0.93
Tablero de fibra vegetal			
Recubrimiento, densidad regular 0.5 in	18	– –	1.32
0.78125 in	18	– –	2.06
Recubrimiento, densidad intermedia 0.5 in	22	– –	1.22
Recubrimiento para clavar 0.5 in	25	– –	1.14
Respaldo de tejamanil 0.375 in	18	– –	0.94
Respaldo de tejamanil 0.3125 in	18	– –	0.78
Tablero antirruido 0.5 in	15	– –	1.35
Tableros de cerámica, simples o acústicos	18	2.50	– –
0.5 in	18	– –	1.25
0.75 in	18	– –	1.89
Laminados de papel	30	2.00	– –
Cartón homogéneo de papel reciclado			
Tablero Duro	30	2.00	– –
Densidad media	50	1.37	– –
Alta densidad, servicio de temperatura, servicio	63	1.00	– –
sobrepuesto	55	1.22	– –
Alta densidad, templado normal	63	1.00	
Aglomerados			
Baja densidad	37	1.85	– –
Densidad media	50	1.06	– –
Alta densidad	62.5	0.85	– –
Base 0.625 in	40	– –	0.82
Contrapiso de madera 0.75 in		– –	0.94
MEMBRANAS DE CONSTRUCCIÓN			
Fieltro permeable al vapor	– –	– –	0.06
Sello de vapor, 2 capas de			
fieltro 15 lb	– –	– –	0.12
Sello de vapor, membrana plástica	– –	– –	Negl.
MATERIALES DE TERMINADO DE PISO			
Carpeta y capa fibrosa	– –	– –	2.08
Carpeta y capa de hule	– –	– –	1.23
Losetas de corcho 0.125 in	– –	– –	0.28
Terrazzo 1 in	– –	– –	0.08
Losetas de asfalto, linóleo, vinilo, hule,	– –	– –	0.05
asbesto vinílico			
cerámica			
Madera, acabado de madera dura 0.75 in			0.68
MATERIALES AISLANTES			
Colchoneta y tabla			
Fibra mineral, lana de roca,			
escoria o vidrio			
aprox. 2 a 2.75 in	0.3 - 2.0	– –	7
aprox. 3 a 3.5 in	0.3 - 2.0	– –	11
aprox. 3.50 a 0.5 in	0.3 - 2.0	– –	19
aprox. 6 a 7 in	0.3 - 2.0		22
aprox. 8.5 in	0.3 - 2.0		30

Tabla A.5.10 Coeficiente global U de transferencia de calor para el vidrio [1]

TABLA A.8. COEFICIENTE GLOBAL *U* DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EL VIDRIO (BTU/hr-ft²-°F)

Paneles verticales (ventanas exteriores, puertas corredizas de vidrio y particiones) Vidrio plano, tragaluz y lámina de plástico			
Descripción —	Exterior Invierno	Exterior Verano	Interior
Vidrio plano			
vidrio sencillo	1.10	1.04	0.73
Vidrio aislante - doble			
espacio de aire de 1/4"*	0.58	0.61	0.49
espacio de aire de 1/2"*	0.49	0.56	0.48
espacio de aire de 1/2", recubrimiento de baja emisión*			
e = 0.20	0.32	0.38	0.32
e = 0.40	0.38	0.45	0.38
e = 0.60	0.43	0.51	0.42
Vidrio aislante - triple*			
Espacio de aire de 1/4"*	0.39	0.44	0.38
espacio de aire de 1/2"*	0.31	0.39	0.30
ventanas dobles			
espacio de aire de 1" a 4"*	0.50	0.50	0.44
Lámina de plástico			
sencilla			
1/8" espesor	1.06	0.98	- -
1/4" espesor	0.96	0.89	- -
1/2" espesor	0.81	0.76	- -
unidad aislante - doble			
espacio de aire de 1/4"*	0.55	0.58	- -
espacio de aire de 1/2"*	0.43	0.45	- -
Tragaluz*			
6 x 6 x 4 in espesor	0.60	0.57	0.46
8 x 8 x 4 in espesor	0.56	0.54	0.44
— con divisor del hueco	0.48	0.46	0.38
12 x 12 x 4 in espesor	0.52	0.50	0.41
— con divisor del hueco	0.44	0.42	0.36
12 x 12 x 2 in espesor	0.60	0.57	0.46

Paneles horizontales — vidrio plano, tragaluz y domos de plástico			
Descripción	Invierno	Exterior Verano	Interior
Vidrio plano			
vidrio sencillo	1.23	0.83	0.98
vidrio aislante — doble			
espacio de aire de 1/4"*	0.85	0.54	0.59
espacio de aire de 1/2"*	0.59	0.49	0.56
espacio de aire de 1/2", recubrimientode baja emisión*			
e = 0.20	0.48	0.36	0.39
e = 0.40	0.42	0.42	0.45
e = 0.60	0.58	0.46	0.50
Tragaluz*			
11 x 11 x 3 in espesor con divisor de cavidad	0.53	0.35	0.44
12 x 12 x 4 in espesor con divisor de cavidad	0.51	0.34	0.42
Domos de plástico'			
de pared sencilla	1.15	0.80	- -
de pared doble	0.70	0.48	- -

Factores de ajuste para paneles verticales y horizontales			
Descripción	Vidrio sencillo	Vidrio doble o triple	Ventanas dobles
Ventanas			
Todas de vidrio	1.00	1.00	1.00
Marco de madera - 80% vidrio	0.90	0.95	0.90
Marco de madera - 60% vidrio	0.80	0.85	0.80
Marco de metal - 80% vidrio	1.00	1.20*	1.20*
Ventanas y puertas corredizas de vidrio	0.95	1.00	- -
Marco de madera	1.00	1.10*	- -
Marco de metal			

Tabla A.5.11 Calor generado por motores eléctricos [1]

Nameplate* or Brake Horsepower	Full Load Motor Efficiency Percent	Location of Equipment with Respect to Conditioned Space or Air Stream*		
		Motor In-Driven Machines in	Motor Out-Driven Machine in	Motor In-Driven Machine out
		$\frac{HP \times 2545}{\% \text{ Eff}}$	$HP \times 2545$	$\frac{HP \times 2545\,(1 - \% \text{ Eff})}{\% = \text{Eff}}$
		Btu per Hour		
$\frac{1}{20}$	40	320	130	190
$\frac{1}{12}$	49	430	210	220
$\frac{1}{8}$	55	580	320	260
$\frac{1}{6}$	60	710	430	280
$\frac{1}{4}$	64	1,000	640	360
$\frac{1}{3}$	66	1,280	850	440
$\frac{1}{2}$	70	1,820	1,280	540
$\frac{3}{4}$	72	2,680	1,930	750
1	79	3,220	2,540	680
$1\frac{1}{2}$	80	4,770	3,820	950
2	80	6,350	5,100	1,280
3	81	9,450	7,650	1,800
5	82	15,600	12,800	2,800
$7\frac{1}{2}$	85	22,500	19,100	3,400
10	85	30,000	25,500	4,500
15	86	44,500	38,200	6,300
20	87	58,500	51,000	7,500
25	88	72,400	63,600	8,800
30	89	85,800	76,400	9,400
40	89	115,000	102,000	13,000
50	89	143,000	127,000	16,000
60	89	172,000	153,000	19,000
75	90	212,000	191,000	21,000
100	90	284,000	255,000	29,000
125	90	354,000	318,000	36,000
150	91	420,000	382,000	38,000
200	91	560,000	510,000	50,000
250	91	700,000	636,000	64,000

A. 6 Tablas generales para cálculos de modelado matemático y regulador de planta

Tabla A.6.1 Tabla para obtención de modelado matemático de la planta

Sector	Temperatura (°C)	Hora
Máquina CAI – 01	26.5	07:01 a.m.
Máquina CAI – 01	25,8	07:33 a.m.
Máquina CAI – 01	25.0	08:13 a.m.
Máquina CAI – 01	23.8	08:40 a.m.
Máquina CAI – 01	23.3	09:10 a.m.
Máquina CAI – 01	22,4	09:34 a.m.
Máquina CAI – 01	21.5	10:03 a.m.
Máquina CAI – 01	20.8	10:35 a.m.
Máquina CAI – 01	20.8	11:00 a.m.
Máquina CAI – 01	20.9	11:35 a.m.
Máquina CAI – 01	21.0	12:03 p.m.
Máquina CAI – 01	21.1	12:29 p.m.
Máquina CAI – 02	21,2	01:06 p.m.
Máquina CAI – 02	21.2	01:29 p.m.
Máquina CAI – 02	21,3	02:01 p.m.
Máquina CAI – 02	21.3	02:30 p.m.
Máquina CAI – 02	21,5	03:00 p.m.
Máquina CAI – 02	21.6	03:36 p.m.
Máquina CAI – 02	21,8	04:04 p.m.
Máquina CAI – 02	22.0	04:33 p.m.
Máquina CAI – 02	21.5	05:33 p.m.
Máquina CAI – 02	21,2	06:01 p.m.
Máquina CAI – 02	21.0	06:33 p.m.
Máquina CAI – 02	20,6	07:04 p.m.
Máquina CAI – 02	20.3	07:29 p.m.
Máquina CAI – 02	20.1	08:05 p.m.
Máquina CAI – 02	19,9	08:36 p.m.
Máquina CAI – 02	19.6	09:02 p.m.
Máquina CAI – 02	19,1	09:33 p.m.
Máquina CAI – 02	18,6	10:03 p.m.
Máquina CAI – 02	18,1	10:31 p.m.

Tabla A.6.1 Tabla para obtención de modelado matemático de la planta (continuación)

Sector	Temperatura (°C)	Hora
Máquina CAI – 02	17,9	11:05 p.m.
Máquina CAI – 02	17.7	11:39 p.m.
Máquina CAI – 03	17.3	12:09 a.m.
Máquina CAI – 03	17.4	12:36 a.m.
Máquina CAI – 03	17.9	01:06 a.m.
Máquina CAI – 03	18,5	01:35 a.m.
Máquina CAI – 03	19.0	02:06 a.m.
Máquina CAI – 03	20	02:33 a.m.
Máquina CAI – 03	20.9	03:01 a.m.
Máquina CAI – 03	21,6	03:36 a.m.
Máquina CAI – 03	22,6	04:00 a.m.
Máquina CAI – 03	23.8	04:38 a.m.
Máquina CAI – 03	24.9	05:01 a.m.
Máquina CAI – 03	25.7	05:31 a.m.
Máquina CAI – 03	26	06:04 a.m.
Máquina CAI – 03	26.2	06:31 a.m.

Tabla A.6.2 Tabla de datos deseados en el nivel de temperatura en la planta ante un escalón para la obtención del regulador

Hora del día	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
07:00 a.m.	0	32
07:30 a.m.	0,5	30,5
08:00 a.m.	1	29,7
08:30 a.m.	1,5	28,5
09:00 a.m.	2	27,7
09:30 a.m.	2,5	27
10:00 a.m.	3	26,2
10:30 a.m.	3,5	25,4
11:00 a.m.	4	22,8
11:30 a.m.	4,5	21,9
12:00 p.m.	5	22
12:30 p.m.	5,5	22,1
01:00 p.m.	6	22
01:30 p.m.	6,5	21,9
02:00 p.m.	7	22
02:30 p.m.	7,5	22,1

Tabla A.6.2 Tabla de datos deseados en el nivel de temperatura en la planta ante un escalón para la obtención del regulador (continuación)

Hora del día	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
03:30 p.m.	8,5	21,9
04:00 p.m.	9	22
04:30 p.m.	9,5	22,1
05:00 p.m.	10	22
05:30 p.m.	10,5	21,9
06:00 p.m.	11	22
06:30 p.m.	11,5	22,1
07:00 p.m.	12	22
07:30 p.m.	12,5	21,9
08:00 p.m.	13	22
08:30 p.m.	13,5	22,1
09:00 p.m.	14	22
09:30 p.m.	14,5	21,9
10:00 p.m.	15	22
10:30 p.m.	15,5	22,1
11:00 p.m.	16	22
11:30 p.m.	16,5	21,9
12:00 a.m.	17	22
12:30 a.m.	17,5	22,1
01:00 a.m.	18	22
01:30 a.m.	18,5	21,9
02:00 a.m.	19	22
02:30 a.m.	19,5	22,1
03:00 a.m.	20	22
03:30 a.m.	20,5	21,9
04:00 a.m.	21	22
04:30 a.m.	21,5	22,1
05:00 a.m.	22	22
05:30 a.m.	22,5	21,9
06:00 a.m.	23	22
06:30 a.m.	23,5	22,1

Anexos

B.1 Datos de técnicos del variador de frecuencia [12]

Description
1/2 – 500HP
E7 Drive

E7

The E7 Drive is a variable torque AC drive, designed specifically for HVAC applications in building automation. A new benchmark for size, cost, performance, benefits, and quality, the E7 includes numerous built-in features such as Network Communications, H/O/A, PI Control, and Energy-Savings functions.

The E7 has embedded communications for the popular building automation protocols, Johnson Controls Metasys® N2 and Siemens APOGEE™ FLN, as well as Modbus®. An optional LonWorks® interface card is also available.

The LCD keypad/operator is equipped with Hand/Off/Auto functions, copy feature, 7 language choices, and 5 lines of display, 16 characters per line. Optional software allows upload/download, as well as graphing and monitoring of drive parameters from a PC for ease of drive management. User parameter settings can be recovered at any time via "user initialization".

Built-in PI Control eliminates the need for closed loop output signals from a Building Automation System (BAS). It includes feedback display, inverse, square root and differential control functions, and maintains set point for closed loop control of fans and pumps for pressure, flow or temperature regulation.

Performance Features

- VT Ratings: 1/2-150 HP, 208 VAC
  1/2-150 HP, 230/240 VAC
  1/2- 500 HP, 480 VAC
- Overload capacity: 110% for 60 sec (150% peak)
- Starting torque: 100% at 3 Hz
- DC injection braking: at start or stop, adjustable, current limited (anti-windmilling)
- Motor preheat function
- Adjustable accel/decel: 0.1 to 6000 sec.
- Controlled speed range: 40:1
- Critical frequency rejection: 3 selectable, adjustable bands
- Torque limiting: 30-180%
- Energy $aving control
- Torque boost: full range, auto
- Power loss ride-thru: 2 sec
- Inertia ride-thru
- Auto restart after power loss or resettable fault, selectable, programmable
- Feedback signal loss detection
- Serial communications loss detection
- "Up/Down" floating point control capability
- Stationary motor auto-tuning
- Customizable monitor display
- Sleep function
- Run permissive input
- Ramp-to-stop or coast-to-stop selection
- Runtime changes in control and display
- Project-specific parameter initialization

Service Conditions

- Ambient Temperature:
  -10°C to 40°C(14°F to 104°F) NEMA 1,
  -10°C to 45°C(14°F to 113°F) protected chassis
- Humidity: 95% RH, non-condensing
- Altitude: 3300 ft; higher by derate
- Input voltage: +10%/-15%
- Input frequency: 50/60 Hz ± 5%
- 3-phase, 3-wire, phase sequence insensitive

Design Features

- 32-bit microprocessor logic
- Flash upgradeable firmware
- Non-volatile memory, program retention
- Surface-mount devices
- Displacement power factor: 0.98
- Output frequency: 0.1 to 120 Hz
- Frequency resolution: 0.06 Hz
- Frequency regulation: 0.1%
- Control Terminal Board: Quick disconnect, removable
- Carrier frequency: selectable to 15 kHz
- 3% DC bus reactor: 30-150 HP, 208 VAC; 30-150 HP, 240 VAC; 40-500 HP, 480 VAC; optional on lower ratings
- Keypad Operator: Hand/Off/Auto, built-in copy feature, 7 languages
- LCD display: 5 lines, 16 characters each
- 24 VDC control logic
- Transmitter/Option power supply
- Output contacts: One form C and two programmable form A
- Input/output terminal status
- Input terminals: 5 programmable multi-function input terminals
- Fault input: Programmable
- Diagnostic fault indication in selected language
- Timer function: Elapsed time, Delay on start, Delay on stop
- RS-422/485 port: Embedded Metasys N2, APOGEE FLN, and Modbus
- Volts/hertz ratio: Preset and programmable V/Hz patterns
- Multi-speed settings: 5 available
- Remote speed command: 0-10 VDC or 4-20 mA, direct or reverse-acting
- Setpoint (PI) control with inverse or square root input, differential control via two feedback capability
- Feedback signal: low pass filter
- Speed command: bias and gain
- Analog outputs: Programmable, two, 0-10 VDC
- Meter Functions: Volt, amp, kilowatt, elapsed run time, speed command
- Output Current Transformers, qty 3
- NEMA 1 or protected chassis
- MTBF: exceeds 28 years

Protective Features

- Current limited stall prevention
- Heat sink over-temperature, speed fold-back
- Cooling fan operating hours recorded
- Bi-directional start into rotating motor at synchronized speed
- DC bus charge indicator
- Current limiting DC bus fuse
- Optically-Isolated controls
- Short circuit protection: Phase-phase and phase-neutral
- Ground fault protection
- Short circuit withstand rating: 65K RMS, 100K RMS with bus reactor
- Electronic motor overload: UL recognized
- Current and torque limit
- Fault display: last 10 faults
- Fault circuit: OC, OV, OT
- Over torque and under torque protection
- Program security code
- "Hunting" prevention logic
- Reverse operation prohibit selectability

Options

- Communication Interface: LonWorks
- Analog outputs: 2 programmable, 4-20 mA
- Input and output reactor, enclosed
- DriveWizard™ upload/download and monitoring/graphing software
- Remote digital operator kit

Standards

- UL 508C (Power Conversion)
- CSA 22.2 No. 14-95 (Industrial Control Equipment)
- UL, cUL listed; CE marked
- UL 1995 (Plenum)
- EN 50178 (LVD)
- EN 61800-3 (w/ External Filter)
- IEC 529, 146
- FCC CFR 47 Part 15 Subpart B (w/ External Filter)

B.2 Datos de técnicos del sensor de temperatura *[22]*

JOHNSON CONTROLS

Product Bulletin TE-6300 Series
Issue Date May 18, 2004

TE-6300 Series Temperature Sensors

The TE-6300 Temperature Sensor line offers an economical solution for a wide variety of temperature sensing needs, including wall mount, outdoor air, duct, well, duct averaging, and Variable Air Volume (VAV) applications.

Sensors are available in the following types:

- *1 k ohm thin-film nickel*
- *1 k ohm nickel averaging*
- *1 k ohm thin-film platinum*
- *100 ohm platinum equivalent averaging*
- *1 k ohm platinum equivalent averaging*
- *2.2 k ohm thermistor*
- *10 k ohm thermistor*

Each sensor is packaged with the necessary mounting accessories to maximize ordering and installation ease and reduce both commissioning time and cost.

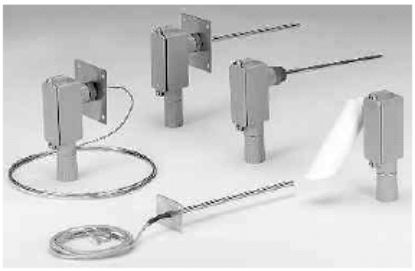


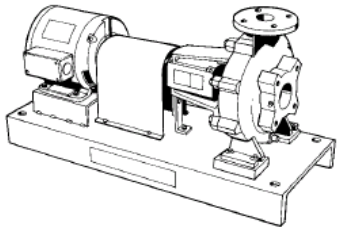
Figure 1: TE-6300 Series Temperature Sensors

Features and Benefits	
❑ **Full Line of Versatile Sensors**	Supports all your temperature sensing needs from a single supplier: wall mount, outdoor air, duct, duct averaging, well insertion, and VAV box duct probe
❑ **Single Assembly Ordering**	Simplifies ordering; provides a complete assembly in one box
❑ **Integral National Pipe Thread (NPT) Adaptor**	Increases sensor connection strength; eliminates the need for a special adaptor
❑ **Noncorrosive Thermoplastic Enclosure**	Resists environmental effects with a durable, easy-to-use, standard conduit enclosure
❑ **Stainless Steel Sensor Probe**	Protects the sensor while increasing corrosion resistance
❑ **Retainer for the Sensor Holder**	Locks the sensor holder into the conduit box

B.3 Datos de técnicos del motor trifásico *[7]*

BELL & GOSSETT

DATA SHEET
CP-526



8G
Series 1510
Centrifugal Pumps – Base Mounted

TYPICAL SPECIFICATION FOR FLEXIBLE COUPLED END-SUCTION PUMPS

Furnish and install pumps with capacities as shown on plans. Pumps shall be base-mounted, single stage, end suction design.

Pump volute shall be made of ductile iron with integrally cast pedestal support. The impeller shall be cast bronze, enclosed type, statically and hydraulically balanced. Impeller shall be keyed to the shaft and secured by a hex head impeller nut and washer.

Pumps shall be provided with a single inside unbalanced mechanical shaft seal for leakless operation. A suitable arrangement shall be provided to furnish a portion of the pumped liquid to lubricate and cool the seal faces.

Pump shall be rated for a minimum of 175 psi working pressure. Casings shall be provided with tapped and plugged holes for priming, vent, and drain.

Pump bearing housing shall have heavy duty regreasable ball bearings.

Baseplate shall be channel steel, sufficiently rigid to support the pump and driving motor.

A flexible-type coupler, capable of absorbing torsional vibration, shall be employed between the pump and motor, and it shall be equipped with a suitable coupling guard as required. Contractor to level and grout each unit according to manufacturer's instructions.

The motor shall be NEMA specifications and shall be the size, voltage and enclosure called for on the plans. Pump and motor shall be factory aligned, and shall be realigned by contractor after installation.

Each pump shall be factory tested. It shall then be thoroughly cleaned and painted with at least one coat of high grade machinery enamel prior to shipment.

Each pump shall be checked by the contractor and regulated for proper differential pressure, voltage and amperage draw. This data shall be noted on a permanent tag or label and fastened to the pump for owner's reference. Pump series shall be "Series 1510 " as manufactured by ITT Bell & Gossett.

CAST IRON CASING DESIGN DATA

125# Std. ANSI B16.1 Class 30 Iron	Max. Suction Press PSI	75 (5.2 bar)
	Max. Work Press PSI	175 (12 bar)
	Max Hydro Test Press PSI	262 (18 bar)
Flange Bolting (No.) & Size	Suction	(12) .88-9
	Discharge	(8) .75-10
	Stuff Box	(8) .62-11
Wall Thickness		.44 (11.18)
Distance To Casing Lip		7.25 (184.15)

STUFFING BOX DATA

Bore	3.000 (76.20)
Depth	2.12 (53.85)
Seal Cage Width	.38 (9.65)
Shaft Sleeve O.D.	2.000 (50.80)
A-Tap for Seal Cage NPT	.38 (9.65)
B-Tap for Mech. Seal NPT	.38 (9.65)
Mech. Seal Size (Crane Type 21 or Equal)	2.000 (50.80)

IMPELLER DESIGN DATA

No. of Vanes	6
Inlet Area in² (cm²)	50.27 (324.3)
Inlet Velocity per 100 GPM (Ft./Sec) (M/Sec)	64 (19.5)
Maximum Diam.	13.03 (331)
Minimum Diam.	8.07 (205)
Maximum Sphere	1.00 (25.4)
Wear Ring Clearance-Dia. (Optional)	.010-.014 (.025-.036)

All dimensions in inches (mm).

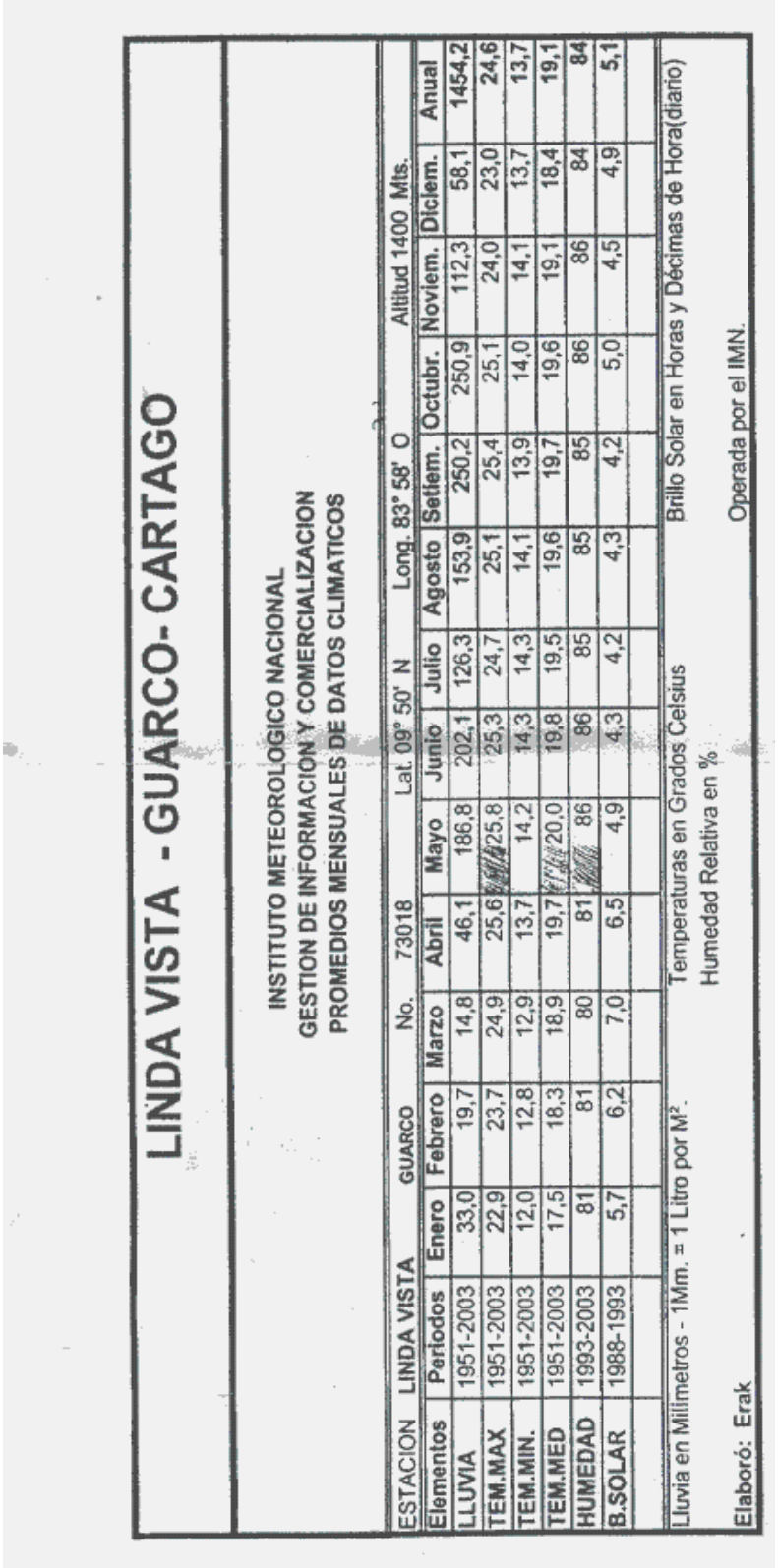
SHAFT AND BEARING DATA

Under Sleeve		1.750 (44.45)
At Coupling		1.625 (41.275)
Thru Impeller		1.625 (41.275)
Imp. Overhang Inb. Brg. ℄ to Imp. ℄		10.40 (264.16)
Shaft Span Bearing to Bearing ℄		10.40 (264.16)
Ball Bearings	Inboard	6309
	Outboard	6309

© COPYRIGHT 1995 BY ITT CORPORATION

ITT Bell & Gossett
ITT Fluid Technology Corporation

B.4 Promedios mensuales de datos climáticos en el sector de la planta



LINDA VISTA - GUARCO- CARTAGO

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
GESTION DE INFORMACION Y COMERCIALIZACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS

ESTACION LINDA VISTA GUARCO No. 73018 Lat. 09° 50' N Long. 83° 58' O Altitud 1400 Mts.

Elementos	Periodos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiem.	Octubr.	Noviem.	Diciem.	Anual
LLUVIA	1951-2003	33,0	19,7	14,8	46,1	186,8	202,1	126,3	153,9	250,2	250,9	112,3	58,1	1454,2
TEM.MAX	1951-2003	22,9	23,7	24,9	25,6	25,8	25,3	24,7	25,1	25,4	25,1	24,0	23,0	24,6
TEM.MIN.	1951-2003	12,0	12,8	12,9	13,7	14,2	14,3	14,3	14,1	13,9	14,0	14,1	13,7	13,7
TEM.MED	1951-2003	17,5	18,3	18,9	19,7	20,0	19,8	19,5	19,6	19,7	19,6	19,1	18,4	19,1
HUMEDAD	1993-2003	81	81	80	81	86	86	85	85	85	86	86	84	84
B.SOLAR	1988-1993	5,7	6,2	7,0	6,5	4,9	4,3	4,2	4,3	4,2	5,0	4,5	4,9	5,1

Lluvia en Milimetros - 1Mm. = 1 Litro por M². Temperaturas en Grados Celsius Brillo Solar en Horas y Décimas de Hora(diario)
Humedad Relativa en %

Elaboró: Erak Operada por el IMN.

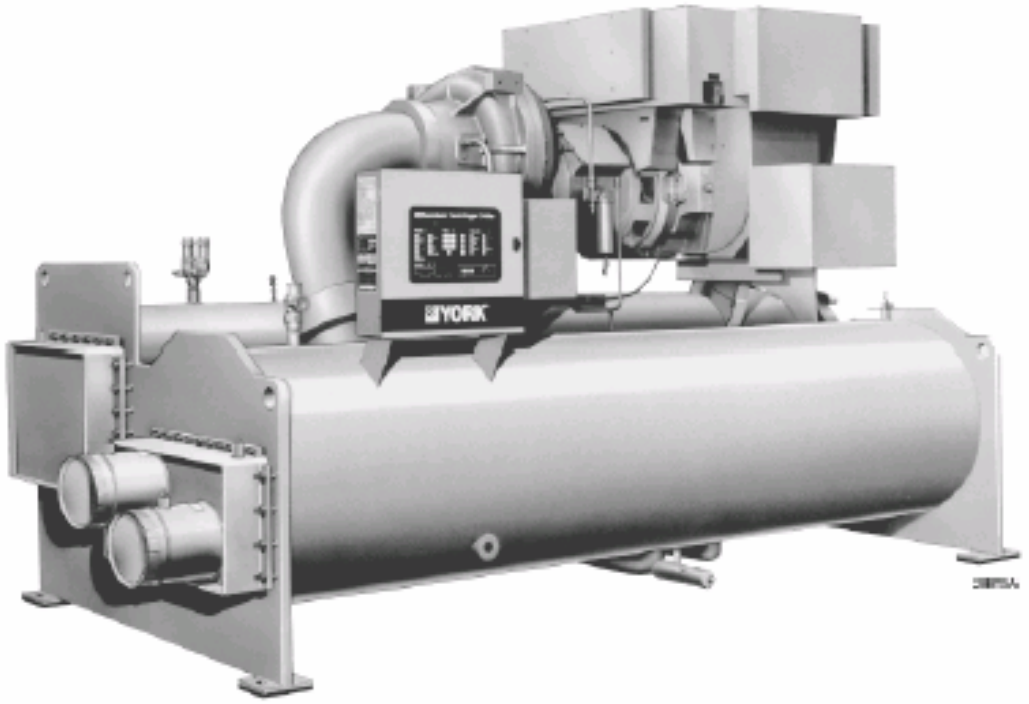
B.5 Datos técnicos del "chiller" *[23]*

YORK	*MILLENNIUM*™ CENTRIFUGAL LIQUID CHILLERS	
INSTALLATION INSTRUCTIONS	Supersedes: 160.52-N3 (1197)	Form 160.52-N3 (1198)

FIELD RE-ASSEMBLY FOR FORM 3 & FORM 7 SHIPMENT

MODEL YK CHILLERS (STYLE D)
R-134a (COOLING ONLY)

WITH MICROCOMPUTER CONTROL CENTER
PART # 371-01200-010, 371-01200-011 & 371-01200-015
FOR ELECTRO-MECHANICAL STARTER,
SOLID STATE STARTER & VARIABLE SPEED DRIVE



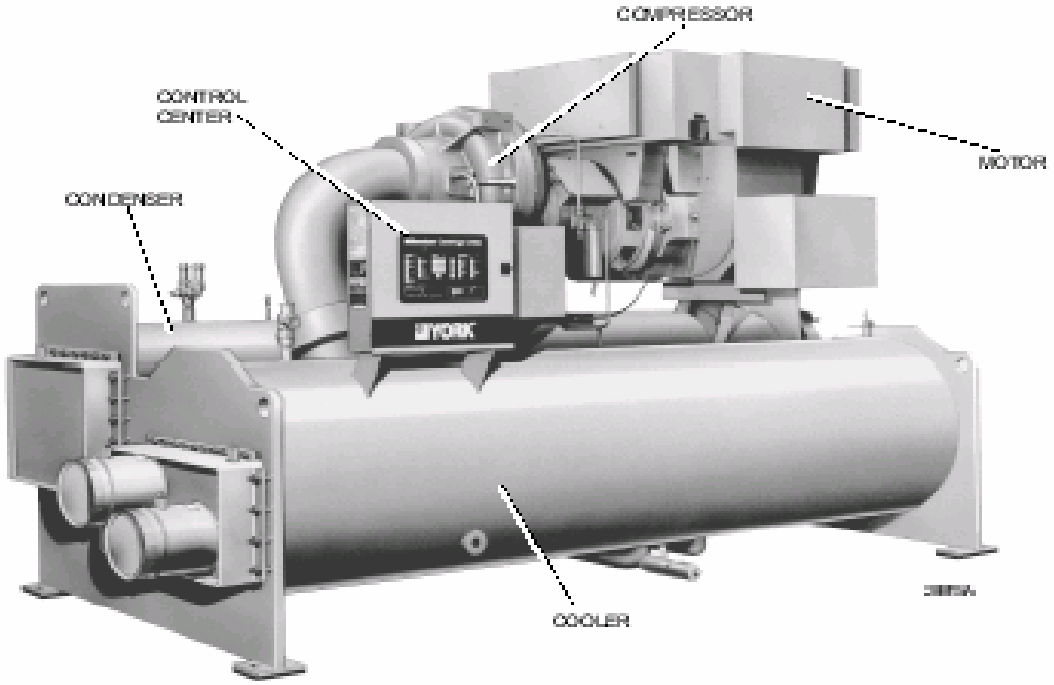


FIG. 1 – FRONT VIEW OF ASSEMBLED UNIT

REFERENCE INSTRUCTIONS:

INSTALLATION – FORM 160.52-N1
OPERATION – FORM 160.52-O1

GENERAL

This instruction explains the procedure to be used for reassembling the Model YK Millennium Chiller shipped disassembled. (Shipping Form 3 and 7.)

NOTE: Chillers MUST be field reassembled under the supervision of a YORK representative.

For Installation Instructions other than unit assembly, refer to Form 160.52-N1.

FORMS OF SHIPMENT

Form 3 – Driveline Separate From Shells – Shipped as two major assemblies. Unit first factory assembled, refrigerant piped, wired and leak tested; then dismantled for shipment. Close-coupled compressor/open motor assembly removed from shells and skidded. Evaporator/condenser is not skidded.

All wiring integral with compressor is left on it, and all conduit is left on shell. All openings on compressor, and shell are closed and charged with dry nitrogen (2 to 3 PSIG).

Miscellaneous packaging of Control Center, oil eductor filter, tubing, water temperature controls, wiring, oil, isolators, Solid State Starter or Variable Speed Drive (option), etc. Refrigerant charge shipped in appropriate cylinders.

Form 7 – Split Shells – Shipped as three major assemblies. Unit first factory assembled, refrigerant piped, wired and leak tested; then dismantled for shipment. Close-coupled compressor/open motor assembly removed from shells and skidded.

B.6 Datos de técnicos del actuador de las válvulas de tres vías *[22]*

Delta Control Products, Inc.
2031 West Rose Garden Lane
Phoenix, AZ 85027
Ph: 623-780-2408, Ph: 1-800-377-2600
Fax: 623-780-2571, Fax: 1-800-227-6500

Delta D24-210 On/Off - Floating Control Actuator

Wiring and Technical Specification Sheet

Specifications:

Model Number	D24-210
Power Requirements	20 to 30 VAC at 50/60 Hz or 24 VDC ± 10%; 7.5 VA Supply, Class 2
Input Signal	24 VAC at 50/60 Hzor 24 VDC
Input Signal Adjustments	Factory Setting: Terminals 1 and 2, CW rotation; Terminals 1 and 3, CCW rotation
Electrical Connection	1/4 in. spade terminals with pluggable 3-terminal blocks
Mechanical Connection	3/8 to 3/4 in. dia. round shaft or 3/8 to 5/8 in. square shaft
Mechanical Output	Running Torque: 210 in-lbs. (24 Nm)
Audible Noise Rating	45 dBA at 1 m
Rotation Range	0° to 90° in 5° increments, mechanically limited to 93°
Rotation Timing	130 Seconds at 50% load, 115 to 175 seconds for 0 - 210 in-lbs.
Cycle Life	100,000 full stroke cycles; 2,500,000 repositions rated at 210 in-lbs.
Enclosure	NEMA 2, IP42
Ambient Conditions	Operating -4° to 122° F(-20° to 50°C); 0 to 95% RH, non condensing Storage: -40° to 186° F(-40° to 86°C); 0 to 95% RH, non condensing
Dimensions (H x W x D)	7.09 x 3.94 x 2.54 in.
Shipping Weight	2.9 lb (1.3 kg)
Agency Compliance	UL 873 Listed, File E27734, CCN XAPX, CSA C22.2 No. 139 Certified, File LR85083, Class 3221 02, CE Mark, EMC Directive 89/336/EEC