

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA
OPTIMIZAR EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SISTEMA
DE AIRE ACONDICIONADO E ILUMINACIÓN DE UN
EDIFICIO CORPORATIVO DE OFICINAS EN LIMA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECATRÓNICO**

**ELABORADO POR:
DANTE ANDRES GARCIA MENESES**

**ASESOR
MSc. HERNAN CORTEZ GALINDO
LIMA – PERÚ
2019**

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres y a mi hermano. También dedico este trabajo a Belia, por ser quien eres.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser quien ilumina mi camino. Agradezco también a todas las personas que me han apoyado en poder terminar esta etapa tan importante en mi vida profesional, principalmente a mi asesor el Ing. Hernán Cortéz.

RESUMEN

El mercado global de edificios inteligentes se tasó en \$ 12,371 millones en 2017 y se proyecta que alcance los \$ 42,649 millones para 2024. Actualmente los diseños de control de edificios reducen la intervención del hombre mediante el uso de controles horarios preestablecidos u otros controles similares. Por otro lado, el ahorro de energía es una tendencia actual y como ingenieros debemos proporcionar las mejores soluciones para el control de los edificios. El objetivo del presente trabajo es la evaluación de diversas estrategias de control en un edificio y predecir su consumo de energía eléctrica anual utilizando un modelamiento energético mediante los programas Design Builder y Energy Plus. Se evaluó: el uso de variadores de frecuencia en la bomba secundaria de agua helada, en el motor del ventilador de la torres de enfriamiento y en los ventiladores de aire fresco; la optimización de la secuencia de operaciones de chiller respecto a la demanda instantánea; y controles de iluminación de luz natural y presencia. Además, se realizó el diseño de cada estrategia de control para el funcionamiento de los controladores de campo y principal. También, se comparó el ahorro de electricidad con el costo de implementar el sistema de control y se estimó el tiempo de retorno de inversión. Finalmente, se demostró que un diseño de control en edificios proporciona un ahorro de energía mayor al 17% y que el diseño de control en el edificio proporciona un adecuado confort térmico interior para los ocupantes del edificio y un retorno de inversión de 2 años.

ABSTRACT

The global smart building market was valued at \$ 12,371 million in 2017 and is projected to reach \$ 42,649 million by 2024. Currently, building control designs reduce human intervention through the use of pre-established time controls or other similar controls. On the other hand, energy saving is a current trend and as engineers we must provide the best solutions for the control of buildings. The aim of present work is the evaluation of various control strategies in a building and to predict its annual electricity consumption. Energy modeling has been used to calculate energy consumption through the Design Builder and Energy Plus programs. The evaluation includes: frequency drivers in the secondary pump of the chilled water demand circuit, in the fan motor of the cooling towers and in the outdoor air fans; optimization of the sequence of chiller operations with respect to instantaneous demand; and lighting controls for natural light and presence. Furthermore, the design of each control strategy and the sequence of operation of each of the field controllers and the main controller were performed. Also, the electricity savings were compared with the cost of implementing the control system and the time of return on investment was estimated. Finally, we will see that a control design in buildings provides an energy saving greater than 17% and it was demonstrated that the control design in the building provides adequate interior thermal comfort for the occupants of the building and a return on investment of 2 years.

INDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Antecedentes genéricos	5
1.2 Planteamiento de la realidad problemática.....	10
1.3 Objetivo general y objetivos específicos.....	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.2 Objetivos Específicos:	12
1.4 Hipótesis.....	13
1.4.1 Hipótesis General	13
1.4.2 Hipótesis Específicas:.....	13
1.5 Justificación de la investigación.....	13
1.6 Alcance de la investigación.....	14
1.7 Recursos empleados para la investigación	14
1.7.1 Útiles.....	14
1.7.2 Estado del arte	14
1.8 Metodología de la investigación.....	15
1.9 Variables e indicadores.....	15

1.9.1	Variable independiente.....	15
1.9.2	Variable dependiente.....	15
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO		16
2.1	Introducción a los sistemas de control	16
2.1.1	Control en lazo cerrado en comparación con el control en lazo abierto.....	17
2.2	Marco teórico relacionado con los edificios inteligentes	18
2.2.1	Definición de edificio inteligente	18
2.2.2	Evolución de Edificios Inteligentes.....	20
2.3	Sistemas de control en Edificios Inteligentes.....	23
2.3.1	Actuadores	24
2.3.2	Sensores	24
2.3.3	Controladores	24
2.4	Sistemas Integradores de control en Edificios	25
2.4.1	BMS (Building Managment System)	25
2.4.2	BAS (Building Automation System).....	26
2.5	Proveedores de sistemas integradores de control de edificios	26
2.5.1	Jhonson Control.....	26
2.5.2	Lutron	27

2.5.3	Honeywell.....	29
2.5.4	Schneider Electric.....	30
2.5.5	Carel	30
2.6	Certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design).....	31
2.6.1	Antecedentes.....	31
2.6.2	Características.....	31
2.6.3	Requisitos LEED relacionados con la automatización.....	33
2.6.4	Estándares Usados dentro de la Certificación LEED	35
2.7	Descripción de sistemas energéticos de climatización en las edificaciones ..	39
2.7.1	Bombas	39
2.7.2	Ventiladores.....	42
2.7.3	Enfriadoras	45
2.7.4	Torres de enfriamiento	47
2.8	Descripción de sistemas energéticos de Iluminación en las edificaciones.....	48
2.8.1	Sensor tipo PIR.....	50
2.8.2	Sensor tipo ultrasónico	51
2.8.3	Sensor tipo DUAL.....	52
2.8.4	Sensor de luz-día	52
2.9	Marco teórico relacionado al dispositivo de control	55

2.9.1	Variador de frecuencia (VFD- Variable Frequency Drive)	55
2.9.2	Sensor de CO2	56
2.9.3	Medidor de flujo	57
2.9.4	Transductor de corriente	57
2.10	Descripción de la metodología para la estimación del consumo de energía ..	58
2.10.1	Ingreso de parámetros en el software de simulación energética	59
2.10.2	Formato de reporte de resultados del software de simulación	62
CAPÍTULO III CÁLCULOS Y/O APLICACIONES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....		63
3.1	Sistema de aire acondicionado del edificio	63
3.1.1	Cálculo de cargas térmicas de cada ambiente y del edificio	64
3.1.2	Cálculo de equipos de aire acondicionado	72
3.1.3	Descripción del sistema de aire acondicionado en el edificio	76
3.2	Sistema de ventilación en el edificio	79
3.2.1	Cálculo de tasas de ventilación.....	79
3.2.2	Cálculo de equipos de ventilación	84
3.2.3	Descripción del sistema de ventilación en el edificio	86
3.3	Descripción del sistema de control del aire acondicionado	88
3.3.1	Narrativa de Requerimiento	88

3.3.2	Cuadro de señales de control.....	89
3.3.3	Planos de distribución de la planta de agua helada con componentes	91
3.3.4	Diagrama de Control de presión de agua en la demanda del edificio mediante variadores de frecuencia en bomba secundaria.....	93
3.3.5	Diagrama de Control de temperatura de agua de salida de la torre mediante variador de frecuencia en ventilador axial de la torre.....	94
3.4	Descripción del sistema de control de la ventilación	95
3.4.1	Narrativa de Requerimiento	95
3.4.2	Cuadro de señales de control.....	96
3.4.3	Diagrama de Control del nivel de dióxido de carbono.....	96
3.5	Cálculo del ahorro energético en climatización mediante software.....	98
3.5.1	Utilizar un variador de frecuencia en bomba secundaria de chiller ...	98
3.5.2	Utilizar un variador de frecuencia en el motor del ventilador de la torre de enfriamiento.....	102
3.5.3	Optimización del porcentaje de carga del chiller.	106
3.5.4	Utilizar sensores de CO2 de sala de reuniones y sala de capacitación.....	114
3.6	Sistema de iluminación en el edificio	118
3.6.1	Recomendaciones de niveles de iluminación.....	119

3.6.2	Cálculo de lúmenes por ambiente.....	120
3.6.3	Selección de luminarias por ambiente	121
3.6.4	Cálculo de densidad de potencia por ambiente	122
3.6.5	Luminarias seleccionadas por ambiente	125
3.7	Diseño del sistema de control de iluminación con sensores de luz día.....	126
3.7.1	Narrativa de requerimiento.....	126
3.7.2	Estrategia de ubicación.....	126
3.7.3	Diagrama de Control de luz natural.....	127
3.8	Diseño del sistema de control de iluminación con sensores de presencia....	129
3.8.1	Narrativa de requerimiento.....	129
3.8.2	Estrategia de ubicación.....	129
3.8.3	Cuadro de señales de control.....	129
3.8.4	Diagrama de Control por sensor de presencia.....	130
3.9	Cálculo de ahorro energético en iluminación mediante software	131
3.9.1	Resultados de ahorro por sensores de luz-día.....	131
3.9.2	Resultados de ahorro por sensores de movimiento	136
3.10	Integración de los sistemas de aire acondicionado, de ventilación y de iluminación.....	139
3.10.1	Lógica de control.....	140

3.10.2	Listado de entradas y salidas de las señales de control	141
3.11	Selección del sistema de automatización del edificio	147
3.11.1	Especificaciones del controlador principal de supervisión	147
3.11.2	Módulos de ingreso y salida	149
3.11.3	Especificaciones de controlador de campo.....	149
3.11.4	Especificaciones de sensores de ocupación de iluminación.....	150
3.11.5	Especificaciones del Relé.....	151
3.11.6	Especificaciones del Switch de corriente	152
3.11.7	Especificaciones del contactor de accionamiento	152
3.11.8	Especificaciones de la válvula motorizada by pass	153
3.11.9	Especificaciones del variador de frecuencia.....	153
3.11.10	Especificaciones del sensor de dióxido de carbono	154
3.11.11	Especificaciones del sensor de caudal de aire.....	154
3.11.12	Especificaciones del sensor de temperatura en tubería	155
3.11.13	Especificaciones del sensor de temperatura en ducto	155
3.11.14	Especificaciones del termostato	156
3.12	Filosofía del sistema de integración	156
3.12.1	Control del ventilador de aire fresco con variador de frecuencia.....	157
3.12.2	Secuencia de operaciones de la planta de agua helada:.....	159

3.12.3	Control de bomba secundaria con variador de frecuencia.....	160
3.12.4	Control de motor de ventilador de torre de enfriamiento con variador de frecuencia	161
3.12.5	Control del confort de temperatura por termostatos.....	162
3.12.6	Sistemas de iluminación mediante sensores de luz-día.....	163
3.12.7	Sistemas de iluminación mediante sensores de presencia.....	163
3.13	Diagrama de Control	164
3.14	Estructura de costo del equipamiento.....	164

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....167

4.1	Análisis descriptivo	167
4.2	Contrastación de hipótesis.....	171

CONCLUSIONES..... 173

RECOMENDACIONES..... 175

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 177

ANEXO 1: PLANOS

ANEXO 2: VISTA DEL EDIFICIO EN EL MODELAMIENTO ENERGÉTICO Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

ANEXO 3: CÓDIGO DE SIMULACIÓN DE CADA ESTRATEGIA DE CONTROL

ANEXO 4: DIAGRAMA DE CONEXIONES DE CONTROLADORES Y EQUIPOS DE CAMPO

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de bloques de la optimización del consumo energético de climatización en un edificio.	8
Figura 1.2 Automatización en las edificaciones.	10
Figura 2.1 Diagrama de automatización en edificios de primera generación	21
Figura 2.2 Diagrama de automatización en edificios de segunda generación	22
Figura 2.3 Diagrama de automatización en edificios de tercera generación.....	23
Figura 2.4 Distribución del sistema de automatización en un edificio	26
Figura 2.5 Curva de flujo de agua mínimo y máximo dependiendo del control de diferencial de presión	42
Figura 2.6 Curvas típicas para los tipos de ventiladores centrífugos.	44
Figura 2.7 Comparación entre varios tipos de ventiladores	44
Figura 2.8 Chiller y sus componentes principales.	46
Figura 2.9 Diagrama de funcionamiento de un control de iluminación.....	49
Figura 2.10 Funcionamiento de los detectores PIR	50
Figura 2.11 Funcionamiento de un sensor ultrasónico.....	51
Figura 2.12 Control de la iluminación con tres niveles	54
Figura 2.13 Relación entre la potencia de consumo de las luminarias y la fracción de iluminación.....	55

Figura 2.14 Variador de frecuencia.....	56
Figura 2.15 Estructura de EnergyPlus.....	59
Figura 2.16 Elemento internos de EnergyPlus.....	60
Figura 2.17 Arquitectura de simulación de lazos de control en EnergyPlus	62
Figura 3.1 Plano de distribución de planta de agua helada.....	92
Figura 3.2 Sistema de control en lazo cerrado para el monitoreo de la presión en circuito secundario de chiller.	93
Figura 3.3 Sistema de control en lazo cerrado para el monitoreo del ventilador de la torre de enfriamiento.....	94
Figura 3.4 Sistema de control en lazo cerrado para el monitoreo de CO ₂	97
Figura 3.5 Bombas de la planta de agua helada del edificio.....	99
Figura 3.6 Bomba secundaria de velocidad variable de la planta de agua helada del edificio.....	100
Figura 3.7 Bomba primarias y de condensado de la planta de agua helada del edificio.....	100
Figura 3.8 Comparación del consumo anual de energía caso bombas (Valores en kWh).....	101
Figura 3.9 Torre de enfriamiento de velocidad constante de la planta de agua helada del edificio.....	103

Figura 3.10 Configuración de la operación del control de temperatura a la salida del agua de la torre de enfriamiento.....	104
Figura 3.11 Torre de enfriamiento de velocidad variable de la planta de agua helada del edificio.....	104
Figura 3.12 Comparación del consumo anual de energía caso torres (Valores en kWh).....	105
Figura 3.13 Condiciones de diseño para el circuito del evaporador del modelamiento energético.	108
Figura 3.14 Condiciones de operación para el circuito del evaporador del modelamiento energético.	108
Figura 3.15 Condiciones de reset para el circuito del evaporador del modelamiento energético.	109
Figura 3.16 El parámetro modificado ha sido en Límite máximo de Carga térmica dentro del objeto schematic operation cooling load.....	110
Figura 3.17 Selección del funcionamiento del chiller en base a rango de carga térmica.....	111
Figura 3.18 Valores del parámetro modificado en Watts.	111
Figura 3.19 Comparación del consumo anual de energía caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).	112
Figura 3.20 Comparación del consumo anual por chillers caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).	112

Figura 3.21 Comparación del consumo anual por bombas caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).	113
Figura 3.22 Comparación del consumo anual por torre de enfriamiento caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).	114
Figura 3.23 Selección del control de demanda de ventilación para el inyector de la sala de reuniones y sala de capacitación.	115
Figura 3.24 Parámetros de nivel de CO2 límites para cada ambiente.	116
Figura 3.25 Ratio de generación de CO2 por cada ambiente.....	116
Figura 3.26 Comparación del consumo anual de energía caso ventiladores.....	117
Figura 3.27 Zona de influencia de sensores de luz-día -en rosado-.....	127
Figura 3.28 Sistema de control en lazo cerrado para el control de luz natural.	128
Figura 3.29 Sistema de control en lazo abierto para el control de luz con sensores.	131
Figura 3.30 Control on/off de iluminación con sensor luz día.....	132
Figura 3.31 Control de tres pasos de iluminación con sensor luz día.....	133
Figura 3.32 Control de atenuación de iluminación con sensor luz día	134
Figura 3.33 Comparación del ahorro de iluminación para cada una de las estrategias de sensores de luz día.....	135
Figura 3.34 Comparación del consumo anual de energía caso sensores de luz día.	136
Figura 3.35 Comparación del consumo anual de energía caso sensor de presencia.	138

Figura 3.36 Nivel de CO2 indicado en el sistema de control BMS.	158
Figura 3.37 Caudal de ventiladores en CFMs indicado en el sistema de control BMS.	158
Figura 3.38 Parámetros recopilados del chiller en el sistema de control BMS.....	159
Figura 3.39 Diagrama de comunicación del sistema de control BMS.....	164
Figura 4.1 Comparación del consumo anual de energía edificio sin control vs edificios con controles para climatización e iluminación.	168
Figura 4.2 Comparación del consumo anual de energía edificio sin control vs edificio con todos los controles simulados para climatización e iluminación.	169

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Tipos de sistemas de control de iluminación.....	48
Tabla 2-2 Ejemplo de un control de iluminación por pasos con tres niveles.....	54
Tabla 2-3 Parámetros ingresados en los modelamientos energéticos de edificaciones	60
Tabla 3-1 Cuadro Resumen de Cálculo de Carga Térmica.....	71
Tabla 3-2 Enfriadoras del Sistema De Aire acondicionado	77
Tabla 3-3 Bombas del Sistema De Aire acondicionado.....	78
Tabla 3-4 Torre de enfriamiento del Sistema De Aire acondicionado.....	79
Tabla 3-5 Caudales de aire para cada ambiente del edificio	83
Tabla 3-6 Equipamiento del sistema de ventilación del edificio	87
Tabla 3-7 Señales de control de bombas, torres y chillers	90
Tabla 3-8 Señales de control de termostatos y Fan Coils.	91
Tabla 3-9 Señales de control del sistema de ventilación.....	96
Tabla 3-10 Desglose del consumo anual de energía	102
Tabla 3-11 Desglose del consumo anual de energía	106
Tabla 3-12 Eficiencias de Chillers de la planta de agua helada.....	109
Tabla 3-13 Desglose del consumo anual de energía	118
Tabla 3-14 Tabla de iluminancias para ambiente al interior.....	119

Tabla 3-15 Cálculo de lúmenes totales por ambiente.	121
Tabla 3-16 Cálculo de lúmenes mínimo por lámpara	122
Tabla 3-17 Luminarias en sótanos del 1 al 4.....	123
Tabla 3-18 Luminarias en el Piso1	124
Tabla 3-19 Luminarias en el Piso típico: del 2 al 14.....	124
Tabla 3-20 Luminarias en la Azotea:	125
Tabla 3-21 Señales de control de iluminación	130
Tabla 3-22 Desglose del consumo anual de energía	135
Tabla 3-23 Porcentaje de reducción de potencia de iluminación por sensores de ocupación	137
Tabla 3-24 Desglose del consumo anual de energía	139
Tabla 3-25 Lista de señales de control de la planta de agua helada.....	142
Tabla 3-26 Lista de señales de control de demanda de ventilación	144
Tabla 3-27 Lista de señales de control de iluminación	144
Tabla 3-28 Lista de señales de control de confort interior.....	146
Tabla 3-29 Lista de equipos del sistema de control centralizado.....	165
Tabla 3-30 Lista de equipos para optimización de consumo de energía en climatización	165

Tabla 3-31 Lista de equipos para optimización de consumo de energía en iluminación.....	166
Tabla 4-1 Inversión por estrategia de control	170
Tabla 4-2 Retorno de inversión de cada estrategia de control	171

LISTA DE ACRÓNIMOS

ANSI: Instituto Nacional Americano de Estándares.

ASHRAE: Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

CFL: luces fluorescentes compactas

CO₂: dióxido de carbono

DOE: Departamento de Energía

HVAC: calefacción, ventilación y aire acondicionado.

IES: Sociedad de ingenieros de iluminación de Norteamérica.

kWh: kilovatios hora

LED: diodo emisor de luz

LEED: Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental

PIR: infrarrojo pasivo

RNE: Reglamento Nacional de Edificaciones

VLT: transmisión visible de luz

PRÓLOGO

La presente tesis muestra el diseño de un sistema de automatización de la iluminación y el aire acondicionado de un edificio de oficinas. Se ha considerado principalmente la automatización que logre un ahorro energético importante en las operaciones, por lo que el análisis de la presente tesis va más allá de solo automatizar para disminuir las horas hombre de supervisión o control cuando un edificio se opera manualmente, sino también optimizar los consumos desde el punto de vista energético. Para su desarrollo ha sido necesario diversas aplicaciones de la ingeniería como la simulación energética de edificaciones, la definición de diversas estrategias de control, fundamentos de mecánica y transferencia de calor, mecánica de fluidos para finalmente realizar una selección de equipamiento de control y su lógica de control; recurriendo para ello, a la investigación y a los conocimientos adquiridos durante la formación universitaria. Para una buena comprensión de este trabajo, se deben tener en cuenta ciertos conocimientos de termodinámica, aire acondicionado, electrónica general, teoría de control y programación.

El contenido está organizado en 4 capítulos. En el **capítulo 1** se presenta la introducción al trabajo elaborado; en el que se menciona los antecedentes, se identifica el problema y la hipótesis principal, se plantean los objetivos, justificación, alcance y recursos empleados para la investigación. En el **capítulo 2** se muestra el marco teórico

en el que se detallan los métodos, principios, teoremas y fórmulas que han sido utilizados para el desarrollo de la tesis, dividido en cuatro aspectos; el primero relacionado con la energía; el segundo, con la mecánica; el tercero, con el dispositivo de control; y el cuarto, con la selección, programación y secuencia de operaciones. En el **capítulo 3** se detalla la solución del problema, primero se describe los sistemas de aire acondicionado y de iluminación en el edificio, para después realizar el diseño del sistema de control de climatización e iluminación y la integración con el sistema de automatización BMS, el cual incluye la lógica y las condiciones de control. Además de realizar los cálculos respectivos de ahorro energético por cada medida de control adoptadas. En el **capítulo 4** se realiza el análisis de los resultados y se valida la hipótesis.

Adicionalmente se agregan en el **anexo 1** los planos de diagramas de automatización, en el **anexo 2** se detalla la simulación energética de las diversas estrategias de control aplicadas en la presente tesis, en el **anexo 3** se muestran los códigos utilizados en las simulaciones de cada estrategia de control en Energy Plus y en el **anexo 4** se muestran las especificaciones técnicas de equipamiento seleccionado detalladamente.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los edificios no han experimentado los cambios de la tecnología en un mismo nivel que otros grandes sistemas, como son la fabricación de automóviles, la automatización industrial o los sistemas de manufactura avanzados, es en ese contexto, que diversas disciplinas se han desarrollado para automatizar los sistemas en un edificio, pero no llegando a un sistema integral. En los últimos años se está experimentando un cambio de paradigma con referencia a los sistemas inteligentes y de control en los edificios.

“El entorno construido tiene un profundo impacto en nuestro entorno natural, la economía, salud y productividad. Los avances en la ciencia de la construcción, la tecnología y las operaciones están ahora disponibles para los diseñadores, constructores, operadores y propietarios que quieren construir por el bienestar de los ocupantes, maximizar el rendimiento económico y medioambiental.” (U.S. Green Building Council, 2013, págs. 4,5). Al ser el cambio climático un problema de interés social mundial, se han ido desarrollando diversas tecnologías para disminuir los consumos energéticos en las edificaciones, una de ellas es el sistema de certificación LEED, la cual abarca desde la concepción, el diseño, construcción, operación y

demolición del edificio, se basa en tres pilares, los cuales son el cuidado del medio ambiente, un proyecto que genere rentabilidad y el bienestar hacia las personas.

El mercado global de edificios inteligente se tasó en \$ 12,371 millones en 2017 y se proyecta que alcance los \$ 42,649 millones para 2024, creciendo a una tasa anual de 19.6% de 2018 a 2024. Factores como la necesidad de mejorar de eficiencia energética incrementa el mercado de sistemas de control y automatización de edificios, así como también una mayor adopción de los sistemas de administración de energía de edificios impulsan el crecimiento del mercado de edificios inteligentes. (Research and Market , 2018)

En el país ha existido una suerte de boom inmobiliario, donde la cantidad de edificaciones se han incrementado paulatinamente año tras año, de acuerdo al XVI Estudio de "El Mercado de Edificaciones Urbanas en Lima Metropolitana y el Callao" realizado en el 2011 anuncia: "Los resultados del censo de obras en proceso de construcción, realizado en julio de 2011, reportaron una actividad edificadora de Lima Metropolitana y el Callao que en términos de metraje construido asciende a un total de 6 143 212 m², cifra superior en 20,87% frente a la actividad edificadora del año 2010 explicada por el crecimiento sostenido de la economía durante los últimos meses del año 2010 e inicios del 2011 al que habría que añadir el stock acumulado de unidades habitacionales." (CAPECO, 2011), además la actividad edificadora ha aumentado en 86% entre el 2008 y el 2011. Si bien entre el 2013 y 2014 la economía peruana se estancó por temas coyunturales y externos al país, en este año 2017 se han terminado diversos proyectos de oficinas de gran magnitud, tal como los edificios ubicados en la zona financiera de San Isidro, en la zona comercial de San Borja y en

Miraflores. Varios de estos edificios ya ahora construidos y operando, requieren de un sistema que pueda optimizar su consumo de energía en su funcionamiento.

El Perú ha experimentado en los últimos años un cambio de paradigma con referencia a la construcción sostenible y eficiencia energética, calidad del ambiente interior y confort, de acuerdo al US Green Building Council el total de proyectos inscritos para aplicar a la certificación LEED, la cual es una distinción de edificios verdes, fue de 7 proyectos en el 2010, 57 en el 2012, 123 en el 2014 hasta 219 al finalizar el año 2018. Esta distinción se basa en el diseño, construcción y operación del edificio, además de integrar el sistema constructivo de modo que genere sinergias entre cada una de las diferentes especialidades para optimizar los consumos y operaciones.

En la actualidad, al ser generalmente los edificios para diversos usos, y operados por distintas administradoras, se han ido desarrollando los sistemas de compatibilidad entre diversas tecnologías por los proveedores de controles o sistemas de manejo de edificios, siendo aún un desafío por resolver.

1.1 Antecedentes genéricos

“El impacto ambiental del diseño edilicio, su construcción y operación es enorme. Como ejemplo, los edificios en los Estados Unidos son responsables del 40% del consumo de energía primaria y más del 38% de las emisiones de dióxido de carbono por año globales” (U.S. Green Building Council, 2013, págs. 4,319). Por tal motivo, los ingenieros utilizan diversas técnicas para reducir las necesidades energéticas de los edificios. La automatización de un edificio y la inclusión de sistemas inteligentes contribuyen a una reducción en

el uso de la energía. Los edificios automatizados promueven el ahorro de energía, incrementan el confort en los ocupantes además de generar ahorro de dinero. Estos sistemas se basan, por ejemplo, en generar reportes de consumo de energía, apagar las luces en ambientes desocupados mediante sensores, atenuar la iluminación con relación al ingreso de luz natural, controlar los sistemas y optimizar el funcionamiento en general de los sistemas mecánicos y de aire acondicionado en los edificios.

Se toma como antecedente la tesis de ingeniería eléctrica realizada por Mayra López, la cual es un Análisis energético del pabellón IEE según certificación LEED. En esta tesis se muestran diversos análisis de medidas de eficiencia energética aplicables a un pabellón educativo, tal como aprovechamiento de la ventilación natural mediante abertura de ventanas (Lopez Castellanos, Rojas Herrera, & Ruiz Maldonado, 2012, p. 75) y aprovechamiento de la iluminación natural mediante el uso de sensores de luz-día (Lopez Castellanos, Rojas Herrera, & Ruiz Maldonado, 2012, p. 115), para el análisis el autor utilizó el software Ecotect.

El departamento de energía de Estados Unidos de América proporciona una metodología para optimizar los criterios de diseño de edificios para reducir los costos de energía durante sus operaciones. Incluso, este departamento ha desarrollado un software para simular cada una de las estrategias aplicables en los edificios: EnergyPlus. El departamento de energía de Estados Unidos no sólo se enfoca en el ahorro de energía en edificios, sino en diversas

aplicaciones, como también es el caso de las plantas industriales (Pajares Correa, 2013, pp. 5,6)

Existen técnicas modernas de control para optimizar el consumo de energía y el funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado e iluminación en edificios. Varias de estas técnicas han sido validadas mediante un modelamiento energético en EnergyPlus u otros programas de simulación. Por ejemplo, el software HVACSIM+ y métodos de algoritmos genéticos ha sido utilizado para describir el comportamiento energético de seleccionar cierta cantidad de superficie vidriada en un edificio y evaluar su impacto indirecto en el consumo de energía de equipos de aire acondicionado por el incremento o disminución de carga térmica debido a los vidrios. (Caldas & Norford, 2003, pp. 347-348). Algoritmos genéticos también ha sido utilizado para una investigación de optimización de los controladores de aire acondicionado en edificios, con la cual se trata de establecer los valores para el control PID que proporcionen el mejor control con menor oscilación y menor tiempo de respuesta, también se utilizó el software HVACSIM+. (Huang & Lam, 1997)

Algunas de las estrategias de control aplicando teorías de control moderno mediante regulador óptimo y adaptativo han sido utilizadas para el diseño del control de los sistemas de climatización en edificios inteligentes. (Zaheer-Uddin, 1993).

Otros métodos para optimizar los sistemas de control es por lógica difusa, en un artículo se ha tratado de diseñar el controlador considerando variables de temperatura, humedad y nivel de CO₂ para la planta, asimismo, la planta siguió

el modelo Takagi-Sugeno-Kang. El autor realizó sus cálculos y diseños respectivos en MATLAB. (Yordanova, 2017, p. 164)

Los sistemas de control anteriormente descritos optimizan el uso de cada uno de los sistemas en el edificio, sin embargo, el consumo anual se ve reflejado tanto por el control como por las decisiones de diseño, de instalación y de operaciones desde un punto de vista holístico. Las variables que intervienen para optimizar el consumo de energía en los edificios pueden ser muchas, en el diagrama de bloque se indican algunas de estas variables a manera de referencia en la figura 1.1.

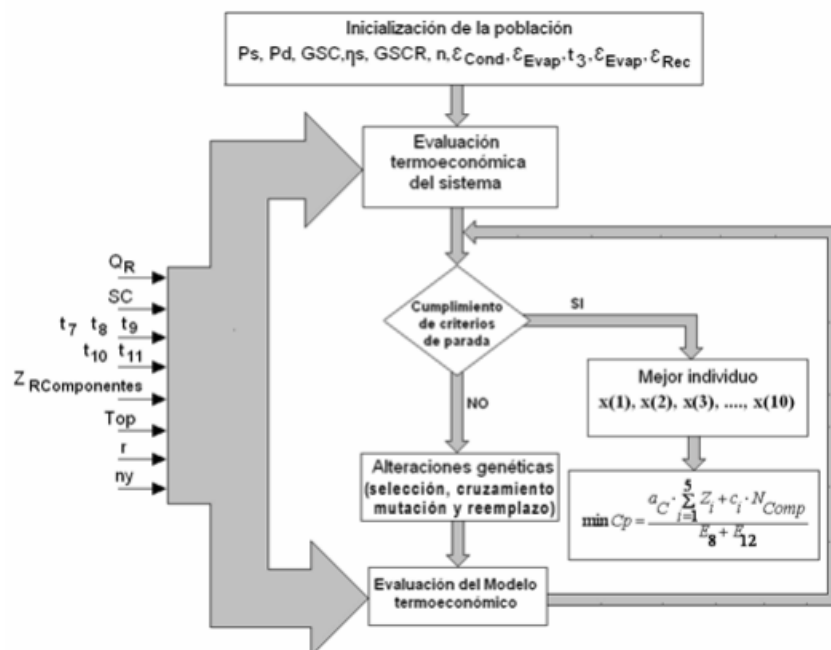


Diagrama de bloques de funcionamiento del algoritmo genético simple para la optimización del sistema de climatización centralizada por agua helada

Figura 1.1 Diagrama de bloques de la optimización del consumo energético de climatización en un edificio.

Fuente: (Valdivia-Nodal, Lapidó-Rodríguez, & Gómez Sarduy, 2012)

Cada sistema es lo suficientemente complejo como para que en una tesis se pueda abarcar todo el diseño del control de un edificio, por ejemplo, existe una tesis de maestría que se enfoca únicamente en la optimización de la temperatura de suministro de aire para sistemas con ventiladores de velocidad constante. (Fan, 2008)

En el presente trabajo se pretende diseñar el sistema de control en donde el principal valor se encuentra en la reducción del consumo de energía para lo cual se evalúan diversas estrategias de control para finalmente escoger la que sea óptima desde el punto de vista energético. El edificio de oficinas en estudio se encuentra en la avenida del Golf de los Incas, Camacho, Lima. Este edificio será diseñado de acuerdo al sistema de calificación LEED. Dentro de este sistema de certificación, se ha creado una sinergia entre las especialidades, el cual plantea un edificio automatizado.

Es en este marco que la tesis se plantea en diseñar un edificio de oficinas que cumpla con los requerimientos de automatización del sistema de aire acondicionado e iluminación que permita optimizar el consumo de energía.

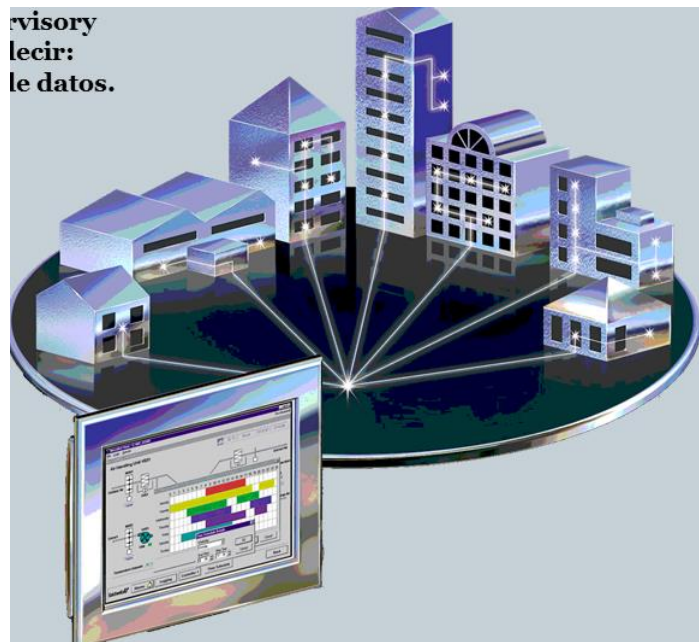


Figura 1.2 Automatización en las edificaciones.

Fuente: Empresa eBD

1.2 Planteamiento de la realidad problemática

Los sistemas de control y automatización en edificios ha sido materia de estudios y aplicaciones para el ahorro de energía y en sistemas domóticos en edificios, pero no se ha considerado un sistema que pueda integrar otros aspectos importantes también. Es en ese contexto, que se ve la necesidad de una metodología para el diseño de un sistema de automatización que involucre a la persona, el medio ambiente y la rentabilidad de un proyecto.

Particularmente, el problema de falta de indicadores que demuestren los beneficios de diseñar un sistema de automatización para un edificio considerando el clima de Lima, no permite el desarrollo de la automatización

en este campo, dando como resultado grandes gastos energéticos por el uso de edificios de forma ineficiente.

Por ello, en el presente trabajo se formula la siguiente pregunta general:

¿De qué manera la automatización del sistema de control de iluminación y aire acondicionado de un edificio de oficinas en Lima ubicado en Camacho logrará confort térmico interior, ahorro de energía y rentabilidad económica de la inversión?

Adicionalmente, se formulan las siguientes preguntas específicas:

¿De qué manera la automatización del sistema de aire acondicionado y la iluminación de un edificio de oficinas en Lima ubicado en Camacho logrará un adecuado confort térmico interior para los ocupantes del edificio de acuerdo al estándar de calidad interior ANSI/ASHRAE 62.1-2010 y confort térmico ANSI/ASHRAE 55-2010?

¿Cuánto es el tiempo de retorno de la inversión del sistema de automatización del sistema de aire acondicionado y la iluminación de un edificio de oficinas en Lima ubicado en Camacho?

¿De qué manera la automatización del sistema de aire acondicionado y la iluminación de un edificio de oficinas en Lima ubicado en Camacho reducirá el consumo de energía en no menos del 17% comparado con un edificio que no considera estrategias de control automatizadas?

1.3 Objetivo general y objetivos específicos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar el sistema de automatización del sistema de aire acondicionado e iluminación de un edificio de oficinas en Lima aplicando diversas estrategias para lograr confort, ahorro de energía y un proyecto económicamente rentable.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Diseñar el sistema de control del aire acondicionado y la iluminación de un edificio de oficinas en Lima considerando el confort interior de acuerdo al estándar de calidad interior ANSI/ASHRAE 62.1-2010 y confort térmico ANSI/ASHRAE 55-2010.
- Cuantificar el tiempo de retorno de la inversión del sistema de automatización del sistema de aire acondicionado y la iluminación de un edificio de oficinas en Lima.
- Simular las diversas estrategias de control y estimar el ahorro energético de 17% comparado con un edificio que no considera estrategias de control automatizadas.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

Mediante el diseño de un sistema inteligente para el control de iluminación y aire acondicionado aplicando diversas estrategias de control se logrará confort, ahorro de energía y un proyecto económicamente rentable.

1.4.2 Hipótesis Específicas:

- Mediante el diseño del sistema de control del aire acondicionado y la iluminación de un edificio de oficinas en Lima logrará un adecuado confort interior para los ocupantes del edificio de acuerdo al estándar de calidad interior ANSI/ASHRAE 62.1-2010 y confort térmico ANSI/ASHRAE 55-2010.
- Mediante el diseño del sistema de control del aire acondicionado y la iluminación de un edificio de oficinas en Lima se logrará un retorno de la inversión.
- Mediante las estrategias de control de automatización para el sistema de climatización e iluminación se reducirá el consumo de energía en no menos del 17% comparado con un edificio que no considera estrategias de control automatizadas.

1.5 Justificación de la investigación

Diseñar un sistema de control de iluminación y aire acondicionado es una sofisticación que se pretende dar a un edificio, cuya visión es cumplir con un

ahorro de energía; además con ello se pone en práctica diversos fundamentos de ingeniería mecánica, de informática y de control.

1.6 Alcance de la investigación

Desarrollar el diseño de control de iluminación y aire acondicionado de un edificio de oficinas de uso corporativo, para luego calcular el porcentaje de ahorro energético mediante software de simulación.

1.7 Recursos empleados para la investigación

1.7.1 Útiles

- Hardware: Laptop Presario CQ43, procesador Intel Core i3
- Software: Autocad 2015, Design Builder v4.5.012, Energy Plus V8-5-0 y Excel 2013

1.7.2 Estado del arte

En la actualidad se realizan sistemas de control en edificios enfocados en la seguridad, circuitos cerrados de televisión o vigilancia remota, control de acceso, en sistema de detección de humos y alarmas contra incendios, y también del funcionamiento de sistemas de aire acondicionado y de iluminación. Estos sistemas de control han surgido por la demanda de entregar edificios seguros y automatizados, sin embargo, ahora los desarrolladores de edificios buscan un plus que se puede lograr mediante la automatización de la iluminación y el sistema de automatización no del enfoque de funcionamiento de los sistemas, sino del ahorro de energía.

Es por ello que la tesis se enfoca en lograr un control de la iluminación y del sistema de climatización; con la diferencia que no buscar unas operaciones automatizadas, sino de lograr un gran ahorro de la energía. Para lograr esto, se ha utilizado un software de simulación energética, el cual nos indican en ahorro de energía por cada medida de control utilizada, la simulación ha seguido la metodología LEED.

1.8 Metodología de la investigación

Cuantitativo, se evalúa cada una de las variables del sistema de control para la iluminación y aire acondicionado. Mediante cálculos se realiza el diseño de componentes de los sistemas de aire acondicionado e iluminación.

Sistemático, se evalúa el sistema diseñado como un conjunto. Se determina el ahorro de energía del diseño del sistema de automatización del edificio para cada una de las estrategias de control. También, se determina el ahorro total de las estrategias aplicadas en el edificio.

1.9 Variables e indicadores

1.9.1 Variable independiente

La variable independiente es cada estrategia de control del sistema de automatización para el sistema de aire acondicionado e iluminación.

1.9.2 Variable dependiente

La variable dependiente es la optimización del consumo de energía y el retorno de inversión logrado en base a cada estrategia de control.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción a los sistemas de control

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. (Ogata, 2003, p. 3).

Un sistema de control es un conjunto de componentes que interactúa entre sí en base a condiciones externas que son medidas para ejecutar determinadas acciones mediante el uso de un controlador. Para realizar el control, al sistema se divide en procesos, siendo un proceso una operación en donde se espera un determinado resultado en base a cambios progresivos o acciones específicas. Los procesos generalmente son complejos, es por eso, que este se divide en sub-procesos que la formulas sean conocidas mediante un modelo matemático, al cual llamamos planta, por ende, las acciones de control se realizan en las plantas.

En un sistema de control las condiciones externas pueden ser controladas o no, en el caso de ser controladas se realiza su medición y control, cuando no se puede controlar se conoce como perturbación ya que es una variable que afectará al proceso de forma negativa o positiva. Para controlar las variables en

el sistema se realiza una acción sobre otras variables en las cuales existe una relación que dará como resultado la modificación deseada en la variable controlada. A estas variables se les conoce como variables manipuladas, ya que gracias a ellas se tendrá un resultado en la variable controlada.

2.1.1 Control en lazo cerrado en comparación con el control en lazo abierto

Un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado o sistemas de control en lazo cerrado.

Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. (Ogata, 2003, p. 7). Por ejemplo, un sistema de control en lazo cerrado es el control de un motor en donde se puede medir la corriente de salida y que ingrese esta nuevamente como un parámetro de entrada. En cambio, un control en lazo abierto sería la activación de un sensor de luz en base al nivel de personas, el resultado de esta acción no se mide y tampoco se ingresa como variable de entrada.

2.2 Marco teórico relacionado con los edificios inteligentes

2.2.1 Definición de edificio inteligente

Podemos definir a un edificio inteligente al cual posee un sistema de control automático que permite el funcionamiento de este en base a lógicas predefinidas previamente, las cuales en base a información recopilada por sensores operará de manera autónoma.

Un edificio inteligente no necesariamente requiere del ingreso de parámetros por una persona, pero si es de ayuda para mejorar ciertas condiciones como el confort de temperatura cuando se cambia este valor en los termostatos.

Una forma de contar con un edificio inteligente es mediante un sistema que realice la gestión automática de este, el cual es llamado un sistema de gestión de edificios. Este sistema permite definir el funcionamiento a detalle de cada uno de los componentes en el edificio, para esto todos los equipos del edificio deben estar conectados con este sistema, la conexión se realiza de forma física o inalámbrica, siempre se debe poseer una comunicación compatible que permita la lectura de señales y la acción en los controladores. Generalmente estos sistemas permiten la integración de otros sub-sistemas ya que poseen varios tipos de comunicación, además de la capacidad de ser expandibles, es decir, que se puede controlar más cosas utilizando nuevos sensores y actuadores utilizando el controlador principal del edificio.

Otra forma de lograr un edificio inteligente es mediante controladores que sean capaces de realizar acciones en base a señales de entrada específicas. Por

ejemplo, en la actualidad varios de los edificios en Lima poseen un sistema de alarmas contra incendio, la cual es compuesta por sensores de humo en puntos específicos y un panel de acción comandada por un controlador y válvulas de agua motorizadas. Cuando se activa una alarma por sensor de humo, pasa un tiempo de pocos segundos para que se pueda desactivar la alarma. En caso la alarma no se desactive, el sistema entiende que hay un incendio y activa las válvulas, permitiendo el paso de agua por los aspersores para difuminar el fuego. Estos sistemas generalmente poseen un solo protocolo de comunicación la cual no permite integrarla con otros sub-sistemas, además su nivel de expansión es limitado y solo asociada a funcionamientos similares del sistema principal.

“A finales de los 90 y principios de este siglo, el concepto de edificio inteligente evolucionó hacia la eficiencia energética y la sostenibilidad mediante la introducción del código BREEAM (1990) y el programa LEED (2000). A finales de la década pasada, dada la creciente convergencia de inteligencia y sostenibilidad, un estudio de Frost and Sullivan encargado por la Asociación Continental de Edificios Automatizados (Continental Automated Buildings Association), creó el término “Bright Green Buildings” (Edificios brillantes y verdes) para inmuebles que son tanto inteligentes como verdes.” (Díaz Mínguez, 2015).

Un edificio inteligente, tal como se indica en el párrafo anterior, ha evolucionado a considerar requerimientos como las certificaciones ambientales LEED, el cual se detallará su relación en la sección 2.6.

2.2.2 Evolución de Edificios Inteligentes

2.2.2.1 Primera Generación

La primera generación de los sistemas inteligentes en edificios es del tipo maestro/esclavo.

Características:

Un dispositivo de control maestro sencillo o un panel toma las decisiones de control.

El controlador Maestro continuamente solicita datos a los dispositivos de entrada y direcciona los dispositivos de salida con esos valores:

Arquitectura centralizada

Procesador centralizado

Inteligencia no integrada

Punto de fallo único

Dificultad de ampliación

Costoso de instalar, necesita más cables para conectar sensores y actuadores

Modelo de programación propietaria.

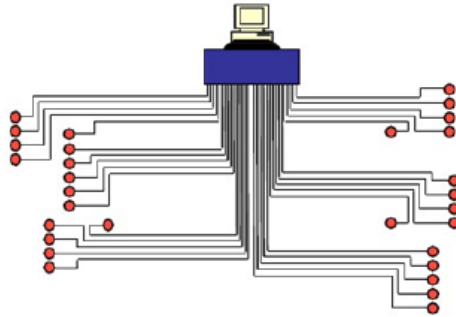


Figura 2.1 Diagrama de automatización en edificios de primera generación

Fuente: (Martinez Fernandez, 2011, p. 17)

2.2.2.2 Segunda Generación

La segunda generación de los sistemas inteligentes en edificios es del tipo maestro/esclavo Descentralizado.

Características:

Se añaden controladores de lógica programable (PLCs) entre el procesador central y los dispositivos

Los controladores maestros toman las decisiones de control

El controlador maestro interroga continuamente a los dispositivos para obtener datos y envía comandos para activar estados

Requerimiento de cableado reducido sustancialmente

Se reduce el punto de fallo único

Modelo de programación propietaria

Inteligencia distribuida

Procesador centralizado

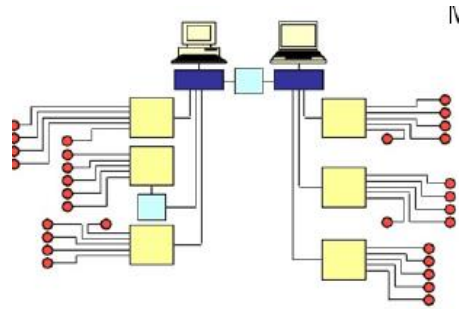


Figura 2.2 Diagrama de automatización en edificios de segunda generación

Fuente: (Martinez Fernandez, 2011, p. 18)

2.2.2.3 Tercera Generación

La tercera generación de los sistemas inteligentes en edificios es del tipo punto-a-punto.

Características:

Inteligencia de control distribuido en todos los dispositivos a controlar

No existe un único punto de fallo

Fácil de ampliar y de añadir más dispositivos

Instalación de cable menos costosa

Conducido por eventos

Los dispositivos envían la información de control a la red

Automatización Distribuida

Inteligencia distribuida

Nodos/Dispositivos inteligentes

No se necesita procesador central

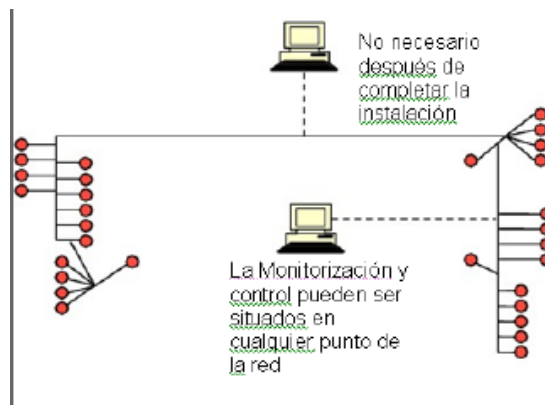


Figura 2.3 Diagrama de automatización en edificios de tercera generación

Fuente: (Martinez Fernandez, 2011, p. 19)

2.3 Sistemas de control en Edificios Inteligentes

Los sistemas de control en edificios inteligentes permiten sustituir de cierto modo la operación de una persona, de hecho, en un sistema de control automático, la operación del edificio se da sin la intervención humana.

En los edificios se requieren de ciertos componentes necesarios para la operación automatizada de este.

2.3.1 Actuadores

El actuador es un dispositivo que utiliza una señal proporcionada por un controlador para aumentar su potencia, además puede también cambiar la naturaleza de la señal y la convierten a la forma que conviene para que se realice la operación adecuada, por ejemplo, puede ser un conmutador que enciende o apaga un electrodoméstico, un regulador que modifica la intensidad de la iluminación, un motor que sube o baja una persiana, etc. (Herrera, 2010, p. 7)

2.3.2 Sensores

Un sensor es cualquier dispositivo que detecta una magnitud física que se desea controlar (temperatura, humedad, luminosidad, ruido, movimiento), y convertirlas en otras magnitudes físicas (por ejemplo, señales eléctricas). (Herrera, 2010, p. 7). Este dispositivo se conecta a la red mediante una interfaz que permite al controlador de la instalación leer el valor de dicha magnitud y actuar en consecuencia, conforme al programa que se le ha incorporado. También se pueden considerar sensores en un sentido más amplio las cámaras de un sistema de video vigilancia o el micrófono de una instalación de portero automático.

2.3.3 Controladores

Los controladores son los elementos principales de un sistema de control, se encargan de proporcionar las señales al actuador. El tipo de señal que presentan

al actuador depende de la clase de señal que haya recibido del sensor. (Herrera, 2010, p. 7)

En el caso de edificios, el controlador recibe la información recogida por los distintos sensores repartidos en todo el edificio, y envía órdenes a los actuadores conforme a una lógica incorporada al mismo.

La funcionalidad que ofrece un controlador puede variar enormemente, desde la que ofrece un simple temporizador para un electrodoméstico, o un termostato para un sistema de aire acondicionado, hasta sofisticados sistemas basados en escenarios que regulan de una manera coordinada todos los elementos de la oficina, en base a los valores de multitud de variables: Temperatura, humedad, luminosidad, ruido ambiente.

2.4 Sistemas Integradores de control en Edificios

2.4.1 BMS (Building Management System)

“Un sistema de automatización de edificios es un sistema de control basado en computadora que recopila información de múltiples controles digitales en una interface que permite la administración de todo el edificio. Este sistema de automatización permite configurar la programación de aire acondicionado e iluminación.” (Duong, 2016, pp. 23,24). Es decir, un Building management Systems (BMS) es un sistema de control basado en un software y Hardware instalado en edificios que controla y monitorea los sistemas mecánicos y eléctricos tales como ventilación, iluminación, sistema de potencia, sistema de protección contra incendios y sistemas de seguridad. El software de un BMS

usualmente está configurado con protocolos C-bus, Profibus, también se integran con protocolos internet como BACnet, LonWorks y Modbus.

2.4.2 BAS (Building Automation System)

Un building automation system (BAS) es un ejemplo de un sistema de control distribuido para edificios inteligentes. El sistema de control se realiza mediante una computadora. Se posee una red de equipos electrónicos diseñados para monitorear y controlar los sistemas mecánicos, electrónicos y sistemas de iluminación en un edificio.

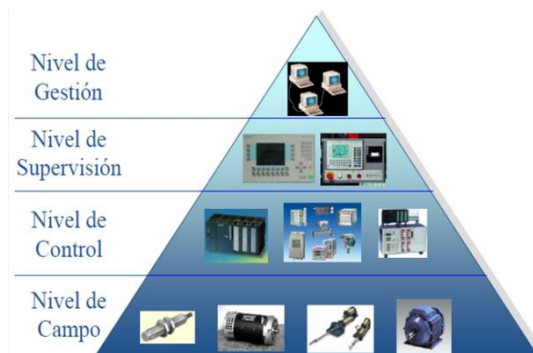


Figura 2.4 Distribución del sistema de automatización en un edificio

Fuente: Empresa eBD

2.5 Proveedores de sistemas integradores de control de edificios

2.5.1 Jhonson Control

Jhonson Controls es una firma global que provee soluciones en aire acondicionado de edificaciones, climatización en autos, y sistemas de automatización en edificios, tanto residenciales como comerciales. Su sistema de control en edificios más comercial es el Metasys.

Metasys es un sistema de automatización utilizado en muchos de los edificios más importantes del mundo. Hace que los edificios sean más inteligentes y más eficientes, proporcionando instrumentación esencial y control, que ahorra energía, reduce costos operativos y mejora los entornos productivos y seguros.

Metasys conecta sistemas de climatización, iluminación, seguridad y protección, y todos ellos se comunican entre sí en un solo idioma, en una única plataforma que da información para tomar mejores decisiones, ahorrar dinero y mejorar la forma en que funciona un edificio.

Metasys es móvil y potente. Su interfaz de usuario presenta la información de una manera sencilla e intuitiva para ayudar a identificar rápidamente los problemas potenciales. Navegar por el espacio para ver una vista en tiempo real de una sola planta, habitación u oficina y el equipo que lo sirve. Filtrar los datos rápidamente para ver la información importante. Permite gestionar las operaciones de un edificio desde cualquier lugar, en cualquier momento, en cualquier dispositivo.

2.5.2 Lutron

Lutron es una empresa americana que provee soluciones en el control y gestión de la iluminación. También provee soluciones relacionadas a la distribución de energía en edificios, ductobarras y cortinas automáticas. El sistema de gestión de edificios más vendido es el Quantum, este sistema puede controlar y gestionar desde una luminaria puntual hasta un edificio entero.

Quantum es un sistema de control de iluminación que abarca todo un edificio o todo un campus y que centraliza el control de toda la iluminación y las cortinas eléctricas. El software de Quantum les ofrece a los usuarios la capacidad de controlar, supervisar, manejar e informar sobre el uso de la energía de iluminación desde una sola luminaria hasta instalaciones completas.

Componentes claves del manejo total de la iluminación Quantum:

Energi Saver Node

- Conecta la iluminación alámbrica e inalámbrica y las zonas con cortinas en un espacio.

Controles de luz del día Sivoia QS para cortinas

- Reducen el resplandor y el calor del sol y permiten aumentar el confort, la productividad y el ahorro de energía sin obstruir la vista.

Sensores Radio Power Saver: Sensor de presencia

- Ahorra energía y aumenta la conveniencia al apagar automáticamente las luces cuando el espacio está vacío, y encenderlas cuando el espacio está ocupado.

Sensor fotoeléctrico

- Ahorra energía al reducir el uso de la luz eléctrica en base a la cantidad de luz del día.
-

Servidor Q-Manager

- Es una computadora que almacena toda la información relevante para informes y tendencias (niveles de luz, estado del sensor, consumo de energía y más)

Software Q-Admin

- Opera, configura, supervisa, establece relojes y crea informes de forma centralizada para la iluminación de todo un edificio

2.5.3 Honeywell

Honeywell es una importante empresa multinacional estadounidense que produce una variedad de productos de consumo, servicios de ingeniería y sistemas aeroespaciales para una amplia variedad de clientes, desde compradores particulares hasta grandes corporaciones y gobiernos.

Honeywell tiene un sistema de gestión de edificios EBI, este integra diversas instalaciones y sistemas de negocio en una única plataforma, con seguridad mejorada para el control y posee un rendimiento optimizado.

CARACTERISTICAS PRINCIPALES

- Integración total de los Sistemas de:

- Control de Accesos

- Seguridad

- Video Vigilancia

-Electro Mecánicos

-Detección de Incendios

- Integración con:

- Una gama amplia de equipos.

- Sistemas de gestión de empresa.

- Localizaciones internet e intranet para gestionar de forma inteligente la información en todos los ámbitos de la empresa

- Utiliza elementos hardware y sistemas operativos Windows NT o Windows 2000 de tipo estándar en el mercado.

2.5.4 Schneider Electric

El Andover Continuum de Schneider Electric es un sistema de control que ha sido desarrollado para administrar los diferentes sistemas en los edificios.

2.5.5 Carel

CAREL siempre ha desarrollado y promovido sistemas de control evolucionados, proponiendo soluciones innovadoras en el sector HVAC / R. Poseen soluciones de alta eficiencia, la cual es una respuesta clara para la protección del medio ambiente a través de sistemas de control optimizados e integrados, capaces de generar ahorros de energía significativos y, en consecuencia, reducir el impacto ambiental.

2.6 Certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

2.6.1 Antecedentes

Como se ha indicado en la introducción, existe una metodología para diseñar, construir y operar edificios que tiene en cuenta a tres componentes claves: el medio ambiente, la rentabilidad y el bienestar de las personas. Los edificios tratan de cumplir con los diversos requerimientos de esta metodología para convertirse en edificios certificados LEED.

El sistema de certificación LEED ha sido desarrollado por el USGBC (consejo americano de construcción sostenible). Además, la metodología que se aplica para calificar a los edificios se va actualizando con el tiempo, actualmente los edificios que se inscriben para esta certificación debe cumplir con los requerimientos LEED v4.

2.6.2 Características

LEED es una certificación de carácter voluntario, que sirve como un guía para el diseño, construcción y operación de edificios que apuntan a ser sostenibles.

La certificación LEED se puede dar para diversos tipos de usos de edificios, como oficinas, hospitales, universidades, colegios, tiendas, centros comerciales, por nombrar algunas. Incluso, la certificación LEED se puede dar para desarrollos urbanos.

La intención de la certificación LEED es promover el diseño y construcción de edificios considerando una buena calidad del ambiente interior, un ahorro de

recursos como energía y agua, uso de materiales reciclados o reciclables, uso de transporte alternativo y desarrollar un edificio con conectividad local.

Para que un edificio reciba la certificación LEED, primero se debe satisfacer requerimientos obligatorios y ganar puntos para alcanzar los diferentes niveles de certificación. La certificación básica, nivel certificado, se consigue con un puntaje de 40 a 49 puntos. El nivel certificado plata se logra con 50 a 59 puntos, el nivel certificado oro se logra con 60 a 79 puntos, y el nivel más alto alcanzable, el nivel certificado platino, se logra con 80 a más. (U.S. Green Building Council, 2013, pág. 6)

Los requerimientos obligatorios y los créditos varían de acuerdo al tipo de certificación. En la versión LEED v4 existen siete categorías las cuales se enfocan en: Proceso integrativo, el cual promueve la participación de los diversos especialistas y diseñadores de un edificio con el fin de lograr un edificio óptimo energéticamente; Ubicación y transporte, el cual promueve el acceso al transporte público y el uso de medios alternativos como bicicletas, además de ubicar al edificio cerca de diversos servicios de modo que se incentiva a realizar la mayor cantidad de actividades sin el uso de autos; Sitios sostenible, el cual promueve el uso de áreas abiertas, un diseño con baja efecto de isla de calor y una iluminación exterior segura pero no invasiva para la fauna nocturna; la eficiencia del agua, la cual promueve el ahorro de agua o bien el uso de agua no potable como agua gris tratada; energía y atmósfera, el cual promueve el ahorro de energía mediante selección de equipos de alta eficiencia y mediante controles y sensores que puedan lograr un ahorro de energía;

materiales y recursos, que incentiva el uso de materiales que no sean dañinos al planeta tanto en su extracción, transporte y disposición final, así como materiales que hayan sido reciclados o puedan ser reciclables; y calidad ambiental interior, el cual ayuda a diseñar ambientes interiores con una adecuada ventilación, iluminación y confort por temperatura y humedad. Además existe dos categorías adicionales: Innovación en el Diseño, que premia estrategias ejemplares que no está indicadas en la certificación per se y prioridad regional, la cual depende de la ubicación geográfica del proyecto.

2.6.3 Requisitos LEED relacionados con la automatización

Crédito 8: SSc8 Light Pollution Reduction

Su intención es minimizar el traspaso de la luz emitida por un edificio o proyecto, reducir el efecto de cielo brillante para permitir y mejorar el acceso visual al cielo nocturno, a través de la reducción del brillo y el manejo del desarrollo lumínico para actividades nocturnas en los ambientes del proyecto. Este crédito regula la contaminación lumínica desde el edificio hacia el exterior.

Prerrequisito 2: EAp2 Minimum Energy Performance

Su intención es establecer un nivel mínimo de eficiencia en el uso de energía por parte del proyecto. Esto debe calcularse a través de un modelamiento energético.

Crédito 1: EAc1 Optimize Energy Performance

Su intención es lograr incrementar y mejorar los niveles de desempeño energético más allá del prerequisite, con la finalidad de lograr impactos positivos en la economía y el medio ambiente relacionados al consumo.

Crédito 5: EAc5 Measurement & Verification – Base Building

Su intención es proveer información constante sobre el consumo de energía del edificio durante su ciclo de vida.

Crédito 1: IEQc1 Outdoor Air Delivery Monitoring

Su intención es proveer un sistema de monitoreo de la calidad del aire con la finalidad de promover el confort del ocupante y ambientes saludables.

Crédito 6.1: IEQc6.1 Controllability of Systems – Lighting

Su intención es proveer un alto nivel de control del sistema de iluminación por los ocupantes individuales o grupos en espacios multifuncionales (por ejemplo, aulas y salas de conferencias) y promover su productividad, comodidad y bienestar.

Crédito 6.2: IEQc6.2 Controllability of Systems – Thermal Comfort

Su intención es proveer un alto nivel del sistema de control del confort térmico por los ocupantes individuales o grupos en espacios multifuncionales (por ejemplo, aulas y salas de conferencias) y promover su productividad, comodidad y bienestar.

2.6.4 Estándares usados dentro de la Certificación LEED

2.6.4.1 ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2010

Esta norma proporciona los requisitos mínimos para el diseño de eficiencia energética de los edificios, con la excepción de edificios residenciales de 4 pisos o menor tamaño. Ofrece, en detalle, los requisitos mínimos de eficiencia energética para el diseño y la construcción de nuevos edificios y sus sistemas, nuevas partes de los edificios y sus sistemas, y los nuevos sistemas y equipos en los edificios existentes, así como los criterios para determinar el cumplimiento de estos requisitos. (ANSI/ASHRAE/IES, 2010, p. 4)

El estándar proporciona requerimientos para la envolvente del edificio, el sistema de climatización, el sistema eléctrico, el sistema de iluminación, el sistema de agua caliente y los motores utilizados dentro del alcance del proyecto del edificio.

Existen dos métodos descritos en el estándar para demostrar su cumplimiento: mediante un modelamiento energético y mediante el cumplimiento de cada una de los requerimientos obligatorios y prescriptivos.

LEED utiliza este estándar para demostrar que los edificios cumplen con una eficiencia mínima, ya que las secciones 4 de cada capítulo incluyen requerimientos de mínima eficiencia que deben cumplir todos los edificios que deseen ser LEED.

Además, el estándar incluye un apéndice, el apéndice G, el cual describe la metodología para realizar modelamientos energéticos de edificios, detallando

los procedimientos para construir la envolvente de un edificio, y cada uno de los sistemas del edificio. Este apéndice será de alta utilidad en la presente tesis, ya que describe el método de simulación de diversos controles para edificios, tal como controles horarios, controles luz-día, y controles del sistema de aire acondicionado.

ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2010 incluye los requisitos preceptivos para los siguientes sistemas descritos en los capítulos detallados a continuación:

- Rendimiento de acristalamiento mínimo, de aislamiento mínimo de pared, aislamiento mínimo del techo, reflectancia del techo: Building Envelope (Sección 5)
- HVAC (Sección 6): mínima eficiencia de los equipos, las características mínimas del sistema, limitación de recalentamiento, limitación de potencia del ventilador.
- Agua caliente sanitaria (Sección 7): mínima eficiencia de los equipos y las características mínimas del sistema.
- Potencia (Sección 8): la eficiencia del transformador, controles horarios para tomacorrientes en oficinas y control de la energía.
- Iluminación (Sección 9): máxima densidad de potencia de iluminación interior (LPD, expresada en Watts / m².), Controles de iluminación mínimos, iluminación exterior e iluminación de garaje.
- Otros Equipos (Sección 10): motores eléctricos, bombas de refuerzo de agua potable, ascensores y escaleras mecánicas.

2.6.4.2 ANSI/ASHRAE 62.1-2010

Los estándares ANSI/ASHRAE 62.1 y 62.2 son reconocidos como las guías para un adecuado diseño de ventilación en los interiores de una edificación.

La Calidad del aire interior (IAQ) es probablemente el aspecto más comúnmente discutidos en lo que se refiere a calidad ambiental interior (IEQ). IAQ tiene efectos directos sobre nuestra salud, así como la percepción de un ambiente interior aceptable. En los Estados Unidos, el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2010: Ventilación para una aceptable calidad del aire interior, es el estándar más comúnmente referenciado para cuantificar las condiciones aceptables y el diseño del sistema de climatización adecuada. El estándar ANSI/ASHRAE 62.1 constituye la base para la mayoría de los códigos mecánicos o se referencia directamente por los propios códigos. (ANSI/ASHRAE, 2010, p. 3).

El estándar es mejor conocido por su regulación de la cantidad de aire de ventilación suministrado a cada espacio por los sistemas de climatización a través de su enfoque de procedimiento de la tasa de ventilación de diseño del sistema. Sin embargo, la norma abarca muchos otros aspectos del diseño que no están tan bien conocidos y comprendidos la construcción. Los aspectos clave del diseño que cubre la construcción son: la calidad del aire al aire libre, filtración de aire, la construcción del sistema de climatización, el concepto de clases de aire, el procedimiento de la tasa de ventilación, el procedimiento IAQ, el procedimiento de la ventilación natural, y las operaciones y el mantenimiento.

Es importante entender también lo que el estándar no cubre. En viviendas, el estándar 62.1 no cubre los edificios de viviendas y unifamiliares de baja altura, es decir, aquellos que sean de cuatro pisos o menos. Sin embargo, estos están cubiertos por el estándar 62.2. El estándar también no cubre la calidad del aire en las zonas de fumadores, el cual fue un cambio en la actualización del 2010 del estándar, ya que en versiones previas si había sido incluido. Las otras áreas importantes que no están cubiertos son los requisitos para la ventilación en industrias o laboratorios.

El estándar es útil en la tesis para calcular los ratios de renovación de aire requeridos por cada tipo de ambiente y por número de personas. La tasa de ventilación mecánica es distinta, por ejemplo, en oficinas que en corredores.

2.6.4.3 Reglamento Nacional de Edificaciones

El reglamento nacional de Edificaciones es una norma peruana, que de hecho se publica en el periódico oficial El Peruano, proporciona todos los requerimientos mínimos de diseño, instalación y control para las construcciones y habilitaciones urbanas. La construcción del edificio de oficinas, la cual incluye equipos, sistemas y modo de funcionamiento de diversas especialidades como sanitarias, eléctricas, arquitectura, estructura y seguridad, deberán cumplir con lo exigido en esta norma.

Adicionalmente, el Reglamento indica los requerimientos para ventilación mecánica en los acondicionamientos de edificios de oficinas. Los cuales se cumplen para la tesis presentada.

2.7 Descripción de sistemas energéticos de climatización en las edificaciones

El aire acondicionado es un proceso para simultáneamente condicionar el aire y distribuirlo en combinación con el aire de renovación, mientras se mantiene un control de la temperatura, humedad, movimiento del aire, limpieza del aire, presión y sonido bajo determinados límites de confort para los ocupantes. (Wang & Lavan, 1999, p. 2)

Los sistemas de aire acondicionado se componen de diversos equipos, los cuales se detallan a continuación.

2.7.1 Bombas

Las bombas son turbomáquinas que transportan un fluido. En el presente trabajo, estas bombas son utilizadas para transportar tanto el agua de condensación como el agua de la enfriadora hacia el edificio.

Principalmente, existen dos tipos de operaciones en bombas: horizontales y verticales.

Las bombas horizontales tienen el eje de transmisión horizontal y pueden ser instaladas en un lugar distinto de la fuente de abastecimiento. Son utilizadas principalmente para fuentes superficiales, y cuando la altura de succión es baja. (Cruz Lopez, 2008, p. 14)

Las bombas verticales tienen el eje de transmisión vertical y se pueden ubicar encima de su captación, tal como en el caso de pozos profundos. Tienen una alta altura de succión. (Cruz Lopez, 2008, p. 15)

En la presente tesis se utilizará bombas centrifugas horizontales para el circuito de agua de condensación ya que proporcionan las mejores condiciones para la operación de torres; y verticales, en el circuito del evaporador cuando se operan con chillers.

La fórmula de potencia de una bomba viene dada por

$$P = \frac{H * caudal}{n_1 * n_2}$$

Donde

P = potencia de la bomba en Watts= $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = \text{N} \cdot \text{m}/\text{s}$

H = caída de presión en la bomba, en Pascal = N/m^2

caudal = caudal a transportar, en m^3/s

n_1 = eficiencia mecánica, adimensional.

n_2 = eficiencia eléctrica del motor

La operación de una bomba es intermitente, es decir cuando existe una demanda de agua se activa la bomba. El consumo energético de las bombas, se puede reducir, con las siguientes estrategias:

1. Automatización en las operaciones
2. Incluir variadores de velocidad, de modo que se regule el caudal, ya que el consumo de las bombas disminuye al disminuir la velocidad en el motor.

Una bomba de velocidad variable se define con tasas de flujo máximo y mínimo que son los límites físicos del dispositivo. La bomba funcionará y

seleccionará un flujo en algún lugar entre los límites mínimo y máximo. En el caso de que la bomba esté funcionando, la bomba intentará cumplir con la solicitud de flujo realizada por los componentes del lado de la demanda.

Todas las reglas de la bomba y los cálculos de eficiencia y potencia son aplicables desde la introducción en la sección del grupo de bombas. La principal diferencia entre la bomba de volumen variable y la bomba de volumen constante es la curva de rendimiento de la carga parcial. La fracción de la potencia de carga total está determinada por la ecuación cúbica:

$$\text{Fracción de potencia} = C_1 + C_2 * PLR + C_3 * PLR + C_4 * PLR$$

Donde:

C_1 es el coeficiente de consumo constante

C_2 es el coeficiente lineal a la carga parcial

C_3 es el coeficiente cuadrático a la carga parcial

C_4 es el coeficiente cúbico a la carga parcial, y

PLR es el Ratio de Carga Parcial (Part Load Ratio).

En la figura 2.5 se puede ver cómo afecta en el flujo y en la caída de presión al usar un control VFD. En la imagen se observa que existe una velocidad mínima y una velocidad máxima del motor de la bomba: min RPM y max RPM. Entre estos dos puntos, y manteniéndose la curva del sistema, existirán diversas presiones y flujos, sabemos que el consumo de una bomba es directamente

proporcional al flujo y a la caída de presión, por lo que se demuestra un gran ahorro de energía al usar variadores de frecuencia.

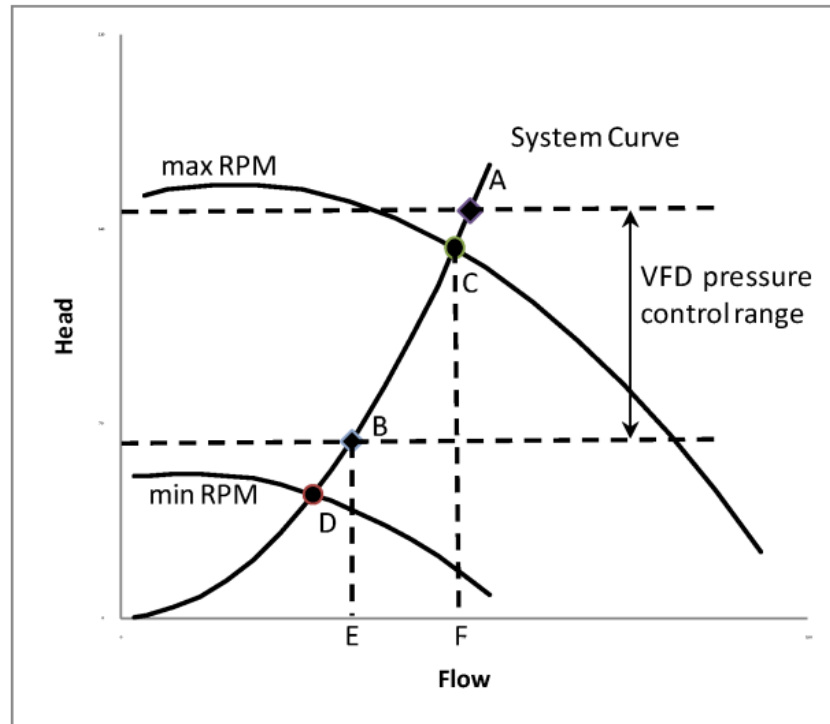


Figura 2.5 Curva de flujo de agua mínimo y máximo dependiendo del control de diferencial de presión

Fuente: (EnergyPlus, 2016)

2.7.2 Ventiladores

Los ventiladores son utilizados para remover el aire, se aplica tanto para renovación de aire como para extracción de aire en ambientes con contaminantes.

“Es una turbomáquina cuyo elemento principal es un rotor a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando este su cantidad de movimiento, proporcionándole un incremento de presión. Los ventiladores se usan

principalmente para producir flujo de gases de un punto a otro, también en muchos casos, el gas actúa sólo como medio de transporte de calor, humedad, o de material sólido como cenizas, polvos, etc.”. (Rodríguez Delgado, 2010, p. 21)

La fórmula de potencia de un ventilador viene dada por

$$P = \frac{H * caudal}{n_1 * n_2}$$

Donde

P = potencia del ventilador en Watts= $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = \text{N} \cdot \text{m}/\text{s}$

H = caída de presión en el ventilador, en Pascal = N/m^2

$caudal$ = caudal a transportar, en m^3/s

n_1 = eficiencia mecánica, adimensional.

n_2 = eficiencia eléctrica del motor

En la presente tesis, el ventilador es un centrífugo con alabes curvados hacia atrás, ya que tienen un mejor rendimiento y un nivel de ruido más bajo a los comparados con los alabes curvados hacia adelante.

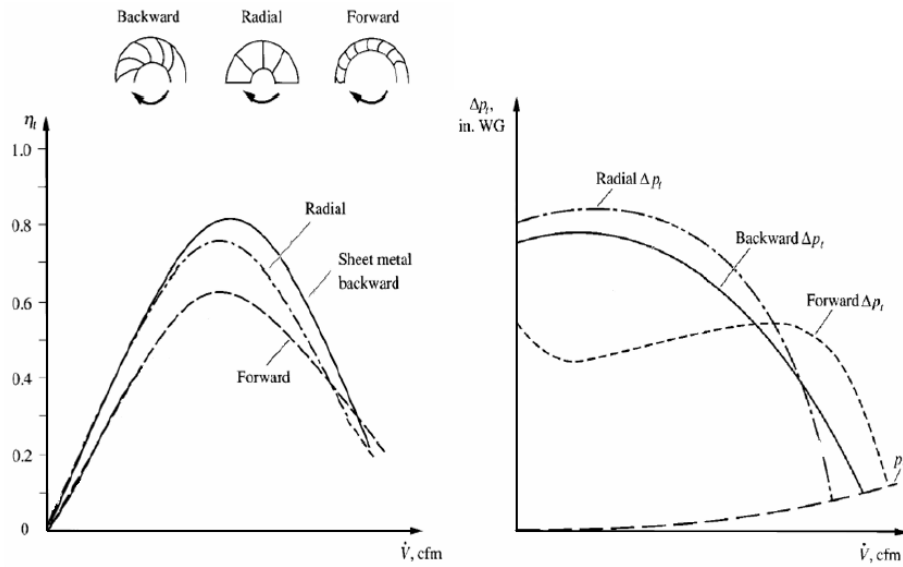


Figura 2.6 Curvas típicas para los tipos de ventiladores centrífugos.

Fuente: (Rodríguez Delgado, 2010)

Comparison between Various Types of Fans				
	Backward, airfoil centrifugal fan	Forward-curved centrifugal fan	Vane-axial	Propeller fan
Fan total pressure Δp_t	Higher Δp_t	Comparatively lower Δp_t	Higher Δp_t	Low Δp_t
Flow rate	All flow rates	Larger flow rate	All flow rates	Larger flow rate
Fan power input	Nonoverloading	Overloading	Nonoverloading	Nonoverloading
Fan modulation	Inlet vanes AC inverter	Inlet vanes AC inverter	Controllable pitch AC inverter	
Fan total efficiency	0.7 to 0.86	0.6 to 0.75	0.7 to 0.88	0.45 to 0.6
Sound power level	Lower, higher L_w at low frequencies	Medium, higher L_w at low frequencies	Medium, difference of L_w values is small at various Hz	Higher, higher L_w at high frequencies
Airflow direction	90° turn	90° turn	Parallel to axle	Parallel to axle
Volume and weight	Greater	Less	Greater	Medium volume and lower weight
Initial cost	Higher	Medium	Higher	Low
Applications	Large HVAC&R systems	Lower pressure, small HVAC&R systems	Large HVAC&R systems	Low-pressure, high-volume flow exhaust systems

Figura 2.7 Comparación entre varios tipos de ventiladores

Fuente: (Rodríguez Delgado, 2010)

Se puede lograr una mayor eficiencia con el uso de variadores de velocidad.

2.7.3 Enfriadoras

La enfriadora, llamada comúnmente con su nombre en inglés Chiller, es una máquina térmica, que cumple el ciclo de Carnot o similares. La enfriadora utiliza un refrigerante para realizar el ciclo de refrigeración, los 4 componentes principales son el evaporador, el condensador, la válvula estranguladora y el compresor.

Las enfriadoras eléctricas (por ejemplo, Chiller Eléctrico) tienen la opción de conectar un tercer bucle de planta para calentar agua caliente al mismo tiempo que enfriar el agua de la condensadora. El enfriador tiene un ciclo de refrigeración de compresión de vapor estándar con un condensador de doble haz. Un condensador de doble haz implica dos caminos de flujo separados a través de un condensador dividido. Una de estas rutas es el agua del condensador típicamente conectada a una torre de enfriamiento estándar; la otra ruta es agua caliente conectada a un circuito de recuperación de calor. Después de salir del compresor, el refrigerante se condensa en líquido. En un paquete dividido, los controles internos de la enfriadora dirigirán una parte del refrigerante al paquete del condensador de recuperación de calor y / o al haz del condensador de agua de la torre dependiendo de la carga de agua enfriada, las temperaturas de entrada del condensador y controles internos de la enfriadora. La presión del refrigerante luego se deja caer a través de una válvula de estrangulación para que el fluido se pueda evaporar a una presión baja que proporcione enfriamiento al evaporador.

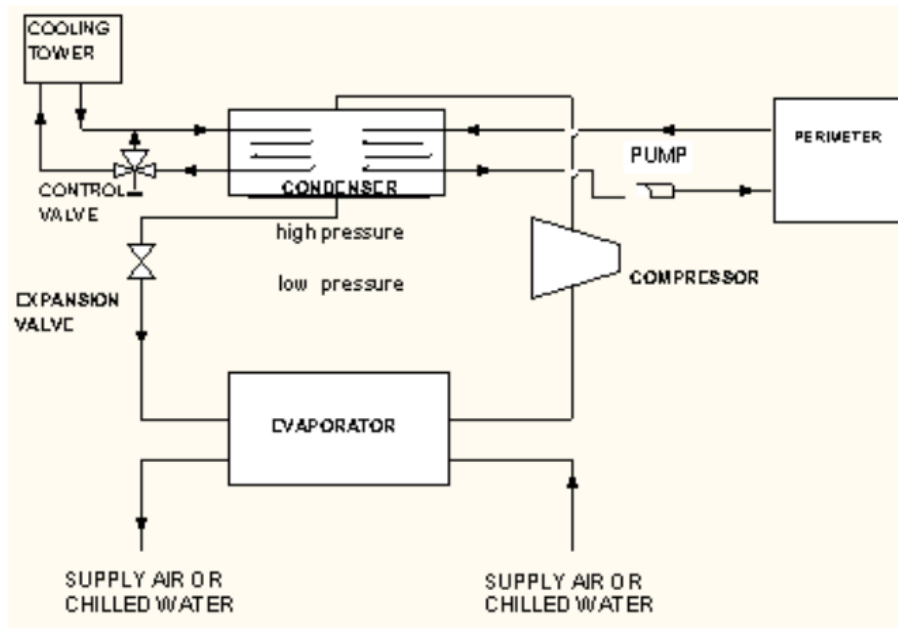


Figura 2.8 Chiller y sus componentes principales.

Fuente: Energy Plus Engineering Reference. 2016

El consumo energético de un Chiller viene dado por la siguiente formula:

$$P = \frac{Frac_{FullLoadPower} * Ratio_{FullLoadPower} * Ratio_{AvailToNomCap} * NomCap}{COP}$$

Donde:

P = potencia en kW.

$NomCap$ = Capacidad nominal, en toneladas de refrigeración (tons)

COP = Coeficiente de performance, es el indicador de la eficiencia en kW/ton

$Ratio_{AvailToNomCap}$ = ratio de capacidad.

$Ratio_{FullLoadPower}$ = ratio de potencia

$Frac_{FullLoadPower}$ = ratio de carga

La eficiencia del chiller se incrementa con el uso de variadores de velocidad en el compresor.

2.7.4 Torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son intercambiadores de calor, expulsan el calor latente del agua de condensado hacia el exterior. Se optimiza el consumo de las torres mediante variadores de frecuencia en los ventiladores, de modo que funcionan solo para mantener una temperatura de salida de agua óptima.

Según la teoría de Merkel, la transferencia de calor total en estado estacionario entre el aire y el agua que entra a la torre se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$d\dot{Q}_{total} = \frac{U * dA}{C_e} * (h_s - h_a)$$

Dónde

$d\dot{Q}_{total}$ = transferencia de calor total de la torre de enfriamiento en Watts

h_s = entalpía de aire saturado a la temperatura de la superficie húmeda, J / kg

h_a = entalpía de aire en la corriente libre, J / kg

C_e = calor específico del aire húmedo, J / kg-°C

U = coeficiente de transferencia de calor total de la torre en W / m²-°C

dA = área de superficie de transferencia de calor en m²

2.8 Descripción de sistemas energéticos de Iluminación en las edificaciones

La iluminación en edificios se logra mediante la iluminación natural y la iluminación artificial. La iluminación natural, al no consumir energía, es lo más óptimo. La iluminación artificial, puede ser optimizada mediante atenuación o bien con el uso de luminarias de alta eficiencia y controles automáticos.

La Tabla 2-1 presenta el tipo de iluminación y sus controles en edificios; se escoge para el proyecto medidas de eficiencia energética con controles por ser medibles, mediante un software de modelación energética. La intención en los siguientes capítulos es poder generar una automatización que logre un ahorro de energía cuantificable.

Tabla 2-1 Tipos de sistemas de control de iluminación

Tipo	Optimización del consumo	Aplicación
Iluminación natural	Sensores de tipo luz día	Oficinas
	Apertura de ventana optimas	Dormitorios
	Vidrios con un óptimo VLT	Aulas
Iluminación artificial	Luminarias de alta eficiencia	Estacionamientos, Oficinas
	Dimerización de luminarias	Oficinas perimetrales
	Sensor Dual (PIR + ultrasonido)	Oficinas
	Sensor de PIR (infrarrojo)	Baños
	Sensor de movimiento (ultrasonido)	Circulación

Fuente: Propia

El cambio de tecnologías en iluminación, desde una tipo encendido apagado a una de atenuación, puede lograr un ahorro de 10% adicional. (Lopez Castellanos, Rojas Herrera, & Ruiz Maldonado, 2012, p. 118)

Generalmente el control de iluminación se genera con un control convencional, el cual es un interruptor para activar o desactivar las luminarias. Para optimizar el ahorro de energía, se hace uso de controles automáticos, los cuales mantienen las luminarias prendidas cuando se detecta presencia, y se apagan cuando no hay personas, o bien brindan una iluminación atenuada en caso solo sea necesaria. Existen también opciones las cuales se obvia la señal del control automático, y se mantiene las luces en modo prendido o apagado manual, generalmente se da este caso por seguridad. En el siguiente diagrama se indica el funcionamiento de los controles de iluminación:

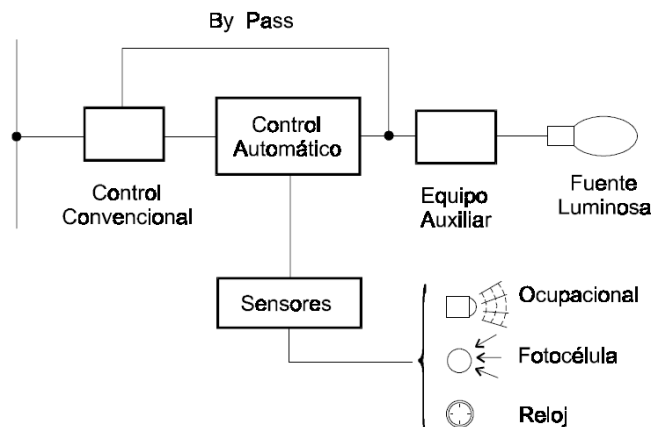


Figura 2.9 Diagrama de funcionamiento de un control de iluminación

Fuente: (Assaf, 2006)

2.8.1 Sensor tipo PIR

Los detectores PIR reaccionan solo ante determinadas fuentes de energía tales como el cuerpo humano. Estos captan la presencia detectando la diferencia entre el calor emitido por el cuerpo humano y el espacio alrededor. (Hernández Soriano, 2010, p. 58)

Los sensores PIR utilizan un lente de Fresnel que distribuye los rayos infrarrojos en diferentes radios (o zonas), los cuales tienen diferentes longitudes e inclinaciones, obteniendo así una mejor cobertura del área a controlar. Cuando se da un cambio de temperatura en alguno de estos radios o zonas, se detecta la presencia y se acciona la carga. (Hernández Soriano, 2010, p. 59)

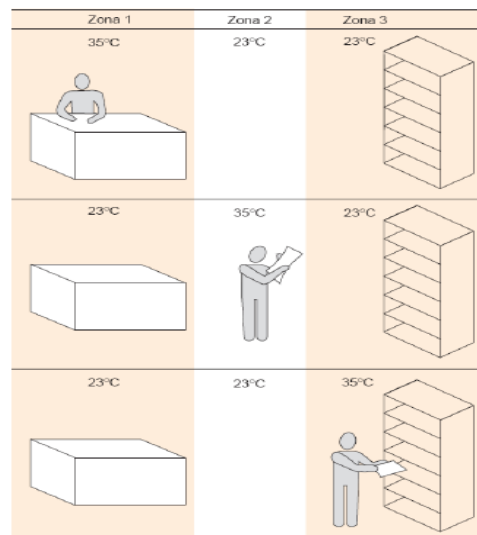


Figura 2.10 Funcionamiento de los detectores PIR

Fuente: Propia

2.8.2 Sensor tipo ultrasónico

Estos tipos de sensores se componen de un emisor y un receptor. El emisor emite ondas ultrasónicas, las cuales al rebotar ante una superficie, son detectadas por el receptor en su regreso.

En un ambiente sin movimiento, no existe alteración entre la diferencia de frecuencia y tiempo de ondas emitidas y receptadas. En cambio, cuando existen personas, se distorsiona el tiempo de recepción entre ondas, lo cual se traduce como una detección de presencia. Estos tipos de sensores tienen un filtro el cual se utiliza para poder distinguir pequeñas variaciones que se dan por el excesivo movimiento del aire, como en el caso de aires acondicionados o ventiladores.

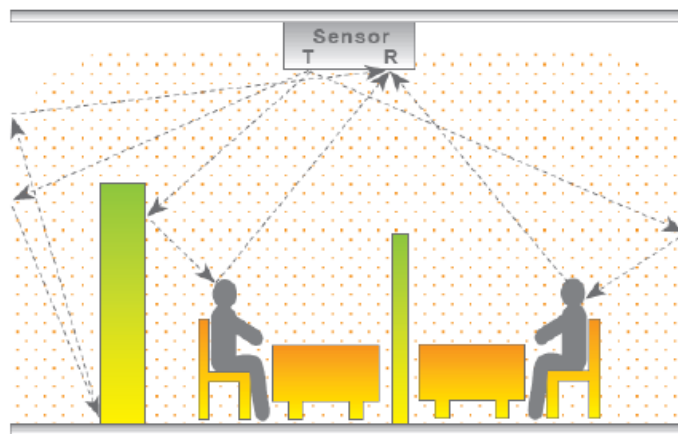


Figura 2.11 Funcionamiento de un sensor ultrasónico

Fuente: Propia

Una desventaja de estos tipos de sensores es que tiene dificultad en detectar presencia cuando una persona está sin movimiento por minutos prolongados.

Es por eso, que no se aplican en oficinas donde una persona puede estar sin movimiento o con movimientos muy finos.

2.8.3 Sensor tipo DUAL

Este sensor tiene los beneficios de un sensor de movimiento y un sensor infrarrojo incorporado.

Ambos sensores, colocados dentro de un mismo dispositivo, se confirman entre sí. Un reflejo de luz solar, o el calor emitido por un radiador podrá ser detectado por el PIR, más no por el ultrasonido, evitando así una condición de alarma no deseada. Asimismo, un movimiento fino podrá ser detectado cuando se unen ambas tecnologías.

2.8.4 Sensor de luz-día

Un sensor de luz día indica en nivel de iluminación de un ambiente. Se usa generalmente en ambientes cercanos a ventanas que dan al exterior, por ser los ambientes que tienen un mayor aprovechamiento de la iluminación natural.

El nivel de iluminación natural en una zona depende de muchos factores, incluida la condición del cielo; posición del sol; punto de cálculo, ubicación, tamaño y VLT de las ventanas; dispositivos de protección de ventanas y reflectancia de superficies interiores. La reducción de la iluminación eléctrica depende del nivel de iluminación natural, el punto de ajuste de la iluminación, la fracción de zona controlada y el tipo de control de iluminación.

Un sensor de luz día mide el nivel de iluminación natural en luxes, y de acuerdo a la lógica de control planteada, actúa sobre la luminaria. Existen tres tipos de

control de iluminación común: el control on/off, el control por pasos y la atenuación.

En el control on/off, se encienden las luminarias cuando el nivel de iluminación es bajo, por decir menor a 600 luxes, y se apagan cuando el nivel de iluminación es mayor, es decir cuando naturalmente se tiene una iluminación mayor a 600 luxes.

En el control por pasos, existen circuitos de iluminación en el ambiente, por ejemplo, un ambiente puede tener 9 luminarias, y estar dividido en tres circuitos independientes, cada uno conteniendo tres luminarias. En este caso, cuando la detección de iluminación natural sea muy leve, o, de acuerdo al siguiente ejemplo, menor a 200 luxes, se prenden todas las luminarias, en el caso cuando la iluminación natural sea un poco mayor hasta los 400 luxes, se prenden dos circuitos de iluminación, y cuando la iluminación natural sea alta pero no óptima, en el ejemplo es entre 400 y 600 luxes, solo se prende un circuito para mejorar la iluminación total. Cuando la iluminación natural es mayor a 600 luxes no se prende ninguna luminaria.

En la tabla 2.2 se ve el control de iluminación por pasos. Cuando los luxes son menores a 200 todas las luminarias se prenden. Cuando se tiene entre 200 y 400 luxes, se prenden $2/3$ de las luminarias. Cuando se tiene entre 400 y 600 luxes, se prenden $1/3$ de la iluminación; y cuando se tiene iluminación mayor a 600 luxes, todas las luminarias se apagan.

Tabla 2-2 Ejemplo de un control de iluminación por pasos con tres niveles

Daylight illuminance	Fraction of lights that are on
0-200	1.0
200-400	2/3
400-600	1/3
600 and above	0.0

Fuente: (EnergyPlus, 2016)

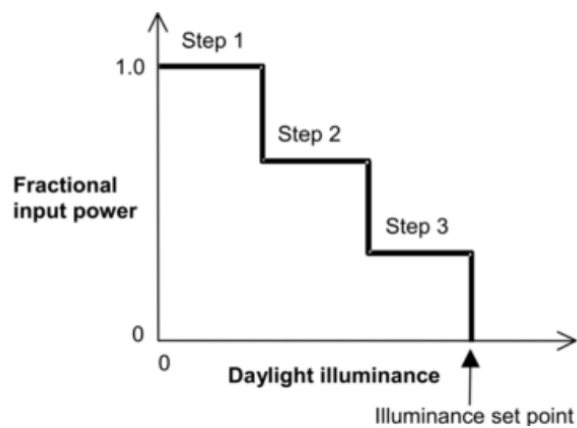


Figura 2.12 Control de la iluminación con tres niveles

Fuente: (EnergyPlus, 2016)

Otro tipo de control de iluminación de luz-día, y más sofisticado también, es el control por atenuación, en este caso, de acuerdo al nivel de iluminación natural, se va incrementando el porcentaje de potencia en las luminarias. Esto requiere el uso de balastos electrónicos en las luminarias, y además que las luminarias sean de una tecnología que permita su atenuación sin su desgaste.

En el gráfico 2.13 se indica la relación existente entre la potencia de consumo de las luminarias y la fracción de iluminación que las luminarias brindan. Como se puede observar en la gráfica, la potencia de consumo de las luminarias no

parte de cero, sino de un punto mínimo que da como resultado una fracción de iluminación. Generalmente esta fracción mínima es el 10 % de la potencia de iluminación, que brinda un 10% de la capacidad de iluminación de la luminaria.

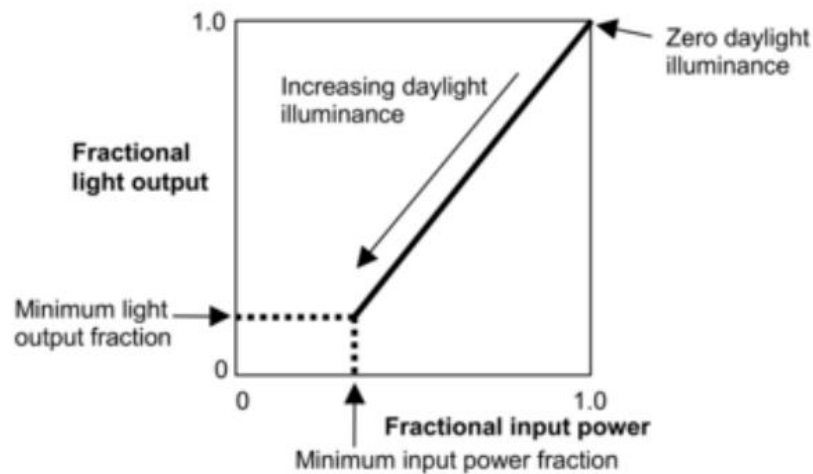


Figura 2.13 Relación entre la potencia de consumo de las luminarias y la fracción de iluminación

Fuente: (EnergyPlus, 2016)

2.9 Marco teórico relacionado al dispositivo de control

Se explica la teoría y funcionamiento de los componentes principales del dispositivo controlador.

2.9.1 Variador de frecuencia (VFD- Variable Frequency Drive)

Es un equipo electrónico que permite regular la velocidad de los motores de inducción de corriente alterna trifásica. (Rodríguez Delgado, 2010, p. 52)

Se pueden usar tanto los términos “Convertidor de frecuencia: Es un término correcto pero podría interpretarse también como un equipo de conversión de

frecuencia dedicado a una adaptación de la fuente de potencia.” como “Variador de frecuencia: Es el término más común para referirse a un VFD. Aunque también puede definir otro tipo de dispositivos usados en aeronáutica o en laboratorios” o, en cuanto a siglas se refiere, “VFD”. (ABB, 2018)

El modo de operación de un variador de frecuencia es mediante la conversión de una señal AC a un DC y a si vez esta última convertirla a una AC con una frecuencia cambiada.

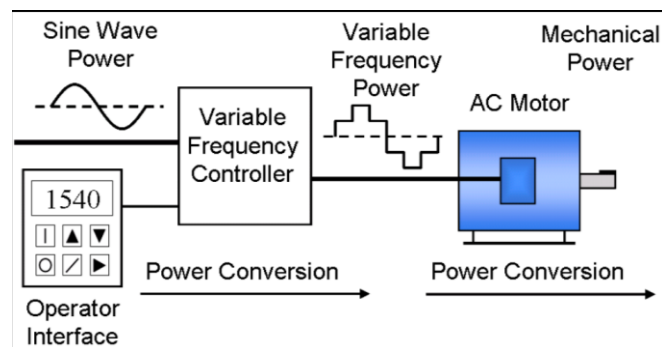


Figura 2.14 Variador de frecuencia

Fuente: (ABB, 2018)

2.9.2 Sensor de CO2

El sensor de CO2 mide la concentración de este gas en PPM (Parte por millón). La concentración de CO2 afecta directamente a la calidad del aire del ambiente. Niveles altos de CO2 pueden producir efectos negativos como mareos, falta de pensamiento lucido, cansancio. El CO2 se produce por la respiración de las personas y aumenta con la cantidad de personas, por eso es necesario medir su nivel en los ambientes con alta congregación de personas.

Si bien estos sensores no nos proporcionan un número exacto de ocupantes, miden la cantidad de CO2 que producen los ocupantes de una habitación y

envían una señal al sistema de automatización del edificio para aumentar la ventilación necesaria en una habitación específica si los niveles de CO₂ son por encima del punto de equilibrio. Esto es importante porque si una habitación tiene altos niveles de CO₂ como 1030 ppm, los ocupantes pueden sentirse adormecidos. (Duong, 2016, pp. 21,22)

El sensor indica el nivel de CO₂ mediante un tipo de comunicación como Modbus, Profibus, y esta señal es leída por el BMS del edificio para actuar sobre un ventilador o bien es mandada a un centro de control para que se tome una medida correctiva en bajar el nivel de CO₂ en caso sea alto.

2.9.3 Medidor de flujo

El flujo de aire es medido en las entradas de aire fresco de los ventiladores de inyección de aire. Este equipo indica el caudal en CFM (pies cúbicos de aire por minuto). Los medidores de flujo se utilizan para conocer el caudal de aire de un ventilador, generalmente los ventiladores con variadores de velocidad utilizan estos medidores para conocer su caudal en cierto instante y así incrementar la velocidad del motor para tener un mayor caudal.

2.9.4 Transductor de corriente

Este equipo es utilizado para conocer el estado de funcionamiento de un equipo. Es decir, sabemos que un equipo mecánico está funcionando si se detecta corriente a través de él. El transductor se usa para detectar fallas. Por ejemplo, se puede mandar a prender un motor desde una central de control, sin embargo, si no se detecta corriente en este transductor, se detecta una falla,

generalmente debido a una mala comunicación entre la central de control y del motor.

2.10 Descripción de la metodología para la estimación del consumo de energía

Para estimar el ahorro de energía se ha realizado una simulación de un año del consumo de energía utilizando el software de simulación computacional Design Builder y Energy Plus. Design Builder es la interfaz gráfica y Energy Plus es el motor de cálculo. “EnergyPlus Versión 2.1.0 es un programa de software innovador que utiliza una metodología de conexión nodal para conectarse a los componentes instalados en el edificio en lugar de un método de esquema fijo utilizado en los programas de simulación convencionales, como DOE-2 y BLAST.” (Fan, 2008, p. 10). Este software predice el consumo en base a los parámetros ingresados como ubicación, clima local, orientación, iluminación, aire acondicionado y dispositivos de control que optimizan el consumo de energía. (Ibarra & Reinhart, 2012, pp. 5-10)

El siguiente diagrama muestra cómo otros programas ya se han vinculado a EnergyPlus y una visión general de cómo el trabajo futuro puede afectar el programa. La Figura 2.15 muestra la estructura de EnergyPlus.

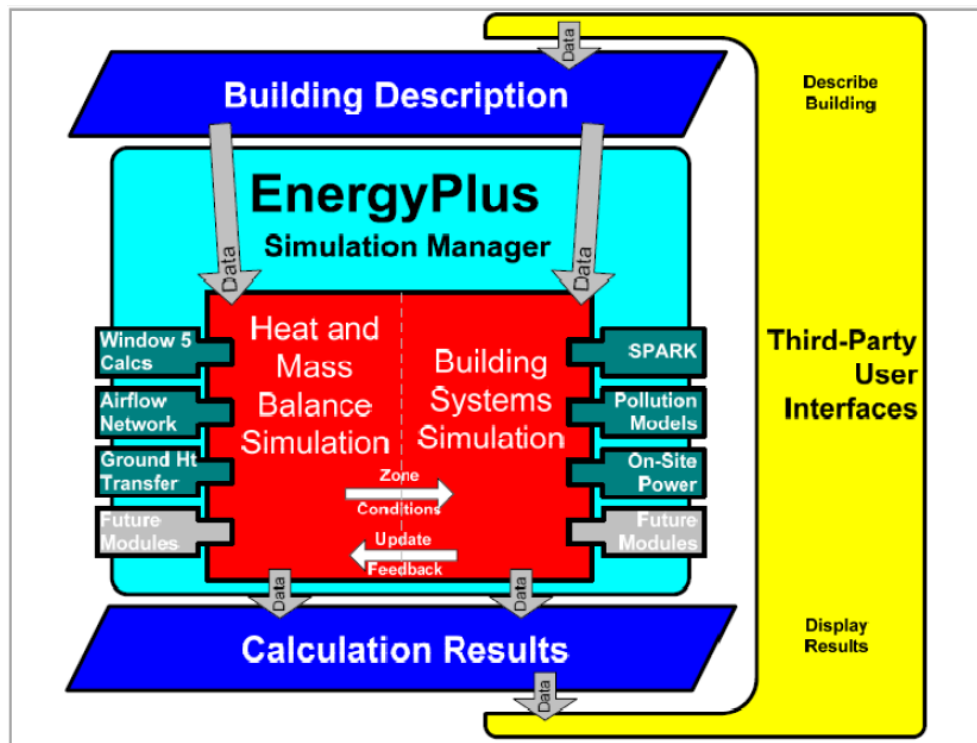


Figura 2.15 Estructura de EnergyPlus

Fuente: (Fan, 2008)

2.10.1 Ingreso de parámetros en el software de simulación energética

El ingreso de datos se realiza en la interfaz gráfica Design Builder. En el siguiente cuadro se pueden observar los diferentes parámetros que son ingresados en forma general dentro de un programa de simulación energética:

Los parámetros indicados en la tabla 2.3 son ingresados en el modelamiento energético. Estos parámetros interactúan entre sí para ir calculando el consumo de energía y la carga térmica en cada hora, y durante todo un año.

Tabla 2-3 Parámetros ingresados en los modelamientos energéticos de edificaciones

FORMA DE LA EDIFICACIÓN	Se hace referencia a la forma exterior de la fachada, donde se observa la existencia de pórticos, volados en las ventanas o en las puertas, miradores y de cualquier tipo de arreglo que haga parte de la estructura externa del edificio.
ESTRUCTURA ARQUITECTÓNICA	Se refiere a cada uno de los elementos constitutivos del edificio, tales como paredes, ventanas, puertas y huecos de los cuales se deben tener los datos de las dimensiones, y del grosor. Se busca toda esta información en planos 2D o 3D donde se pueda visualizar la estructura arquitectónica del edificio
MATERIALES	Se debe tener los datos de todos los materiales que componen cada uno de los elementos constructivos del edificio, así como sus propiedades térmicas. El listado completo de las propiedades de cada material aparece en la sección Asignación de materiales constructivos del Capítulo 3.
OCUPACIÓN DE LAS ZONAS	Se debe saber el número máximo de personas que van a ocupar cada zona, y el tipo de actividad que se realiza.
TIPO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN	Se debe conocer el tipo de sistema HVAC, la eficiencia y los horarios de operación.
EQUIPOS ELECTRÓNICOS	Los parámetros a obtener son la potencia consumida, la cantidad de equipos y el horario de uso.
OBSTRUCCIONES ALEDAÑAS	Se debe buscar planos de localización en los que se observen edificios aledaños que impidan que la radiación solar y los vientos incidan directamente, además de señalar los árboles y demás obstrucciones presentes.

Fuente: (Lopez Castellanos, Rojas Herrera, & Ruiz Maldonado, 2012)

En el siguiente gráfico se indican los diferentes parámetros y la interacción que estos tienen para la simulación:

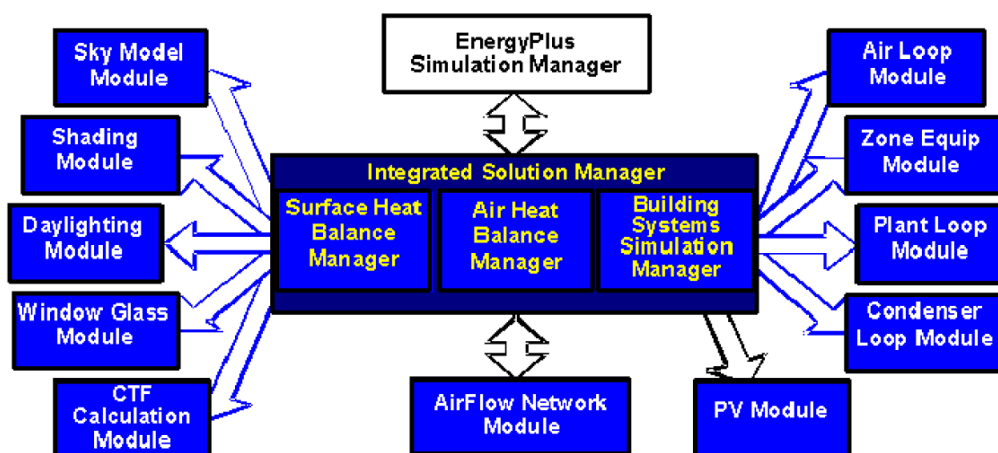


Figura 2.16 Elemento internos de EnergyPlus

Fuente: (Fan, 2008)

Algunos de los parámetros que serán utilizados y modificados en la presente tesis se detallan a continuación:

El módulo para simular el control de la iluminación natural. “Daylighting Module”, en conjunto con el análisis térmico, determina el impacto energético de las estrategias de luz solar basadas en el análisis de la disponibilidad de luz natural, las condiciones del sitio, la gestión de ventanas en respuesta a la luz solar y el resplandor, y varias estrategias de control de iluminación. (Fan, 2008, p. 14)

El módulo para el manejo de los sistemas HVAC. El “Building Systems Simulation Manager” es desarrollado para los sistemas HVAC aplicados en edificios. Incluye “AirLoop Module”, “Zone Equip Module”, “Plant Loop Module”, “Condenser Loop Module” y “PV Module”. “AirLoop Module” es desarrollado para calcular la transferencia de masa y calor en los lazos primarios. “Zone Equip Module” es desarrollado para calcular la transferencia de masa y calor en las unidades terminales. “Plant Loop Module” y “Condenser Loop Module” es desarrollado para calcular la transferencia de masa y calor entre la demanda de carga térmica del edificio y la planta de agua helada. Por lo general, la planta central interactúa con los sistemas a través de un circuito de fluido entre los componentes de la planta y los intercambiadores de calor, llamados bobinas de calentamiento o enfriamiento. (Fan, 2008, p. 14)

Además, existe un módulo para modelar las estrategias de control indicadas como EMS. Este módulo trabaja como un sistema de automatización del edificio e incluye variables como sensores, actuadores y variables internas que reaccionan de acuerdo a los actuadores. También se incluyen reglas de control, basadas en lazos de control tal como se indica en la figura 2.17.

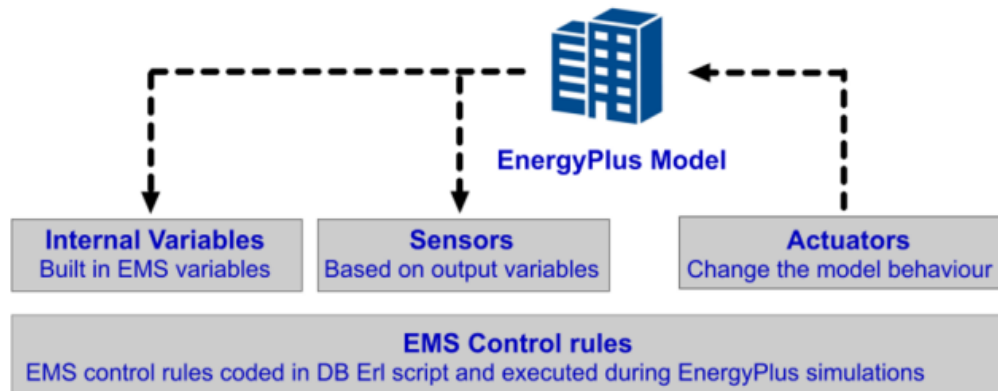


Figura 2.17 Arquitectura de simulación de lazos de control en EnergyPlus

Fuente: (Design Builder, 2019)

2.10.2 Formato de reporte de resultados del software de simulación

El reporte de resultados muestran los diversos consumos de energía por tipo de carga en un determinado periodo indicado en el modelamiento energético, generalmente un año.

CAPÍTULO III

CÁLCULOS Y/O APLICACIONES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

3.1 Sistema de aire acondicionado del edificio

El edificio en el presente proyecto de tesis, será un edificio de oficinas de 4 sótanos y 14 pisos. Para climatizar el edificio se utilizará equipos chiller en la azotea el cual suministra agua helada a una temperatura de 6.7 °C a cada ambiente, este sistema es conocido como tipo centralizado ya que una máquina es la encargada del ciclo térmico y no una maquina en cada ambiente. Se considera climatización en los siguientes ambientes: el lobby de ingreso del primer nivel, en la sala de reuniones y sala de capacitaciones del piso 1, en hall de ascensores del piso 1 al 14, y en las 13 oficinas ubicadas una por piso desde el piso 2 al 14. El área construida de cada sótano es de 1,672 m², el área construida del primer nivel es de 841 m² y el área construida del segundo nivel al catorceavo nivel es de 1,018 m² por cada piso.

El sistema de climatización en el edificio es mediante chillers centralizados, con bombas primarias que aseguran el funcionamiento de cada chiller asociado y bombas secundarias de suministran agua helada por la red de tuberías hacia el edificio. La capacidad del sistema de climatización se realizará mediante un cálculo de cargas térmicas en base al área a climatizar, calculada en 10,920 m²

para oficinas; 693 m² para áreas comunes entre sala de reuniones, lobby y sala de capacitaciones del primer piso y 1,400 m² para el hall de ascensores del piso 1 al 14, el detalle de cálculos se indica en la siguiente sección.

3.1.1 Cálculo de cargas térmicas de cada ambiente y del edificio

PARAMETROS DE DISEÑO DEL AIRE ACONDICIONADO

a) Condiciones del Aire Exterior:

La sección G3.1.2.2.1 del estándar ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2010, recomienda que la capacidad de equipos de aire acondicionado se base en la temperatura de diseño de enfriamiento al 1% de bulbo seco y 1% de bulbo húmedo. (ANSI/ASHRAE/IES, 2010, p. 219). El mismo estándar brinda tales valores de temperatura de Lima en la tabla D-3: Tabla climática internacional (ANSI/ASHRAE/IES, 2010, p. 195)

- Temperatura de Bulbo Seco 1% 29 °C (84.2 °F)
- Temperatura de Bulbo Húmedo 1% 23 °C (73.4°F)

b) Condiciones de Diseño del Aire Interior:

Oficinas 24 °C (75°F) / 50-60% H.R. (No Controlada)

Lobby y hall de ascensores 24 °C (75°F) / 50-60% H.R. (No Controlada)

Salas de reuniones 24 °C (75°F) / 55-60% H.R. (No Controlada)

- Fluctuación condiciones interiores 2 °F temperatura de bulbo seco

c) Equipos eléctricos e Iluminación:

Equipos: 55 W por computadora / 55 W por monitor
(ASHRAE, 2001, p. 633). Como no se tiene detalle de equipamiento se ha considerado un ratio de 11 W/m^2 por carga de equipos que resulta de tener un espacio de trabajo con una computadora y un monitor cada 9.5 m^2 de área neta.

Iluminación: El detalle considerado en el cálculo de cargas térmicas se indica en las tablas 3-13 a la 3-16, el cual varía entre 6.88 y 13.2 watts / m^2 .

Factor de disipación de calor sensible de iluminación: 0.1

d) Calor producido por personas:

Oficinas y otros 75 W Sensible / 55 W Latente por persona
(ASHRAE, 2001, p. 625)

- Nivel Ocupacional en oficinas: Según RNE de $9.5 \text{ m}^2/\text{personas} = 10 \text{ personas/ } 1000 \text{ ft}^2$ (93 m^2).
- Nivel Ocupacional en Lobby: Según estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2010 de $10 \text{ personas/ } 1000 \text{ ft}^2$ (93 m^2). (ANSI/ASHRAE, 2010, p. 13)
- Nivel Ocupacional en Salas de reuniones y conferencias: Según estándar ANSI/ASHRAE de $50 \text{ personas/ } 1000 \text{ ft}^2$ (93 m^2). (ANSI/ASHRAE, 2010, p. 12)

e) Renovación de aire: $1.3*5 \text{ cfm/persona} + 1.3*0.06 \text{ cfm / área en ft}^2$.

El valor total en CFM se indica en la tabla 3-4.

f) Coeficientes de Transmisión térmica y coeficiente de ganancia de calor solar:

La envolvente opaca:

- Coeficiente de Transmisión Paredes Exteriores: 0.45 Btu/hr.Ft² °F.
- Coeficiente de Transmisión Muros Exteriores: 0.45 Btu/hr.Ft² °F.
- Coeficientes de Transmisión Techos: 0.30 Btu/hr.Ft².°F.

Envolvente vidriada:

- Coeficientes de Transmisión Vidrios: 1.15 Btu/hr.Ft².°F
- Factor de sombra Vidrios: 0.91

Con los parámetros de diseño y siguiendo la metodología del ASHRAE Fundamental Handbook, se determina las capacidades requeridas por el sistema de aire acondicionado, siendo la capacidad total:

$$Q_{\text{total}} = Q_{rs} + Q_{rl}$$

Donde la Carga de refrigeración sensible (Q_{rs}) es la que cambia la temperatura y la Carga refrigeración latente (Q_{rl}) no cambia la temperatura pero si la humedad del ambiente (contenido de agua).

Para el cálculo de la carga térmica sensible (Q_s) se emplea la siguiente expresión:

$$Q_{rs} = q_{s_ren} + q_{s_ilu} + q_{s_vidrio} + q_{s_sup} + q_{s_equip} + q_{s_pers}$$

Donde:

q_{s_ren} = carga sensible por renovación o infiltración de aire exterior en Watts.

q_{s_ilu} = carga sensible por iluminación en Watts.

q_{s_vidrio} = carga sensible debida a la radiación solar a través de las superficies vidriadas en Watts.

q_{s_sup} = carga sensible por transmisión y radiación a través de superficies de paredes, pisos o techos en Watts

q_{s_equip} = carga sensible debida a equipos internos en Watts.

q_{s_pers} = carga sensible debida a personas en Watts.

Para el cálculo de la carga térmica latente (Q_{rl}) se emplea la siguiente expresión:

$$Q_{rl} = q_{l_ren} + q_{l_pers}$$

Donde:

q_{l_ren} = carga latente por renovación de aire exterior en Watts.

q_{l_pers} = carga latente debida a la ocupación en Watts.

- Cálculo de carga sensible por renovación o infiltración de aire exterior:

$$q_{s_ren} = Q \cdot p \cdot c_p \cdot \Delta t = 1200 \cdot Q \cdot \Delta t \dots \text{(ASHRAE, 2001, p. 513)}$$

Donde:

q_{s_ren} = carga sensible por renovación de aire exterior en Watts.

Q = flujo de aire en m^3/s

p = densidad de aire en kg/m^3

c_p = calor específico del aire en $J/(Kg.K)$

Δt = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior en Kelvin.

- Cálculo de carga sensible por iluminación:

$$q_{s_ilu} = W * F_{ilu} * F_{use} \dots \text{(ASHRAE, 2001, p. 624)}$$

Donde:

q_{s_ilu} = carga sensible por iluminación en Watts.

W = potencia de luminarias en Watts

F_{ilu} = Factor de ganancia por convección (depende del tipo de luminaria, si es recesada, colgante, ventilada hacia el falso cielo, etc.)

F_{use} = Factor de uso

- Cálculo de carga sensible por superficies vidriadas:

$$q_{s_vidrio} = A * E_{rad} * SHGC * IAC + U * A * \Delta t \dots \text{(ASHRAE, 2001, p. 635)}$$

Donde:

q_{s_vidrio} = carga sensible por ganancia solar a través del vidrio en Watts.

A = área de la superficie de pared, piso o techo en m^2

E_{rad} = radiación directa, diferida y reflejada en W/m^2

SHGC = Coeficiente de ganancia de calor solar del vidrio

IAC = coeficiente de atenuación por elementos que generan sombra. Se considera 1 cuando no hay elementos.

U = coeficiente de transmitancia térmica del vidrio en W/m²-K.

Δt = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior en Kelvin.

- Calculo de carga sensible por superficies de paredes, pisos o techos

$$q_{s_sup} = \sum_{k=0}^n U_k * A_k * \Delta t \dots (\text{ASHRAE, 2001, p. 635})$$

Donde:

q_{s_sup} = carga sensible por conducción de calor en superficies en Watts.

U = coeficiente de transmitancia térmica que incluye los elementos, montaje y película de aire superficial en W/m²-K.

A = área de la superficie de pared, piso o techo en m²

Δt = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior en Kelvin.

- Nota: El coeficiente U se determina de un componente como muro, ventana, piso o techo, que contiene n elementos se calcula de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \sum_{n=0}^m L_n/k_n} \dots (\text{ASHRAE, 2001, p. 665})$$

Donde:

h_e, h_i = coeficiente de transferencia de calor superficial del componente exterior e interior.

L_n = espesor de cada elemento del componente en metros

k_n = conductividad térmica de cada elemento del componente en W/m-k.

- Cálculo de carga latente:

$$q_{l_ren} = Q * \Delta W * (4775 + 1998 * \Delta t) \dots \text{(ASHRAE, 2001, p. 513)}$$

Donde:

q_{l_ren} = carga latente por renovación de aire exterior en Watts.

ΔW = diferencia de ratio de humedad entre el interior y el exterior, masa de agua/masa de aire seco en kg/kg.

Aplicando los parámetros anteriormente expuestos, se ha realizado el cálculo de la Carga Térmica a presentarse en el punto de máxima exposición, obteniéndose los resultados que a modo de resumen presentamos en el Cuadro Resumen de Cálculo de Carga Térmica, que se presentan a continuación:

Tabla 3-1 Cuadro Resumen de Cálculo de Carga Térmica

	Time of Peak (TIMESTAMP)	HVAC Zone Eq & Other Sensible Heating [W]	HVAC Zone Eq, Other Sensible Air Cooling [W]	HVAC Terminal Unit Sensible Heating [W]	HVAC Terminal Unit Sensible Cooling [W]	HVAC Input Heated Surface Heating [W]	HVAC Input Cooled Surface Cooling [W]	People Sensible Heat Addition [W]	Lights Sensible Heat Addition [W]	Equipment Sensible Heat Addition [W]	Window Heat Addition [W]	Interzone Air Transfer Addition [W]	Infiltration Heat Addition [W]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Addition [W]	Equipment Sensible Heat Removal [W]	Window Heat Removal [W]	Interzone Air Transfer Removal [W]	Infiltration Heat Removal [W]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Removal [W]
PISO1-SLDPCCTCNUSSM/PLS	07-JAN-15:00	0.00	0.00	-22000.81	0.00	0.00	0.00	13249.82	4168.95	3500.64	14522.39	0.00	1311.96	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-14752.96
PISO1-CIRCULACIONCOMUN	19-DEC-07:03	-3.33	-2426.70	3.33	0.00	0.00	0.00	222.69	604.00	182.55	0.00	0.00	0.00	1513.22	0.00	-0.00	0.00	-95.76	0.00
PISO1-SALADEREUNIONES	05-MAY-13:13	0.00	0.00	-22024.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	164.75	22163.39	0.00	111.76	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-415.89
PISO1-RECEPCION	07-DEC-11:32	0.00	0.00	-9296.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.75	4651.72	0.00	87.89	4526.67	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
PISOTIPICO-CIRCULACIONCOMUN	30-JAN-07:02	0.00	-34484.59	0.00	-1070.02	0.00	0.00	2459.99	7248.00	2190.57	0.00	0.00	0.00	26400.95	0.00	-0.00	0.00	-2744.89	0.00
PISOTIPICO-OFICINACENTRAL	04-MAR-16:20	-28146.76	-215782.10	28146.76	0.00	0.00	0.00	39875.15	49159.31	51577.52	0.00	0.00	16977.97	58212.15	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
PISOTIPICO-OFICINAPERIMETRAL2	06-JUN-14:10	0.00	-120886.59	0.00	-2738.71	0.00	0.00	7319.27	0.00	13321.49	235436.32	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-3385.89	-129065.89
PISOTIPICO-OFICINAPERIMETRAL1	28-FEB-09:50	-12716.09	-456484.92	12716.09	0.00	0.00	0.00	23814.00	0.00	33205.18	786178.67	0.00	6870.05	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-395582.98
PISOTIPICO-OFICINAPERIMETRAL	19-DEC-15:30	-5522.71	-122404.70	5522.71	0.00	0.00	0.00	9907.69	0.00	12743.81	144650.05	0.00	3114.30	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-48011.14
PISO14-CIRCULACIONCOMUN	20-DEC-07:02	0.00	-4315.24	0.00	-102.94	0.00	0.00	203.40	604.00	182.55	0.00	0.00	0.00	3678.71	0.00	-0.00	0.00	-250.48	0.00
PISO14-OFICINACENTRAL	05-MAR-13:30	-2943.81	-29540.89	2943.81	0.00	0.00	0.00	2505.99	4094.94	4298.13	0.00	0.00	1861.32	16780.32	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
PISO14-OFICINAPERIMETRAL2	01-MAY-13:30	0.00	-15127.65	0.00	-20.46	0.00	0.00	554.73	0.00	1110.12	19739.75	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-6135.71
PISO14-OFICINAPERIMETRAL1	28-FEB-10:40	-1183.66	-39158.54	1183.66	0.00	0.00	0.00	2151.35	0.00	2767.10	46252.40	0.00	664.21	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	-12676.51
PISO14-OFICINAPERIMETRAL	19-DEC-14:40	-4691.5	-14138.50	4691.5	0.00	0.00	0.00	825.69	0.00	1061.98	11387.66	0.00	265.04	598.14	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00
SOTANO14-ESTACIONAMIENTOS1	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOTANO14-CIRCULACIONCOMUN	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO1-SS.HH1	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISOTIPICO-SS.HH1	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISOTIPICO-SS.HH2	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO14-SS.HH1	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PISO14-SS.HH2	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AZOTEA-EQUIPOS	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Peak Cooling Sensible Heat Gain Components

Fuente: Propia

3.1.2 Cálculo de equipos de aire acondicionado

Una vez calculada la carga térmica en el edificio, se selecciona el número de unidades chillers. En el presente proyecto se considera un chiller para abastecer cargas cuando esté funcionando un evento o solo áreas generales y un chiller para completar la carga total.

Carga térmica total del edificio = 1477 kW = 420 Tons

Carga de áreas comunes = 85 kW = 24 Tons

Entonces se selecciona:

Chiller_1 que funcione desde 24 Tons.

La carga mínima de funcionamiento del chiller_1 es el 20% de su máxima capacidad.

Entonces:

$$24 \text{ Tons} = 0.2 * \text{Cap}_{\text{chiller}_1} \Rightarrow \text{Cap}_{\text{chiller}_1} = 120 \text{ Tons}$$

Chiller_2 se selecciona para completar la carga térmica restante.

$$\text{Cap}_{\text{chiller}_2} = 420 \text{ Tons} - 120 \text{ Tons} = 300 \text{ Tons}$$

El chiller se encarga de enfriar el agua para ser suministrada a cada una de las manejadoras de aire o unidades terminales, el cual absorbe calor de las manejadoras para luego volver al chiller para ser enfriada de nuevo. Es decir, el agua sirve como un medio para enfriar el aire en el ambiente. El ciclo del agua es cerrado.

El flujo de transferencia de calor en un intercambiador de calor fluido-fluido se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$q_w = 500 * \dot{V}_{gal} * (T_{ret} - T_{sal}) = 500 * \dot{V}_{gal} * \Delta t \dots \text{(Wang \& Lavan, 1999, p. 88)}$$

Donde:

q_w = ratio de transferencia de calor en Btu/hr

\dot{V}_{gal} = caudal de flujo de agua en gpm

T_{sal}, T_{ret} = temperatura de salida y entrada de el intercambiador en °F

La temperatura de diseño de salida de agua del chiller es de 44 °F y la temperatura de retorno de agua al chiller es de 54°F tal como recomienda el estándar ASHRAE las cuales cumplen las condiciones AHRI. (ANSI/ASHRAE/IES, 2010, p. 43)

Aplicamos estos valores para calcular el flujo de agua en el circuito del evaporador del chiller de 300 Tons (3,600,000 Btu/h):

$$3,600,000 = 500 * \dot{V}_{bom_300} * (55 - 45) = 500 * \dot{V}_{bom_300} * 10$$

Entonces: $\dot{V}_{bom_300} = 720 \text{ gpm} = 0.04542 \text{ m}^3/\text{s}$

Aplicamos estos valores para calcular el flujo de agua en el circuito del evaporador del chiller de 120 Tons (1,440,000 Btu/h):

$$1,440,000 = 500 * \dot{V}_{bom_120} * (54^\circ\text{F} - 44^\circ\text{F}) = 500 * \dot{V}_{bom_120} * 10$$

Entonces: $\dot{V}_{bom_120} = 288 \text{ gpm} = 0.01817 \text{ m}^3/\text{s}$

La temperatura de salida de agua de condensación de la torre es de 85 °F y la temperatura de retorno de agua de condensación es 95°F tal como recomienda el estándar ASHRAE las cuales cumplen las condiciones AHRI. (ANSI/ASHRAE/IES, 2010, p. 43)

El estándar ARHI recomienda seleccionar un flujo de acuerdo a:

$$\dot{V}_{cond} = 3gpm/ton... \text{ (Wang \& Lavan, 1999, p. 111)}$$

Entonces: $\dot{V}_{cond_300} = 3*300 = 900 \text{ gpm} = 0.05678 \text{ m}^3/\text{s}$

La altura o head se calcula considerando la altura de agua helada, la presión a través de las bombas y la presión de chiller. La altura total es la suma de la altura estática más la altura dinámica, dada por la siguiente formula:

$$H_t = H_s + H_v$$

Donde:

H_t = altura total en metros.

H_s = altura estática en metros.

H_v = altura dinámica en metros.

$$H_v = \frac{V_o^2}{2g}$$

Donde:

V_o = velocidad del agua en m/s

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

La altura estática para suministrar agua helada a cada piso es de 27 metros (90 ft.) la cual será considerada en la bomba secundaria.

$$H_{bom_sec} = 90 \text{ ft.} = 269,008 \text{ N/m}^2$$

La altura dinámica será considerada en la bomba primaria, así como también altura estática relacionada a componentes y pérdidas:

Entonces: Altura de bomba.

$$H_{bom_120} = 60 \text{ ft.} = 179,338 \text{ N/m}^2$$

$$H_{bom_300} = 60 \text{ ft.} = 179,338 \text{ N/ m}^2$$

La altura de la bomba de condensación es tanto dinámica como estática:

$$H_{bom_cond_300} = 60 \text{ ft} + 20 \text{ ft} = 80 \text{ ft.} = 239,118 \text{ N/m}^2$$

La potencia de las bombas se calcula con el caudal de las bombas, eficiencia mecánica, eficiencia eléctrica y la altura tal como se describió en la sección 2.7.1.

$$P_{bom_120} = 179,338 \text{ N/ m}^2 * 0.01817 \text{ m}^3/\text{s} / (0.7*0.92)$$

$$P_{bom_120} = 5060 \text{ W}$$

$$P_{bom_300} = 179,338 \text{ N/ m}^2 * 0.04542 \text{ m}^3/\text{s} / (0.75*0.93)$$

$$P_{bom_300} = 11,678 \text{ W}$$

$$P_{bom_sec} = 269,008 \text{ N/m}^2 * (0.01817 \text{ m}^3/\text{s} + 0.04542 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.8*0.94)$$

$$P_{bom_sec} = 22,748 \text{ W}$$

$$P_{bom_cond_300} = 239,118 \text{ N/m}^2 * 0.05678 \text{ m}^3/\text{s} / (0.78*0.93)$$

$$P_{bom_cond_300} = 18,716 \text{ W}$$

Se selecciona una torre de enfriamiento asociada al chiller de 300 tons y de 900 gpm (0.05678 m³/s) de caudal de agua, el cual expulsan el calor del agua proveniente del circuito de condensación del chiller (sección 2.7.4 y sección 2.7.3). La torre de enfriamiento cumplirá la eficiencia mínima del estándar ASHRAE de acuerdo a la siguiente formula:

$$Eficiencia_{torre_300} = 0.00323 \text{ m}^3/\text{s.kW} \dots (\text{ANSI/ASHRAE/IES, 2010, p. 66})$$

$$P_{torre_300} = 0.05678 / 0.00323 \text{ m}^3 = 17.5 \text{ kW.}$$

3.1.3 Descripción del sistema de aire acondicionado en el edificio

Se seleccionan los equipos de aire acondicionado que cumplan con los requerimientos de la sección anterior y que estén disponibles en el mercado. El proyecto considera dos chillers: un chiller enfriado por agua de capacidad 300 toneladas y un chiller enfriado por aire de 120 toneladas de refrigeración. Una torre de enfriamiento asociada al chiller de 300 tons. El agua de la torre transportada hacia el chiller se realiza mediante una bomba de 25 HP.

También, existe una red de tuberías que suministran la circulación de agua helada en el edificio hacia cada uno de los fan coils de los ambientes climatizados: el chiller de 300 tons trabaja con una bomba primaria de 15 HP y una bomba secundaria de 30 HP, el chiller de 120 tons trabaja con una bomba primaria de 7.5 HP.

Las unidades tipo Fan Coil utilizan el agua helada para producir el enfriamiento en el interior de las áreas comunes del edificio. Cada una cuenta con un sensor de temperatura ambiente, y respecto a la temperatura deseada se deben de controlar los equipos mediante sus respectivos controladores.

El cuadro de detalles del equipamiento de climatización del edificio se detalla en las tablas 3.2, 3.3 y 3.4:

Tabla 3-2 Enfriadoras del Sistema De Aire acondicionado

Chiller con condensador enfriado por agua de 300 Ton. de refrigeración		
1	Marca / Modelo	CARRIER / 19XRV- 300
2	Capacidad(ton)/tipo	300 / Tornillo
3	Gas Refrigerante/Carga max.	R134a / 850lb
4	Ef. a Plena Carga(COP) / IPLV	0.624 / 0.50
5	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
6	Tarjeta Comunic. Protocolo	Abierto
7	Temperatura de agua: entrada/ salida	54 °F / 44 °F
8	Temperatura de agua: entrada/ salida	85 °F / 95 °F
9	Potencia	180 kW
10	Ubicación	Azotea
11	Cantidad	1
Chiller con condensador enfriado por aire de 120 Ton. de refrigeración		
1	Marca / Modelo	CARRIER / 30RB120
2	Capacidad(ton)/tipo	120/Tornillo
3	Gas Refrigerante/Carga max.	R410a / 375lb
4	Ef. a Plena Carga(COP) / IPLV	1.03 / 0.72
5	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
6	Tarjeta Comunic. Protocolo	Abierto
7	Temperatura de agua: entrada/ salida	54 °F / 44 °F
8	Temperatura de aire: entrada	85 °F
9	Potencia	128.6 kW
10	Ubicación	Azotea
11	Cantidad	1

Fuente: Propia

Tabla 3-3 Bombas del Sistema De Aire acondicionado

Bomba de agua helada primaria del circuito del evaporador asociada al Chiller de 300 Tons		
1	Marca / Modelo	BELL & GOSSETT / SERIE 1510
2	Caudal (GPM)	720 (0.04542 m³/s)
3	Tipo	Centrífuga vertical
4	Potencia Motor Eléctrico	15 HP (11,185 W)
5	Altura (Pies de C.A)	60
6	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
7	Accesorio de control de arranque	Arrancador electrónico
8	Ubicación	Azotea
9	Cantidad	1
Bomba de agua helada Secundaria del circuito del evaporador asociada al Chiller de 300 Tons		
1	Marca / Modelo	BELL & GOSSETT / SERIE 1510
2	Caudal (GPM)	960 (0.06057 m³/s)
3	Tipo	Centrífuga vertical
4	Potencia Motor Eléctrico	30 HP (22,371 W)
5	Altura (Pies de C.A)	90
6	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
7	Accesorio de control de arranque	Variador de frecuencia
8	Ubicación	Azotea
9	Cantidad	1
Bomba del circuito de Condensación asociada al Chiller de 300 Tons		
1	Marca / Modelo	BELL & GOSSETT / SERIE 1510
2	Caudal (GPM)	900 (0.05678 m³/s)
3	Tipo	Centrífuga vertical
4	Potencia Motor Eléctrico	25 HP (18,642 W)
5	Altura (Pies de C.A)	80
6	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
7	Accesorio de control de arranque	Arrancador electrónico
8	Ubicación	Azotea
9	Cantidad	1

Bomba de agua helada primaria del circuito del evaporador asociada al Chiller de 120 Tons		
1	Marca / Modelo	BELL & GOSSETT / SERIE 1510
2	Caudal (GPM)	288 (0.01817 m³/s)
3	Tipo	Centrífuga vertical
4	Potencia Motor Eléctrico	7.5 HP (5,593 W)
5	Altura (Pies de C.A)	60
6	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
7	Accesorio de control de arranque	Variador de frecuencia
8	Ubicación	Azotea
9	Cantidad	1

Fuente: Propia

Tabla 3-4 Torre de enfriamiento del Sistema De Aire acondicionado

Torre de enfriamiento asociada al chiller de 300 Tons		
1	Marca / Modelo	AMCOT / ST-350
2	Caudal (GPM)	900 (0.05678 m³/s)
3	Tipo	Inducido Celda Multiple
4	Potencia Motor eléctrico	10 HP (7,457 W)
5	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
6	Transmisión Ventilador	Faja/polea
7	Accesorio de control de arranque	Variador de frecuencia
8	Ubicación	Azotea
9	Cantidad	1

Fuente: Propia

3.2 Sistema de ventilación en el edificio

3.2.1 Cálculo de tasas de ventilación

La sección 6.2.2 del estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2010, indica los cálculos requeridos para proporcionar ventilación mecánica en cada ambiente.

(ANSI/ASHRAE, 2010, p. 11). El mismo estándar brinda los ratios de caudal requeridos por cada tipo de ambiente y número de personas. (ANSI/ASHRAE, 2010, pp. 12-14).

Para calcular el aire requerido se considera el tipo de ambiente, área y número de personas.

- Nivel Ocupacional en oficinas: Según RNE de 9.5 m²/personas = 10 personas/ 1000 ft² (93 m²).
- Nivel Ocupacional en Lobby: Según estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2010 de 10 personas/ 1000 ft² (93 m²). (ANSI/ASHRAE, 2010, p. 13)
- Nivel Ocupacional en Salas de reuniones y conferencias: Según estándar ANSI/ASHRAE de 50 personas/ 1000 ft² (93 m²). (ANSI/ASHRAE, 2010, p. 12)

Cálculo de renovación de aire requerido en el ambiente (V_{bz}):

$$V_{bz} = R_p * P_Z + R_a * A_Z \quad \dots \text{ (ANSI/ASHRAE, 2010, p. 11)}$$

Donde:

A_Z = área del ambiente en m²

P_Z = número de personas durante uso típico

R_p = flujo de aire exterior requerido por persona

R_a = flujo de aire exterior requerido por área.

Cálculo para una oficina típica:

$$V_{bz} = 5 * 90 + 0.06 * (840 * 10.7) = 992.5 \text{ cfm}$$

El caudal de aire a suministrar por el sistema de ventilación depende de la efectividad de distribución.

$$V_{oz} = \frac{V_{bz}}{E_z} \dots (\text{ANSI/ASHRAE, 2010, p. 15})$$

Donde

V_{oz} = caudal de aire a suministrar por el sistema de ventilación

E_z = efectividad de distribución de aire en la zona

Para la oficina anterior, la cual tiene una distribución de sólo aire fresco con aire acondicionado distribuido en falso cielo o expuesto en techo, tiene un $E_z = 1$. (Tabla 6-2 de estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2010)

$$V_{oz} = \frac{992.5}{1} = 992.5 \text{ cfm}$$

El caudal final a suministrar por el sistema de ventilación (V_{fz}) considerará una mejora en la renovación de aire. La guía LEED v4 recomienda dimensionar el sistema con un 30% adicional al valor requerido en el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2010. (U.S. Green Building Council, 2013, pág. 645)

Entonces en el ambiente de oficina anterior:

$$V_{fz} = 1.3 * V_{oz} = 1.3 * 992.5 = 1291 \text{ cfm}$$

Cálculo para un hall de ascensores típico:

$$V_{bz} = 0.06 * (100 * 10.7) = 64.6 \text{ cfm}$$

El caudal de aire a suministrar por el sistema de ventilación depende de la efectividad de distribución.

$$V_{oz} = \frac{V_{bz}}{E_z} \dots (\text{ANSI/ASHRAE, 2010, p. 15})$$

Para el hall de ascensores, el cual tiene una distribución de sólo aire fresco con aire acondicionado distribuido en falso cielo o expuesto en techo, tiene un $E_z = 1$. (Tabla 6-2 de estándar ANSI/ASHRAE 62.1-2010)

$$V_{oz} = \frac{64.6}{1} = 64.6 \text{ cfm}$$

El caudal final a suministrar por el sistema de ventilación (V_{fz}) considerará una mejora en la renovación de aire. Entonces el caudal final a suministrar será:

$$V_{fz} = 1.3 * V_{oz} = 1.3 * 64.6 = 84 \text{ cfm}$$

Este procedimiento de cálculo se aplica a todos los ambientes. En la tabla 3-5 se indica los valores de caudales finales a suministrar por el sistema de ventilación.

Tabla 3-5 Caudales de aire para cada ambiente del edificio

	Zona	Área (m ²)	Pers. / 1000 ft ²	Nº Pers	R p	Ra	Vbz.	Factor	Vfz. (cfm)
Piso 1	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Lobby de ingreso	120	10	13	5	0.06	142.1	1.3	185
	Sala de reuniones	278	50	150	5	0.06	929.5	1.3	1208
	Sala de Capacitación	318	50	171	5	0.06	1061	1.3	1380
Piso 2	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 3	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 4	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 5	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 6	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 7	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 8	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 9	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 10	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 11	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 12	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 13	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291
Piso 14	Hall de ascensores	100	0	0	0	0.06	64.6	1.3	84
	Oficina	840	10	90	5	0.06	992.5	1.3	1291

Fuente: Propia

3.2.2 Cálculo de equipos de ventilación

Por los diferentes horarios de uso se define cuatro equipos de ventilación:

V_1 =Equipo para suministrar aire de renovación en sala de reuniones.

V_1 =Equipo para suministrar aire de renovación en sala de capacitaciones.

V_4 =Equipo para suministrar aire de renovación en halls de ascensores y lobby.

V_1 =Equipo para suministrar aire de renovación en oficinas.

La caudales serán entonces:

$$V_1 = V_{fz_reu} = 1,208 \text{ cfm} = 0.5701 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_2 = V_{fz_cap} = 1,380 \text{ cfm} = 0.65129 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_3 = V_{fz_hall2} + V_{fz_hall3} + \dots + V_{fz_hall14} + V_{fz_lobby} = 13 \cdot 84 + 185 = 1,277 \text{ cfm} \\ = 0.603 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_4 = V_{fz_ofi2} + V_{fz_ofi3} \dots + V_{fz_ofi14} = 13 \cdot 1291 = 16,783 \text{ cfm} = 7.921 \text{ m}^3/\text{s}$$

La presión se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$H_t = H_s + H_{vel} + H_{filtro}$$

Donde:

H_{filtro} = caída de presión por el filtro.

H_{vel} = presión de velocidad

H_s = presión estática

La presión de velocidad se calcula en base a la velocidad promedio de salida del ventilador

$$H_{vel} = \frac{p \cdot V_o^2}{2 \cdot g} \dots \text{(Wang S. K., 2000, p. 15.5)}$$

Donde:

H_{vel} = presión del ventilador en la salida del ventilador en Pa.

p = densidad del aire

V_o = velocidad media del aire en m/s

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

El proyecto considera un filtro MERV 13 de alta eficiencia, como es recomendado por LEED v4. (U.S. Green Building Council, 2013, pág. 654).

Por lo que:

$$H_{filtro} = 1.4 \text{ in W.C (350 Pa)} \dots \text{(Wang S. K., 2000, p. 15.68)}$$

La altura total es el ventiladores de 2 in W.C. (500 Pa)

La potencia de los ventiladores se calcula en base al caudal, eficiencia mecánica, eficiencia eléctrica y presión (Sección 2.7.2).

La eficiencia mecánica es de 0.3 los ventiladores pequeños del proyecto y de 0.4 en el ventilador grande del proyecto.

La eficiencia del motor eléctrico se determina de acuerdo a la potencia y está indicada en el estándar ASHRAE 90.1-2010. (ANSI/ASHRAE/IES, 2010, p.

87)

$$P_{V1} = 500 \text{ N/ m}^2 * 0.5701 \text{ m}^3/\text{s} / (0.3*0.91)$$

$$P_{V1} = 1,044 \text{ W}$$

$$P_{V2} = 500 \text{ N/ m}^2 * 0.65129 \text{ m}^3/\text{s} / (0.3*0.91)$$

$$P_{V2} = 1,192 \text{ W}$$

$$P_{V3} = 500 \text{ N/ m}^2 * 0.603 \text{ m}^3/\text{s} / (0.3*0.91)$$

$$P_{V3} = 1,104 \text{ W}$$

$$P_{V4} = 500 \text{ N/ m}^2 * 7.921 \text{ m}^3/\text{s} / (0.4*0.94)$$

$$P_{V4} = 10,533 \text{ W}$$

3.2.3 Descripción del sistema de ventilación en el edificio

Los ventiladores utilizados en el proyecto son para suministrar inyección de aire fresco a cada uno de los ambientes con ocupación. Se ha seleccionado ventiladores de marcas disponibles en el mercado que cumplan con los requerimientos de potencia, caída de presión y caudal indicados en la sección anterior.

El cuadro de detalles del equipamiento de ventilación del edificio se detalla en la tabla 3.6.

Tabla 3-6 Equipamiento del sistema de ventilación del edificio

Sistema De Ventilación Mecánica (Inyección en Oficinas piso 2-19)		
1	Marca / Modelo	TWIN CITY / BSI 402AHP
2	Caudal (CFM)	16800 (7.92872 m³/s)
3	Eficiencia hidráulica	79%
4	Eficiencia eléctrica	94%
5	Potencia	15 HP (11,185 W)
6	Altura (Pulg. de C.A)	2
7	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
8	Accesorio de control de arranque	Arrancador electrónico
9	Ubicación	Azotea
10	Cantidad	1
Sistema De Ventilación Mecánica (Inyección en salas de reuniones, salas de capacitaciones y áreas comunes)		
1	Marca / Modelo	Lau Fan / A 10-10
2	Caudal (CFM)	1380 (0.65129 m³/s)
3	Eficiencia hidráulica	69%
4	Eficiencia eléctrica	91%
5	Potencia	1.5 HP (1,119 W)
6	Altura (Pulg. de C.A)	2
7	Voltaje (VAC)	380/3f/60Hz
8	Accesorio de control de arranque	Variador de frecuencia
9	Ubicación	Piso 1 (2 equipos) y Azotea (1 equipo)
10	Cantidad	3

Fuente: Propia

3.3 Descripción del sistema de control del aire acondicionado

3.3.1 Narrativa de Requerimiento

El control del aire acondicionado es el más importante en relación al consumo de energía, ya que los equipos de climatización tales como chillers, bombas y torres pueden significar más del 50% del consumo total de una edificación.

La eficiencia energética se logra en aprovechar la eficiencia del chiller y utilizando variadores de frecuencia para las bombas secundarias para regular el caudal de agua, además de utilizar variadores de frecuencia en las torres de enfriamiento para comandar la temperatura de salida de agua de las torres de enfriamiento.

El chiller es eficiente a cargas parciales tal como se indica en el cuadro de especificaciones de la tabla 3.2. Se considera un control que indique el consumo de energía del chiller y en base a un consumo establecido mediante los resultados de un modelamiento energético, realizar el cambio de un chiller a otro, incluyendo sus bombas asociadas.

El ahorro energético en las bombas se da mediante el control de la diferencia de temperatura de la salida y entrada de agua helada en el circuito del evaporador del chiller y la presión de demanda de agua helada. La temperatura de salida se trata de mantener constante a 44 °F, si la temperatura de regreso de agua no tiene mucha variación, es decir es menor a 54 °F, significa que la necesidad térmica del edificio es poca, por ende se reduce el caudal de agua del chiller. En cambio, si la diferencia de temperatura es mayor ingresará como un

parámetro en el control del chiller y este operará a un mayor porcentaje de carga. También, si existe una menor demanda de agua helada se apagarán los equipos Fan Coils, por ende el recorrido de agua será menor y se incrementará la presión, para esto se ubica un sensor para monitorear la diferencial de presión en la tubería de agua helada en el Fan Coil más alejada. Cuando la presión se incrementa, se disminuye el caudal de agua de modo que se logra un importante ahorro de energía. Cuando la presión baja, quiere decir que están utilizándose los equipos Fan Coils, por ende se incrementará el caudal de agua en la bomba secundaria, dando como resultado un incremento en la presión de manera indirecta.

Se logra eficiencia energética usando variadores de velocidad (sección 2.9.1) en los motores de los ventiladores de las torres de enfriamiento, comandados por variadores de frecuencia. Estos variadores de frecuencia operarán de acuerdo a la señal enviada por sensores de temperatura del agua en las tinas de las torres de enfriamiento. De este modo, se conseguirá reducir el consumo de energía eléctrica de las torres de enfriamiento reduciendo la velocidad de los motores para mantener la temperatura de salida del agua en base al sensor de temperatura.

3.3.2 Cuadro de señales de control

En el siguiente cuadro de señales se indican los parámetros de monitoreo para el sistema de control de la planta de agua helada:

Tabla 3-7 Señales de control de bombas, torres y chillers.

Bombas Secundarias	Monitoreo de equipo energizado, control del mismo y control del variador, incluye dispositivos de monitoreo y control
Bombas Primarias	Monitoreo de equipo energizado y control del mismo, incluye dispositivos de monitoreo y control
Bombas de Condensación	Monitoreo de equipo energizado y control del mismo, incluye dispositivos de monitoreo y control
Analizadores de red en tableros de Bombas y Chillers	Integración de analizadores de red, por protocolo MODBUS RTU
Chiller	Control y monitoreo de las variables (incluye los sensores necesarios para realizar el control y/o monitoreo requerido)
	Control de arranque y parada de cada chiller mediante relé SPDT (Control On/Off)
	Estatus de chiller (del tablero del Chiller)
	Medición de BTU en salida de chiller
	Temperatura de suministro
	Temperatura de retorno
Torres de Enfriamiento	Presión diferencial entre suministro y retorno de agua helada
	Control y monitoreo de las variables (incluye los sensores necesarios para realizar el control y/o monitoreo requerido)
	Detección de nivel alto de agua
	Estatus de torre
	Control de variador de válvula
	Temperatura del exterior de la torre
Temperatura del agua en la torre	

Fuente: Propia

Los termostatos se deben ubicar dentro del ambiente al climatizar. Se debe programar dos tipos de escenario: basado en horario y manual.

Tabla 3-8 Señales de control de termostatos y Fan Coils.

Termostato en Áreas Comunes – Pasadizos (Control de Fan Coil)	Control y monitoreo de las variables (incluye los sensores necesarios para realizar el control y/o monitoreo requerido):
	Temperatura
	Control on/off de válvula con actuador eléctrica de 2 vías para un diferencial máximo de 5 PSI.
Control de Fan Coil en Sala de Reuniones y Sala de usos múltiples	Control de velocidad de tres posiciones (03 señales).
	Control y monitoreo de las variables (incluye los sensores necesarios para realizar el control y/o monitoreo requerido):
	Temperatura
	Control on/off de válvula con actuador eléctrica de 2 vías para un diferencial máximo de 5 PSI.
	Control de velocidad de tres posiciones (03 señales).
	Medición de flujo de ingreso de aire exterior.

Fuente: Propia

3.3.3 Planos de distribución de la planta de agua helada con componentes

En la figura 3.1 se indica el plano de distribución de la planta de agua helada del edificio. Se puede identificar a los chillers, torres de enfriamiento, bombas de condensación, bombas primarias, bomba secundaria y variadores de frecuencia. Así como también la conexión entre estos equipos.

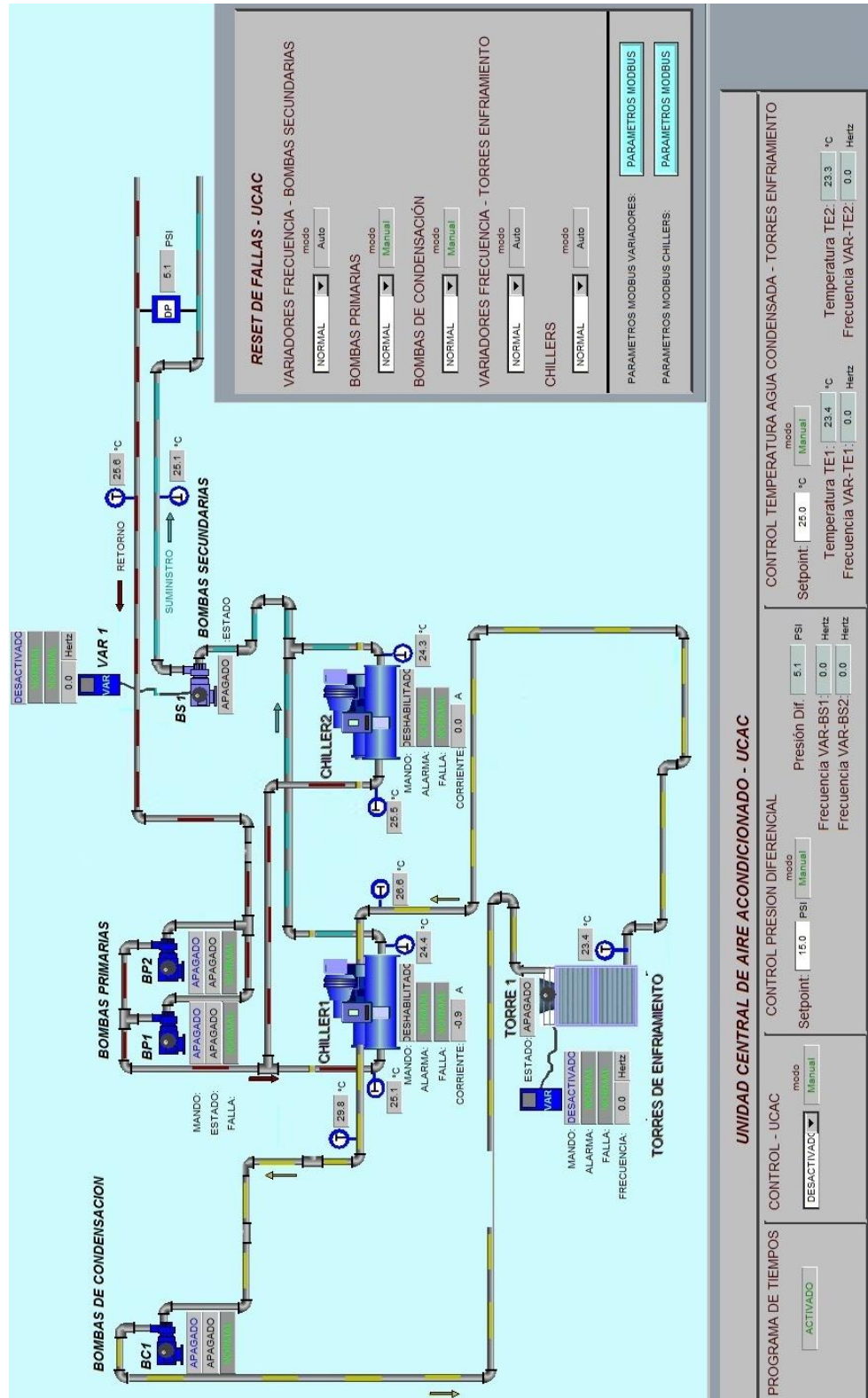


Figura 3.1 Plano de distribución de planta de agua helada.

Fuente: Propia

3.3.4 Diagrama de Control de presión de agua en la demanda del edificio mediante variadores de frecuencia en bomba secundaria

La variable controlada es la presión de agua del chiller en la demanda del edificio, el cual ha sido diseñado a 60 PSI. La variable manipulada es la frecuencia de velocidad del motor de la bomba secundaria. Las perturbaciones son las cargas térmicas internas en el edificio, el cual fluctúa en base a la cantidad de personas, iluminación y condiciones de clima.

El lazo de control se indica en la siguiente imagen:

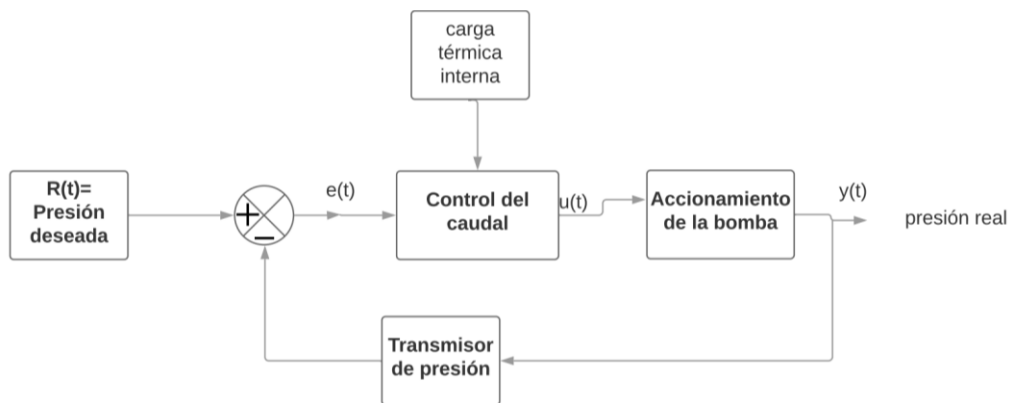


Figura 3.2 Sistema de control en lazo cerrado para el monitoreo de la presión en circuito secundario de chiller.

Fuente: Propia

$R(t)$ es el nivel deseado de presión de agua del chiller en la demanda del edificio. Su valor debe ser 60 PSI.

$e(t)$ es la diferencia entre el valor medido y el valor deseado, mediante un control proporcional se va a tratar de mantener esta diferencia en cero. Mientras mayor o menor sea la diferencia se va a requerir un mayor o menor caudal, de

modo que se pueda mantener una presión constante y suministrar suficiente agua helada a cada uno de los Fan Coils ubicados en todo el edificio.

El control del caudal indica el caudal que se transportará en el circuito secundario del chiller. En base al caudal requerido y la capacidad de la bomba, la señal de salida será la frecuencia a la cual trabajará el motor, esta puede ir incrementándose o no proporcionalmente de modo que al aumentar o no el caudal haga llegar a la presión de agua deseada.

3.3.5 Diagrama de Control de temperatura de agua de salida de la torre mediante variador de frecuencia en ventilador axial de la torre

La variable controlada es la temperatura de salida de agua de condensación de la torre (diseñado a 85 °F). La variable manipulada es la frecuencia de velocidad del motor del ventilador de la torre. Las perturbaciones son las condiciones climáticas.

El lazo de control se indica en la siguiente imagen:

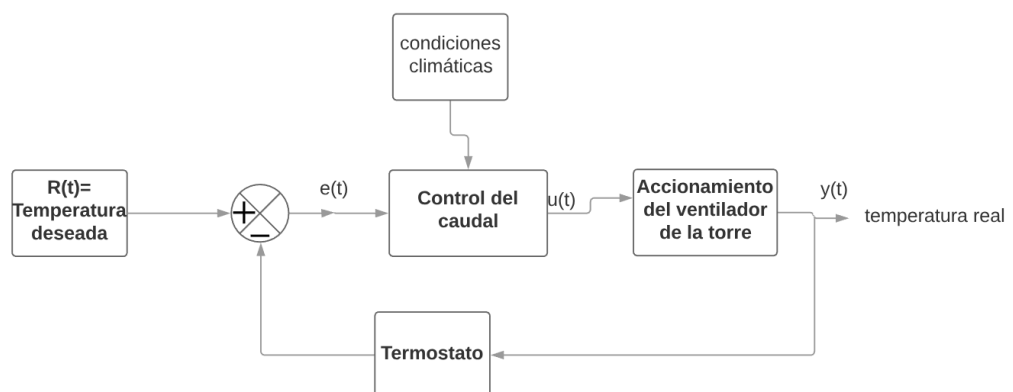


Figura 3.3 Sistema de control en lazo cerrado para el monitoreo del ventilador de la torre de enfriamiento.

Fuente: Propia

$R(t)$ es el nivel deseado de la temperatura de salida de agua de condensación de la torre. Su valor debe ser 85 °F.

$e(t)$ es la diferencia entre el valor medido y el valor deseado, mediante un control proporcional se va a tratar de mantener esta diferencia en cero. Mientras mayor o menor sea la diferencia se va a requerir una mayor o menor potencia del ventilador, de modo que se mantenga la temperatura de salida del agua de la torre estable.

El control del caudal indica el caudal de aire que se transfiere en la torre de enfriamiento hacia las gotas de agua, de modo que las gotas de agua disipen el calor al aire. En base al caudal requerido y el caudal máximo del ventilador de la torre, la señal de salida será la frecuencia a la cual trabajará el motor, esta puede ir incrementándose o no proporcionalmente de modo que al aumentar o no el caudal haga llegar a la temperatura de salida de la torre de enfriamiento se mantenga constante.

3.4 Descripción del sistema de control de la ventilación

3.4.1 Narrativa de Requerimiento

Hasta ahora hemos considerado la automatización del sistema de climatización, sin embargo, existe otro sistema principal, el cual consume menos energía pero no por eso menos importante, ya que tiene un alto impacto en la calidad del aire interior para cada espacio: el sistema de ventilación.

Para el sistema de ventilación, existirá un control con interruptor horario, el cual será comandado por un sistema centralizado de control, la lógica de

funcionamiento es el modo automático funcionara el ventilador de acuerdo al prendido y apagado automático, además se podrá poner el equipo en modo manual, en ese caso la operación podrá ser configurada por un operador.

Adicionalmente, se monitoreará el nivel de dióxido de carbono CO₂ en el ambiente de sala de capacitaciones y sala de reuniones del piso 1, por ser estos ambientes de alta concentración de personas. Monitoreando el nivel de CO₂ podemos disminuir el flujo de inyección de aire para estos ambientes. Necesitamos medir el flujo, para los equipos de 1,380 CFM, y te tenga un tipo de comunicación Modbus o BACnet, tal como se indica en el listado de señales de la tabla 3.9.

3.4.2 Cuadro de señales de control

Sistema de control de inyección de aire fresco

Tabla 3-9 Señales de control del sistema de ventilación

Sensor de CO ₂	Nivel de CO ₂ en ambientes con alta ocupación (alarma a los 750 y 1000 ppm) con alarmas
Inyector de Aire	Monitoreo de equipo energizado y control del mismo, incluye dispositivos de monitoreo y control
Control de Ventiladores en sala de capacitaciones y Sala de reuniones	Control y monitoreo de las variables (incluye los sensores necesarios para realizar el control y/o monitoreo requerido)
	Control mediante Variador de frecuencia

Fuente: Propia

3.4.3 Diagrama de Control del nivel de dióxido de carbono

La variable controlada es en nivel de CO₂ en el ambiente en ppm (partes por millón). La variable manipulada es la frecuencia de velocidad del motor del

ventilador. Las perturbaciones el nivel de CO₂ que ingresa en el ambiente debido a la fluctuación en ocupación del ambiente.

El lazo de control se indica en la siguiente imagen:

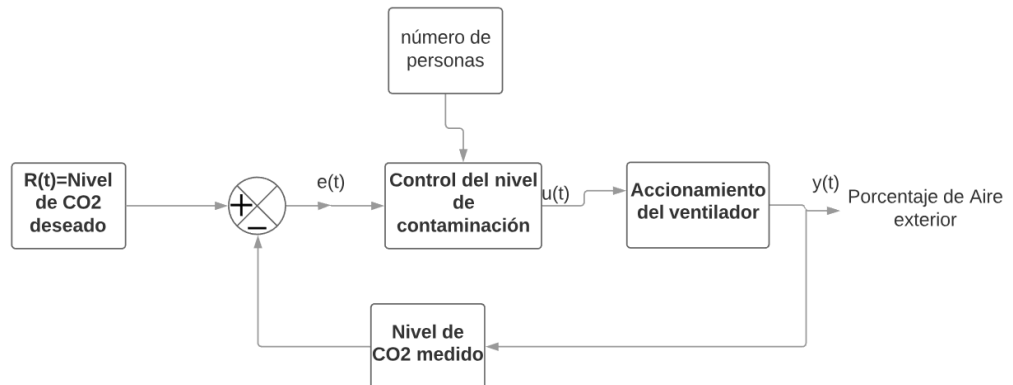


Figura 3.4 Sistema de control en lazo cerrado para el monitoreo de CO₂.

Fuente: Propia

$R(t)$ es el nivel deseado en concentración de CO₂.

$e(t)$ es la diferencia entre el valor medido y el valor deseado, cuando la diferencia es positiva no se realiza ninguna acción de control, en cambio, cuando la diferencia es negativa se mantiene prendido el ventilador con un nivel de frecuencia comandada por la señal $u(t)$.

El control del nivel de contaminación indica cuanto aire fresco se debe ingresar al ambiente para lograr el nivel de CO₂ deseado. El base al caudal requerido y la capacidad del ventilador, la señal de salida será la frecuencia a la cual trabajará el motor, esta puede ir incrementándose proporcionalmente de modo que se entregue una mayor cantidad de aire exterior $y(t)$ que diluye el nivel de CO₂, y así lograr no sobrepasar el nivel deseado.

3.5 Cálculo del ahorro energético en climatización mediante software

Para estimar el ahorro de energía se ha utilizado los softwares Design Builder y Energy Plus, en el cual se ha ingresado la información técnica de los equipos de aire acondicionado, parámetros estándar de iluminación, cargas internas por computadoras, cantidad de personas, áreas y usos de los ambientes, superficie vidriada y coeficiente de ganancia solar del vidrio, así como también data climática de la ciudad de Lima, como radiación, temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, dirección y magnitud de vientos. La información ingresada trata de representar el edificio para poder estimar su comportamiento energético.

Se han considerado cuatro estrategias de control:

1. Utilizar un variador de frecuencia en bomba secundaria de chiller
2. Utilizar un variador de frecuencia en el motor del ventilador de la torre de enfriamiento
3. Optimización del porcentaje de carga del chiller
4. Utilizar sensores de CO₂ de sala de reuniones y sala de capacitación.

3.5.1 Utilizar un variador de frecuencia en bomba secundaria de chiller

Se ha modelado las bombas asociadas a la planta de agua helada indicadas en la sección 3.1. En un primer caso se ha considerado todas las bombas constantes y en un segunda caso se ha considerado la bomba del circuito

secundario de velocidad variable regulada en base a la demanda de aire acondicionado en el edificio. Después, se realizó la simulación energética y se comparó los resultados obtenidos

Caso1: Bombas primarias, secundaria y de condensación todas de velocidad constante. En la figura 3.5 se puede identificar que todas las bombas han sido ingresadas en el modelamiento energético con motores de velocidad constante.

[0004] Pump.ConstantSpeed		ID: A6			
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Primary CHW Loop	Primary CHW Loop	Condenser Loop 1	Secondary CHW Lc
Inlet Node Name		Primary CHW Loop	Primary CHW Loop	Condenser Loop 1	CHW Loop Demanc
Outlet Node Name		Primary CHW Loop	Primary CHW Loop	Condenser Loop 1	Secondary CHW Lc
Design Flow Rate	m3/s	0.04542	0.01817	0.05678	0.06359
Design Pump Head	Pa	179339	179339	239118	269008
Design Power Consumption	W	11185	5593	18642	22371
Motor Efficiency		0.91	0.91	0.92	0.93
Fraction of Motor Inefficiencies		0	0	0	0
Pump Control Type		Intermittent	Intermittent	Intermittent	Intermittent

Figura 3.5 Bombas de la planta de agua helada del edificio.

Fuente: Propia

Caso 2: Bombas primarias y de condensado de velocidad constante y bomba secundaria de velocidad variable. En la figura 3.6 se puede identificar que la bomba secundaria ha sido ingresada en el modelamiento energético con un motor de velocidad variable, mientras que las demás bombas han sido ingresadas en el modelamiento energético con motores de velocidad constante.

[0002] Pump:VariableSpeed		
Field	Units	Obj1
Name		Secondary CHW Loop
Inlet Node Name		CHW Loop Demand Si
Outlet Node Name		Secondary CHW Loop
Design Maximum Flow Rate	m3/s	0.06359
Design Pump Head	Pa	269008
Design Power Consumption	W	22371
Motor Efficiency		0.93
Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream		0
Coefficient 1 of the Part Load Performance Curve		0
Coefficient 2 of the Part Load Performance Curve		1
Coefficient 3 of the Part Load Performance Curve		0
Coefficient 4 of the Part Load Performance Curve		0
Design Minimum Flow Rate	m3/s	0
Pump Control Type		Intermittent

Figura 3.6 Bomba secundaria de velocidad variable de la planta de agua helada del edificio.

Fuente: Propia

[0003] Pump:ConstantSpeed				
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Primary CHW Loop	Primary CHW Loop	Condenser Loop
Inlet Node Name		Primary CHW Loop	Primary CHW Loop	Condenser Loop
Outlet Node Name		Primary CHW Loop	Primary CHW Loop	Condenser Loop
Design Flow Rate	m3/s	0.04542	0.01817	0.05678
Design Pump Head	Pa	179339	179339	239118
Design Power Consumption	W	11185	5593	18642
Motor Efficiency		0.91	0.91	0.92
Fraction of Motor Inefficiencies		0	0	0
Pump Control Type		Intermittent	Intermittent	Intermittent

Figura 3.7 Bomba primarias y de condensado de la planta de agua helada del edificio.

Fuente: Propia

Reporte de resultados: En la figura 3.8 se puede apreciar el consumo anual de energía en un edificio que no utiliza un variador de velocidad de la bomba secundaria y un edificio que si lo utiliza. Como se indica en los resultados,

utilizar un variador proporciona un ahorro de 131,075 kWh al año, el cual equivale al 6.78% del consumo total anual.

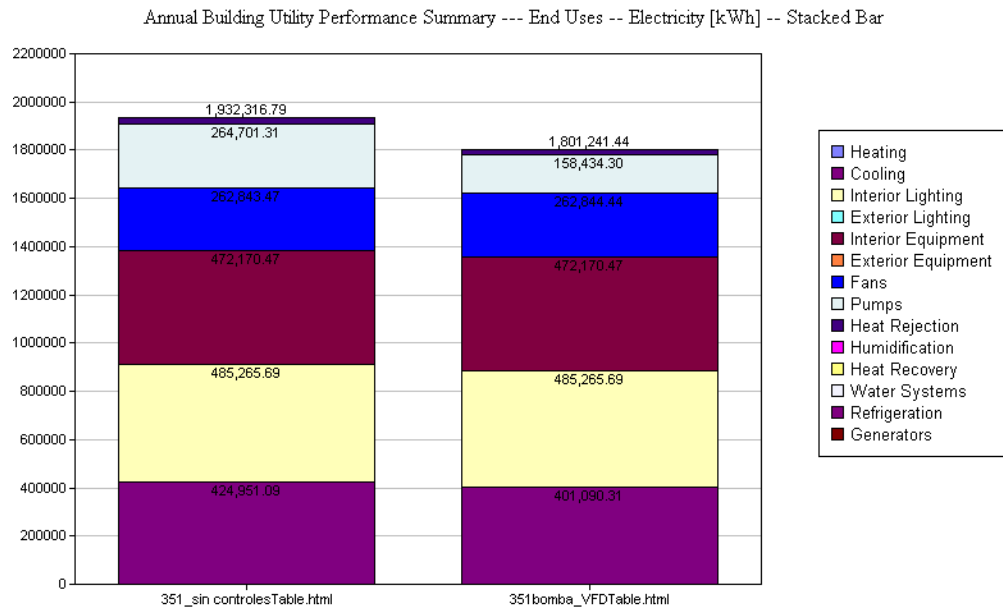


Figura 3.8 Comparación del consumo anual de energía caso bombas (Valores en kWh).

Fuente: Propia

En la tabla 3.10 se muestra el desglose del consumo de energía tanto para el edificio que utiliza todas las bombas de velocidad constantes como del edificio que utiliza la bomba secundaria con variador de frecuencia. El lado izquierdo de la tabla muestra el resultado del edificio que no utiliza un variador y el lado derecho muestra el edificio que si utiliza el variador.

Tabla 3-10 Desglose del consumo anual de energía

	Electricity [kWh]		Electricity [kWh]
Heating	616.73	Heating	616.73
Cooling	401090.30	Cooling	424951.08
Interior Lighting	485265.68	Interior Lighting	485265.68
Exterior Lighting	0.00	Exterior Lighting	0.00
Interior Equipment	472170.48	Interior Equipment	472170.48
Exterior Equipment	0.00	Exterior Equipment	0.00
Fans	262844.45	Fans	262843.48
Pumps	158434.29	Pumps	264701.30
Heat Rejection	20819.51	Heat Rejection	21768.03
Humidification	0.00	Humidification	0.00
Heat Recovery	0.00	Heat Recovery	0.00
Water Systems	0.00	Water Systems	0.00
Refrigeration	0.00	Refrigeration	0.00
Generators	0.00	Generators	0.00
Total End Uses	1801241.44	Total End Uses	1932316.77

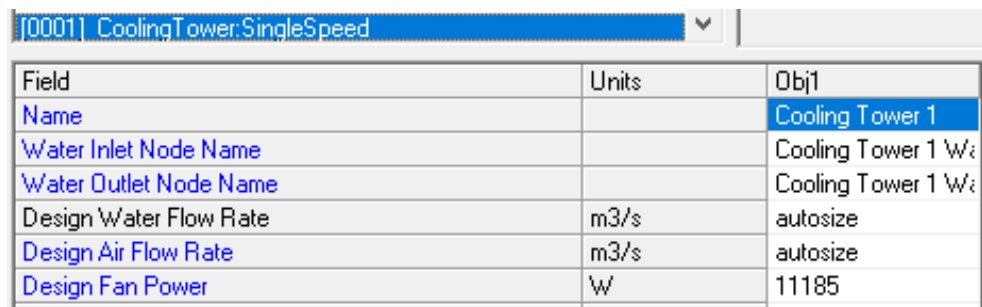
Fuente: Propia

3.5.2 Utilizar un variador de frecuencia en el motor del ventilador de la torre de enfriamiento

Se ha modelado la torre de enfriamiento asociada a la planta de agua helada indicada en la sección 3.1. En un primer caso se ha considerado el motor del ventilador de la torre de velocidad constante y en un segundo caso se ha considerado el motor de velocidad variable comandado por un sensor de temperatura que indica la temperatura de la salida de agua en la torre. En ambos casos se han considerado las mismas torres con iguales potencias y caudales,

la diferencia ha sido el control de la velocidad del motor del ventilador. Después, se realizó la simulación energética y se comparó los resultados obtenidos

Caso1: Torre de enfriamiento de velocidad constante:



Field	Units	Obj1
Name		Cooling Tower 1
Water Inlet Node Name		Cooling Tower 1 Wa
Water Outlet Node Name		Cooling Tower 1 Wa
Design Water Flow Rate	m3/s	autosize
Design Air Flow Rate	m3/s	autosize
Design Fan Power	W	11185

Figura 3.9 Torre de enfriamiento de velocidad constante de la planta de agua helada del edificio.

Fuente: Propia

Caso 2: Torre de enfriamiento de velocidad variable. En el modelamiento del variador de frecuencia se considera mantener la temperatura de salida del agua de condensado constante siendo como mínimo 21.11 °C en base a la temperatura exterior. El ventilador deberá trabajar con mayor o menor potencia con lo cual el variador de frecuencia comandará la velocidad del ventilador de acuerdo al termostato que lee la temperatura del agua de condensación a la salida de la torre.

Field	Units	Obj1
Name		Condenser Loop 1 S
Control Variable		Temperature
Reference Temperature Type		OutdoorAirWetBulb
Offset Temperature Difference	deltaC	0
Maximum Setpoint Temperature	C	29.44
Minimum Setpoint Temperature	C	21.11
Setpoint Node or NodeList Name		Condenser Loop 1 S

Figura 3.10 Configuración de la operación del control de temperatura a la salida del agua de la torre de enfriamiento.

Fuente: Propia

Field	Units	Obj1
Name		Cooling Tower 1
Water Inlet Node Name		Cooling Tower 1 W
Water Outlet Node Name		Cooling Tower 1 W
Design Water Flow Rate	m3/s	autosize
High Fan Speed Air Flow Rate	m3/s	autosize
High Fan Speed Fan Power	W	11185

Figura 3.11 Torre de enfriamiento de velocidad variable de la planta de agua helada del edificio.

Fuente: Propia

Reporte de resultados: En la figura 3.12 se puede apreciar el consumo anual de energía en un edificio que no utiliza un variador de velocidad en el motor de la torre de enfriamiento y un edificio que si lo utiliza. Utilizar un variador proporciona un ahorro de 4,021 kWh al año, el cual equivale al 0.22% del consumo total anual.

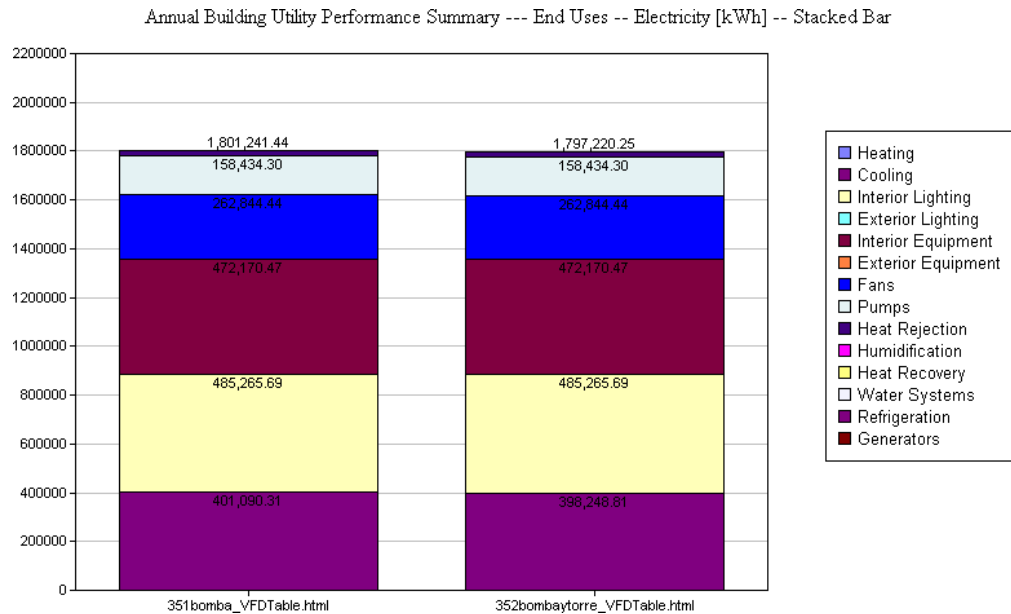


Figura 3.12 Comparación del consumo anual de energía caso torres (Valores en kWh).

Fuente: Propia

En la tabla 3.11 se muestra el desglose del consumo de energía tanto para el edificio que no utiliza un variador de velocidad en el motor de la torre de enfriamiento y un edificio que si lo utiliza. El lado izquierdo de la tabla muestra el resultado del edificio que no utiliza un variador y el lado derecho muestra el edificio que si utiliza el variador.

Tabla 3-11 Desglose del consumo anual de energía

	Electricity [kWh]		Electricity [kWh]
Heating	616.73	Heating	616.73
Cooling	401090.30	Cooling	398248.81
Interior Lighting	485265.68	Interior Lighting	485265.68
Exterior Lighting	0.00	Exterior Lighting	0.00
Interior Equipment	472170.48	Interior Equipment	472170.48
Exterior Equipment	0.00	Exterior Equipment	0.00
Fans	262844.45	Fans	262844.45
Pumps	158434.29	Pumps	158434.29
Heat Rejection	20819.51	Heat Rejection	19639.82
Humidification	0.00	Humidification	0.00
Heat Recovery	0.00	Heat Recovery	0.00
Water Systems	0.00	Water Systems	0.00
Refrigeration	0.00	Refrigeration	0.00
Generators	0.00	Generators	0.00
Total End Uses	1801241.44	Total End Uses	1797220.25

Fuente: Propia

3.5.3 Optimización del porcentaje de carga del chiller.

Como se indicó en la narrativa de funcionamiento del sistema de control de climatización (Sección 3.3.1), el funcionamiento de la planta de agua helada depende de la carga térmica del edificio. Los chiller funcionan a partir de un porcentaje de carga mínima, que es el 20%, es decir, el chiller de 120 Tons funciona desde 24 Tons y el chiller de 300 Tons funciona desde 60 Tons. Por estas limitantes, el chiller de 120 Tons debe funcionar desde la carga mínima del edificio de 24 Tons hasta los 60 Tons, cuando la carga es mayor a 60 pero menor a 120, puede operar cualquiera de los dos chillers, cuando la carga del

edificio es mayor a 120 Tons hasta 300 Tons funcionará el chiller de 300 Tons. En caso el edificio tengo una necesidad mayor a 300 Tons y hasta la carga pico estimada en 420 Tons, funcionara tanto el chiller de 300 Tons como el chiller de 120 Tons.

Como se puede identificar, se puede elegir el funcionamiento del chiller de 120 Tons o el de 300 Tons cuando la carga térmica del edificio está entre 60 y 120 tons. Es en este caso, que se ha realizado un modelamiento energético para encontrar cual es la carga ideal para realizar el cambio de un chiller a otro de modo que se logre el mayor ahorro de energía. Los parámetros ingresados en el modelamiento energético se basan en la tabla de equipos de la sección 3.1.

La potencia instantánea de la planta de agua helada en un tiempo “t” viene dado por la suma de los componentes de la planta: chillers, bombas y torres de enfriamiento. Se han modelado dos plantas: La planta 1 perteneciente al chiller de 120 tons y la planta 2 perteneciente al chiller de 300 tons.

$$\text{Potencia_planta1} = \text{potencia_chiller1} + \text{bomba_primaria1} + \text{bomba_secundaria1} + \text{bomba_condensación1} + \text{torre_de_enfriamiento2} \dots (1)$$

$$\text{Potencia_planta2} = \text{potencia_chiller2} + \text{bomba_primaria2} + \text{bomba_secundaria2} \dots (2)$$

Mediante un modelamiento energético se evalúa la potencia instantánea para cada tiempo y se escoge la opción que es más favorable energéticamente. Para lograr ello, se realizó una simulación paramétrica.

Las condiciones de diseño para el circuito del evaporador de la planta de agua helada se indican en la figura 3.13

Field	Units	Obj2
Plant or Condenser Loop Name		CHW Loop
Loop Type		Cooling
Design Loop Exit Temperature	C	5,55
Loop Design Temperature Difference	deltaC	7,777

Figura 3.13 Condiciones de diseño para el circuito del evaporador del modelamiento energético.

Fuente: Propia

El diseño de temperatura de salida y entrada en el evaporador es 44 °F / 54 °F. Es decir la temperatura de diseño de salida es de 6,66 °C, y la temperatura de retorno de diseño sería de 13,33 °C.

Las condiciones de operación del sistema sería mantener la temperatura de diseño de salida en 44 °F, para cada vez que se prenda el sistema y se cumplan los requerimientos de temperatura exterior, se indica gráficamente en la figura 3.14.

Field	Units	Obj11
Name		Chilled water flow set point temperature: Always 5,55 C
Schedule Type Limits Name		Any Number
Field 1	varies	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDays
Field 3	varies	Until: 24:00
Field 4	varies	5,55

Figura 3.14 Condiciones de operación para el circuito del evaporador del modelamiento energético.

Fuente: Propia

Para condiciones de temperatura exterior menor a 26.67 °C, por cada 1,67° C de disminución la temperatura de suministro de agua incrementará un grado, es decir, para una temperatura exterior de 25 °C la temperatura de suministro de agua será de 6,55°C, cuando la temperatura exterior sea de 20 °C la temperatura de suministro de agua será de 9,55°C, se indica gráficamente en la figura 3.15.

Field	Units	Obj2
Name		CHW Loop Setpoint Manager .
Control Variable		Temperature
Setpoint at Outdoor Low Temperature	C	12,22
Outdoor Low Temperature	C	15,56
Setpoint at Outdoor High Temperature	C	5,55
Outdoor High Temperature	C	26,67
Setpoint Node or NodeList Name		CHW Loop Setpoint Manager .

Figura 3.15 Condiciones de reset para el circuito del evaporador del modelamiento energético.

Fuente: Propia

Las eficiencias de los chillers de cada planta modelada se basan en las especificaciones de la sección 3.1 y se indican continuación:

Tabla 3-12 Eficiencias de Chillers de la planta de agua helada

	Type	Nominal Capacity [W]	Nominal Efficiency [W/W]	IPLV in SI Units [W/W]	IPLV in IP Units [Btu/W-h]
CHILLER 1	Chiller:Electric:EIR	1055060.00	5.60	6.97	23.79
CHILLER 2	Chiller:Electric:EIR	422022.00	3.40	4.90	16.71
BOILER	Boiler:HotWater	324996.03	0.89		
COOLING TOWER 1	CoolingTower:TwoSpeed	1055554.14			

Fuente: Propia

Se han realizado simulaciones paramétricas cambiando el valor del schematic operation cooling load. Este parámetro indica en valor de la carga térmica donde se hace el cambio de una planta a otra. Se puede entender que cada vez

que la carga térmica interna excede este valor se cambiará de la planta 1 a la planta 2, y también cuando la carga térmica es menor a este valor se apagará la planta 2 y entrará en funcionamiento la planta 1. A simple raciocinio, erróneamente se podría decir que es más eficiente el funcionamiento de la planta 1 ya que considera menor valor de potencia en bombas, torres y al sumarla con el chiller da una valor menor. Pero si bien las bombas de la planta 2 son de mayor potencia, con el uso de variadores de frecuencia se puede reducir el consumo y al ser el chiller 2 más eficiente a cargas parciales, se podría dar el caso que se logra un mayor ahorro al entrar el funcionamiento la planta 2 a una determinada carga. El Parámetro modificado se indica como \$App1

Field	Units	Obj1
Name		CHW Loop Scheme 1
Load Range 1 Lower Limit	W	0
Load Range 1 Upper Limit	W	=\$App1
Range 1 Equipment List Name		CHW Loop Scheme 1 Range 1 Equipment List
Load Range 2 Lower Limit	W	=\$App1
Load Range 2 Upper Limit	W	1969437
Range 2 Equipment List Name		CHW Loop Scheme 1 Range 2 Equipment List

Figura 3.16 El parámetro modificado ha sido en Límite máximo de Carga térmica dentro del objeto schematic operation cooling load.

Fuente: Propia

[0004] PlantEquipmentList			
Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CHW Loop Scheme 1 Range 1 Equipment List	CHW Loop Scheme 1 Range 2 Equipment List
Equipment 1 Object Type		Chiller:Electric:EIR	Chiller:Electric:EIR
Equipment 1 Name		Chiller 2	Chiller 1
Equipment 2 Object Type			Chiller:Electric:EIR
Equipment 2 Name			Chiller 2

Figura 3.17 Selección del funcionamiento del chiller en base a rango de carga térmica.

Fuente: Propia

[0001] Parametric:Logic			ID: A1
Field	Units	Obj1	
Name		Main	
Parametric Logic Line 1		PARAMETER \$App1	
Parametric Logic Line 2		\$App1=211011	
Parametric Logic Line 3		IF \$App1<422022	
Parametric Logic Line 4		\$App1=\$App1+42202	
Parametric Logic Line 5		ENDIF	

Figura 3.18 Valores del parámetro modificado en Watts.

Fuente: Propia

Reporte de resultados: En la figura 3.19 se puede apreciar el consumo anual de energía para cada una de las cargas térmicas simuladas en las cuales se cambió la elección del chiller a operar. En base a los resultados, podemos asegurar que lo óptimo energéticamente es hacer el cambio del chiller de 120 toneladas hacia el chiller de 300 toneladas cuando la carga térmica en el edificio sea mayor a 75 tons. Cuando la carga térmica sea menor a 75 Tons se deberá utilizar el chiller de 120 toneladas. El ahorro generado es de 13,299 kWh al año, el cual equivale al 0.74% del consumo total anual.

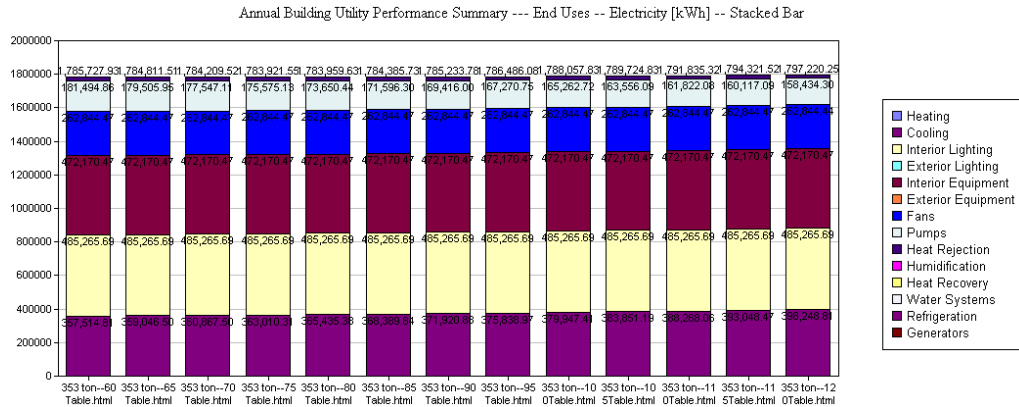


Figura 3.19 Comparación del consumo anual de energía caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).

Fuente: Propia

En la figura 3.20 se puede observar el comportamiento del consumo de los chillers específicamente, es decir, el consumo del chiller 1 más el chiller 2. Como se puede apreciar se ahorra más energía cuando se usa más el chiller enfriado por agua, ya que este equipo es el más eficiente.

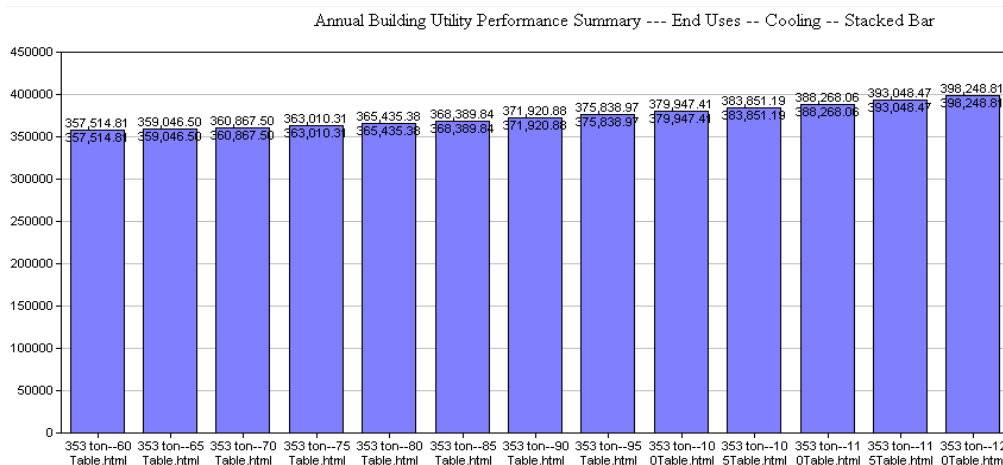


Figura 3.20 Comparación del consumo anual por chillers caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).

Fuente: Propia

En la figura 3.21 se puede observar el comportamiento del consumo de las bombas asociadas al chiller 1 y al chiller 2. Como se puede apreciar se ahorra más energía cuando se usa más el chiller enfriado por aire, ya que este equipo no utiliza bombas de condensación.

En la figura 3.22 se puede observar el comportamiento del consumo de la torre de enfriamiento. Como se puede apreciar se ahorra más energía cuando se usa más el chiller enfriado por aire, ya que este equipo no utiliza torres de enfriamiento.

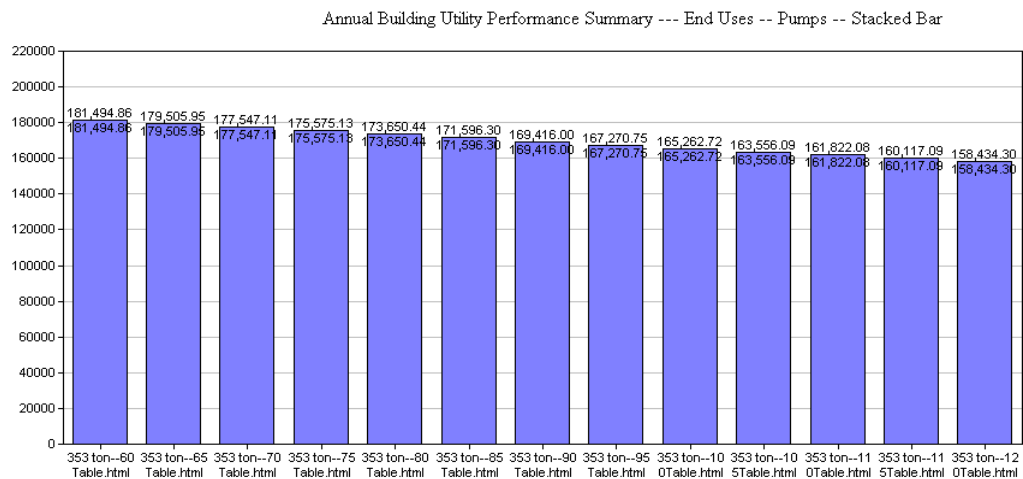


Figura 3.21 Comparación del consumo anual por bombas caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).

Fuente: Propia

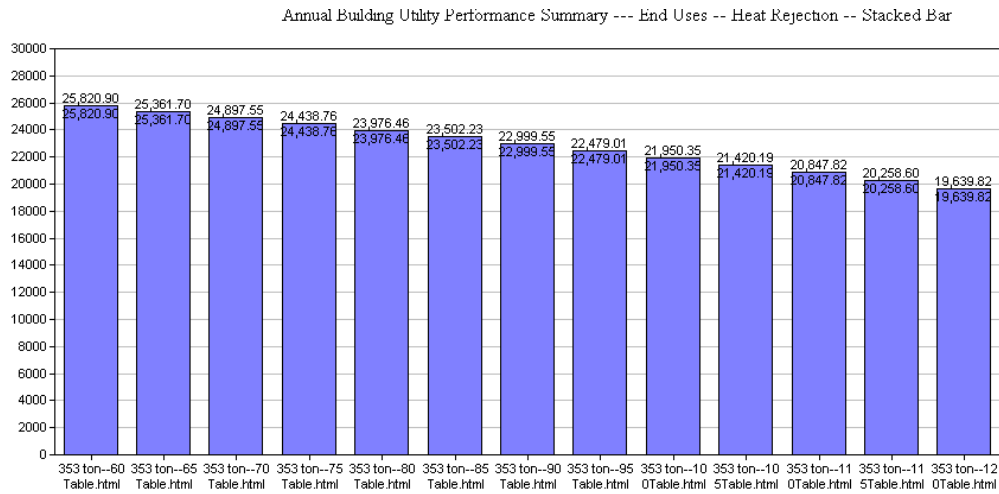


Figura 3.22 Comparación del consumo anual por torre de enfriamiento caso selección de uso del chiller para carga térmica entre 60 ton y 120 ton (Valores en kWh).

Fuente: Propia

3.5.4 Utilizar sensores de CO₂ de sala de reuniones y sala de capacitación.

Se ha modelado el control de la demanda de ventilación en base al nivel de CO₂, las especificaciones del sistema de ventilación se basaron en la sección 3.4. En un primer caso se ha considerado el motor del ventilador de aire fresco para la sala de reuniones y sala de capacitaciones de velocidad constante y en un segundo caso se ha considerado el motor de velocidad variable que regule el flujo de inyección de aire en base al nivel de CO₂ para cada uno de esos ambientes. Después, se realizó la simulación energética y se comparó los resultados obtenidos.

El objeto “Controller:MechanicalVentilation” permite definir el caudal de aire exterior mínimo en función del flujo de aire por unidad de área de piso y el

flujo de aire por persona (ocupante) para las zonas que recibe el lazo de aire que utiliza este controlador.

Esta función permite realizar una evaluación de primer orden de la ventilación controlada por demanda basada en el dióxido de carbono (CO₂) (la ventilación exterior varía según los niveles de ocupación).

El caudal de aire exterior mínimo entregado será el mayor de:

- La velocidad de flujo de aire exterior mínima calculada por los campos Velocidad de flujo de aire exterior mínima y programación de aire exterior mínimo, o
- La velocidad de flujo de aire exterior calculada utilizando el objeto Controller: MechanicalVentilation nombrado en este campo de entrada. La cual utiliza el procedimiento IndoorAirQualityProcedure (IAQP) definido en el estándar ASNI/ASHRAE 62.1-2010 (sección 2.6.4.2) para calcular la cantidad de aire exterior necesaria para mantener los niveles de dióxido de carbono del aire interior en o por debajo del punto de ajuste definido en el objeto “ZoneControl: ContaminantController”.

Field	Obj1	Obj2
Name	Air Loop 3456 AHU Mechanical Ventilation Controller	Air Loop 1112 AHU Mechanical Ventilation Controller
Availability Schedule Name	On 24/7	On 24/7
Demand Controlled Ventilation	Yes	Yes
System Outdoor Air Method	IndoorAirQualityProcedure	IndoorAirQualityProcedure
Zone Maximum Outdoor Air Fraction	1	1
Zone 1 Name	Piso1:SalaDeReuniones	Piso1:SIDCpctcnUssMtlpls
Design Specification Outdoor Air Object Name 1	Piso1:SalaDeReuniones Design Specification Outdoor	Piso1:SIDCpctcnUssMtlpls Design Specification Outdoor
Design Specification Zone Air Distribution Object	Piso1:SalaDeReuniones Design Specification Zone Air	Piso1:SIDCpctcnUssMtlpls Design Specification Zone Air

Figura 3.23 Selección del control de demanda de ventilación para el inyector de la sala de reuniones y sala de capacitación.

Fuente: Propia

El objeto ZoneControl:ContaminantController se utiliza para controlar una zona servida por un AirLoopHVAC mediante el nivel de dióxido de carbono. El punto de ajuste de dióxido de carbono especificado se utiliza para calcular la velocidad de flujo de aire exterior requerida a través del sistema HVAC para alcanzar o no exceder el nivel de CO2 deseado. El caudal de aire exterior del sistema Air-LoopHVAC se realiza mediante el objeto Controller:MechanicalVentilation con el System Outdoor Air Method = IndoorAirQualityProcedure.

[0002] ZoneControl:ContaminantController when the field System Outdoor Air Method = IndoorAirQualityPro ID: A7

Field	Obj1	Obj2
Name	Piso1:SalaDeReuniones Contaminant C	Piso1:SIDCpctcnUssMltpls Contaminant C
Controlled Zone Name	Piso1:SalaDeReuniones	Piso1:SIDCpctcnUssMltpls
Carbon Dioxide Control Availability Schedule Name	On 24/7	On 24/7
Carbon Dioxide Setpoint Schedule Name	Zone CO2 setpoint: Always 900ppm	Zone CO2 setpoint: Always 900ppm
Minimum Carbon Dioxide Concentration Schedule	Min CO2 concentration: Always 600ppm	Min CO2 concentration: Always 600ppm

Figura 3.24 Parámetros de nivel de CO2 límites para cada ambiente.

Fuente: Propia

[0018] People

Field	Units	Obj3	Obj6
Name		People Piso1:SIDCpctcnUssMltpls	People Piso1:SalaDeReuniones
Zone or ZoneList Name		Piso1:SIDCpctcnUssMltpls	Piso1:SalaDeReuniones
Number of People Schedule Name		Office_OpenOff_Occ	Office_OpenOff_Occ
Number of People Calculation Method		People	People
Number of People		1.72021838E+02	1.50086973E+02
People per Zone Floor Area	person/m2		
Zone Floor Area per Person	m2/person		
Fraction Radiant		0.3	0.3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		Activity Schedule 639727	Activity Schedule 639754
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-W	0.0000000382	0.0000000382

Figura 3.25 Ratio de generación de CO2 por cada ambiente.

Fuente: Propia

Reporte de resultados: En la figura 3.26 se puede apreciar el consumo anual de energía en un edificio que no utiliza un variador de velocidad para el inyector de aire fresco y un edificio que si lo utiliza. Como se indica en los resultados, utilizar un variador proporciona un ahorro de 4,393 kWh al año, el cual equivale al 0.25% del consumo total anual.

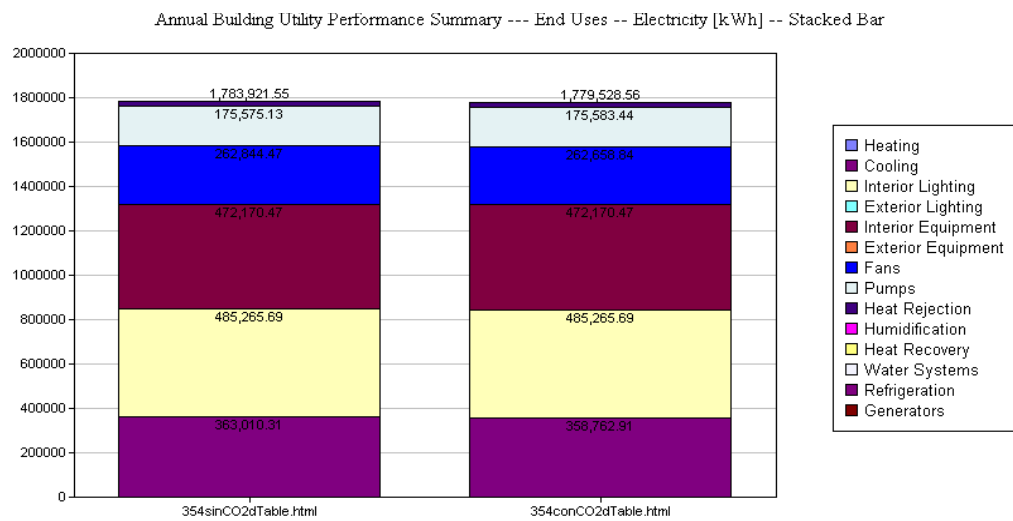


Figura 3.26 Comparación del consumo anual de energía caso ventiladores.

Fuente: Propia

En la tabla 3.13 se muestra el desglose del consumo de energía tanto para el edificio que no utiliza un variador de velocidad en el motor del inyector de aire fresco en base al nivel de CO2 y un edificio que si lo utiliza. El lado izquierdo de la tabla muestra el resultado del edificio que no utiliza un variador y el lado derecho muestra el edificio que si utiliza el variador.

Tabla 3-13 Desglose del consumo anual de energía

	Electricity [kWh]		Electricity [kWh]
Heating	616.73	Heating	615.19
Cooling	363010.30	Cooling	358762.91
Interior Lighting	485265.68	Interior Lighting	485265.68
Exterior Lighting	0.00	Exterior Lighting	0.00
Interior Equipment	472170.48	Interior Equipment	472170.48
Exterior Equipment	0.00	Exterior Equipment	0.00
Fans	262844.47	Fans	262658.85
Pumps	175575.12	Pumps	175583.43
Heat Rejection	24438.76	Heat Rejection	24472.03
Humidification	0.00	Humidification	0.00
Heat Recovery	0.00	Heat Recovery	0.00
Water Systems	0.00	Water Systems	0.00
Refrigeration	0.00	Refrigeration	0.00
Generators	0.00	Generators	0.00
Total End Uses	1783921.54	Total End Uses	1779528.56

Fuente: Propia

3.6 Sistema de iluminación en el edificio

El sistema de iluminación en el edificio considera una comunicación compatible para su uso con sensores y programación. El diseño del sistema de control de iluminación se dividirá de acuerdo al uso requerido en cada ambiente. Los espacios perimetrales serán controlados mediante sensores de luz-día, los ambientes con usos múltiples tendrá sensores de presencia, y los ambientes de alto tránsito y baños contarán con un sensor infrarrojo. No se ha considerado sensores de presencia en el lobby de ingreso por ser un área

iluminada generalmente basada en control horario y tampoco en las salas de reuniones y capacitaciones por ser manejadas con control de escenas.

3.6.1 Recomendaciones de niveles de iluminación

El primer paso en el cálculo del sistema de iluminación es brindar una adecuada iluminación en cada ambiente. El Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) indica los niveles mínimos de luxes que debe considerarse en el diseño de iluminación de cada ambiente dependiendo del tipo de actividad a realizar. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006, p. 392)

La calidad de la iluminación se definen en lux, el valor debe ser medido en los ambiente donde se realizarán las tareas específicas, la cual es a 1 metro del nivel del suelo.

En el siguiente cuadro se indica el nivel recomendado por el RNE.

Tabla 3-14 Tabla de iluminancias para ambiente al interior

AMBIENTES	ILUMINANCIA EN SERVICIO (lux)	CALIDAD
Áreas generales en edificios		
Pasillos, corredores	100	D - E
Baños	100	C - D
Almacenes en tiendas	100	D - E
Escaleras	150	C - D
Oficinas		
Archivos	200	C - D
Salas de conferencia	300	A - B
Oficinas generales y salas de cómputo	500	A - B
Oficinas con trabajo intenso	750	A - B
Salas de diseño	1000	A - B

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006, p. 392)

3.6.2 Cálculo de lúmenes por ambiente

El cálculo de iluminación promedio se basa en “El método de lúmenes”. Este método es recomendado por la asociación de iluminación IES. (Illuminating Engineering Society of North America, 2009, p. 211)

$$Lúmenes_{Totales} = \frac{Lux_{promedio} * Area}{K_u * K_m} \quad (\text{Illuminating Engineering Society of North America, 2009, p. 214})$$

Donde:

$Lúmenes_{Totales}$ = Lúmenes totales requeridos en el ambiente.

$Lux_{promedio}$ = Nivel de iluminancia promedio en el ambiente en lux.

$Area$ = Área del ambiente en m²

K_u = coeficiente de utilización, depende de la distribución del ambiente, mobiliario, reflexión de paredes y techos además del tipo de distribución de la luminaria, se considera un valor de 0.5.

K_m = factor de mantenimiento, que compensa la reducción del nivel de iluminación durante la vida útil de la lámparas. El reemplazo de las luminarias se da cuando brinda un 85% de su valor nominal, por eso se considera este en los cálculos.

El diseño de la iluminación no ha sido evaluado con otros tipos de parámetros, pero no por ello menos importante, tal como el confort y agrado visual, aspecto físico de la luminaria, durabilidad de materiales, tiempo de vida útil e

uniformidad de iluminancia. Para la presente tesis, el enfoque ha sido la eficiencia energética.

Tabla 3-15 Cálculo de lúmenes totales por ambiente.

Planta	Zona	Área [m ²]	Luxes (RNE)	K_m	K_u	Lúmenes totales
Sótano 1 - 4	Estacionamiento	1572	100	0.85	0.50	369882
	Hall de ascensores	100	100	0.85	0.50	23529
Piso 1	Hall de ascensores	100	100	0.85	0.50	23529
	Lobby de ingreso	120	100	0.85	0.50	28235
	Baños	25	100	0.85	0.50	5882
	Sala de reuniones	278	300	0.85	0.50	196235
	Sala de Capacitación	318	300	0.85	0.50	224471
Piso 2- 14	Hall de ascensores	100	100	0.85	0.50	23529
	Baños	38	100	0.85	0.50	8941
	Baños	40	100	0.85	0.50	9412
	Oficina	840	500	0.85	0.50	988235
Azotea	Cuarto eléctrico	76	500	0.85	0.50	89412
	Cuarto de equipos	100	500	0.85	0.50	117647

Fuente: Propia

3.6.3 Selección de luminarias por ambiente

De acuerdo a la siguiente fórmula calculamos la cantidad de luminarias:

$$Lúmenes_{Totales} = Lúmenes_{Inicial} * N_{luminarias}$$

Donde:

$Lúmenes_{Totales}$ = Lúmenes totales brindados por todas las lámparas del ambiente en lúmenes.

$Lúmenes_{Inicial}$ = Lúmenes brindados por cada luminaria.

$N_{luminarias}$ = Número total de luminarias.

Conociendo el número de lámparas que podemos calcular cual es la cantidad de lúmenes mínimos que deben brindar cada una.

Tabla 3-16 Cálculo de lúmenes mínimo por lámpara

Lúmenes totales	Cantidad de lámparas	Lúmenes mínimo por lámparas	Lámpara seleccionada	Lúmenes de lámpara seleccionada
369882	65	5690	LED ECHO 48W	8060
23529	34	692	ECO LEX 20W	2150
23529	34	692	ECO LEX 20W	2150
28235	13	2172	LED OFFICE 1 63W	7600
5882	7	840	PANELLO LUM LED 34W	3380
196235	91	2156	LED CREE 40W	4500
224471	104	2158	LED CREE 40W	4500
23529	34	692	ECO LEX 20W	2150
8941	11	813	PANELLO LUM LED 34W	3380
9412	12	784	PANELLO LUM LED 34W	3380
988235	220	4492	LED CREE 40W	4500
89412	16	5588	LED ECHO 48W	8060
117647	21	5602	LED ECHO 48W	8060

Fuente: Propia

En base a la tabla anterior podemos asegurar que el diseño de iluminación en cada ambiente cumple y excede en nivel mínimo de luxes requeridos por el RNE.

3.6.4 Cálculo de densidad de potencia por ambiente

Adicionalmente, para el diseño de la iluminación se ha considerado no exceder la densidad de potencia indicada en el estándar de energía ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2010, en dicho estándar se indican las densidades de potencia en base a la actividad a realizar en cada ambiente, siendo las oficinas y las salas de reuniones las que cuentan con una mayor densidad de potencia, y los

estacionamiento y corredores de circulación los que cuentan con una menor densidad de potencia (sección 2.6.4.1).

La iluminación en el edificio se caracteriza por usar tecnología LED, la cual es de alta eficiencia, con aparatos de una eficacia entre 100-110 lúmenes/watt. Por lo que además de cumplir con los niveles de lúmenes nos aseguramos no exceder el nivel de potencia recomendada en el estándar ASHRAE.

En las tablas 3-17 al 3-20 se indica la potencia total en Watts modelada por cada uno de los ambientes del proyecto, la potencia total se calcula multiplicando el número de luminarias por la cantidad de luminarias, la densidad de potencia de iluminación del diseño se expresa en la columna LPD en Watts/m², el cual es el resultado de la potencia total de un ambiente y dividirlo entre el área de dicho ambiente. La columna final LPD ASHRAE indica la densidad de potencia que considera un diseño estándar, y sirve como punto de referencia para evaluar que tan bueno es el diseño propuesto.

Tabla 3-17 Luminarias en sótanos del 1 al 4

Zona	Área [m ²]	Nro de luminarias		Pot. por luminaria [W]		Potencia Total [W]	LPD [W/m ²]	LPD ASHRAE [W/m ²]
		Led Echo 48W	Eco lex 20W					
Estaciona_miento	1572	65		48		3120	1.98	2
Hall de ascensores	100		34		20	680	6.80	6.88

Fuente: Propia

Tabla 3-18 Luminarias en el Piso 1

Zona	Área [m ²]	Nro de luminarias				Pot. por luminaria [W]			Pot. Total [W]	LPD [W/m ²]	LPD ASHRAE [W/m ²]
		Eco Lex 20W	Pan- llo Lum Led 34W	Led Cree 40W	Led Office 1 63W						
Hall de ascensores	100	34				20			680	6.80	6.88
Lobby de ingreso	120				13			63	819	6.83	6.88
Baños	25		7			34			238	9.52	10.5
Sala de reuniones	278			91			40		3640	13.1	13.2
Sala de Capacitación	318			104			40		4160	13.1	13.2

Fuente: Propia

Tabla 3-19 Luminarias en el Piso típico: del 2 al 14

Zona	Área [m ²]	Nro de luminarias				Potencia Total [W]			LPD [W/m ²]	LPD ASHRAE [W/m ²]
		Eco Led 20W	Pan- llo Lum Led 34W	Led Cree 40W	Pot. por luminaria [W]					
Hall de ascensores	100	34			20			680	6.80	6.88
Baños	38		11			34		374	9.84	10.5
Baños	40		12			34		408	10.20	10.5
Oficina	840			220		40		8800	10.48	10.5

Fuente: Propia

Tabla 3-20 Luminarias en la Azotea:

Zona	Área [m ²]	Nro de luminarias		Pot. por luminaria [W]	Potencia Total [W]	LPD [W/m ²]	LPD ASHRAE [W/m ²]
		Led Echo 48W					
Cuarto eléctrico	76	16		48	768	10.1	10.2
Cuarto de equipos	100	21		48	1008	10.1	10.2

Fuente: Propia

3.6.5 Luminarias seleccionadas por ambiente

En el área de estacionamientos, cuarto eléctrico y cuarto de equipos mecánicos se ha indicado luminarias herméticas LED Echo de 48 Watts. En hall de ascensores se ha indicado luminarias Eco Lex de 20 Watts. En el lobby de ingreso del primer piso se ha indicado una luminaria LED office 1 de 63 Watts. En oficinas, salas de reuniones y capacitaciones se ha indicado luminarias LED Cree de 40 Watts. En oficinas se ha indicado una luminaria Panello Lum Led de 34 Watts.

El diseño de la iluminación cuenta con seis tipos de luminarias:

1. Luminaria hermética LED de 40 W,
2. LED Echo de 48 Watts,
3. Eco Lex de 20 Watts,
4. Panello Lum LED de 34 Watts,
5. LED Cree de 40 Watts,

6. LED office 1 de 63 Watts.

3.7 Diseño del sistema de control de iluminación con sensores de luz día

El sistema de iluminación en el edificio considera una comunicación compatible para su uso con sensores y programación. El diseño del sistema de control de iluminación se dividirá de acuerdo al uso requerido en cada ambiente. Los espacios perimetrales serán controlados mediante sensores de luz-día, los ambientes con usos múltiples tendrá sensores de presencia, y los ambientes de alto tránsito y baños contarán con un sensor infrarrojo. No se ha considerado sensores de presencia en el lobby de ingreso por ser un área iluminada generalmente basada en control horario y tampoco en las salas de reuniones y capacitaciones por ser manejadas con control de escenas.

3.7.1 Narrativa de requerimiento

El sensor de luz natural detecta la cantidad de luz solar que ingresa al ambiente, en el presente caso las oficinas perimetrales. Este sensor se comunica con un procesador a través de una interface de radiofrecuencia; el procesador indica a cada fila de luminarias de la oficina el nivel de iluminación al que deberán atenuarse dependiendo de la posición respecto al ingreso de luz natural y de la intensidad de la misma.

3.7.2 Estrategia de ubicación

Los sensores de luz-día se ubican dentro de los 4.5 metros más cercanos a las ventanas que dan la exterior. Según el estándar ANSI/ASHRAE/IES 90.1 - 2010 (sección 2.6.4.1), hasta ese límite se puede aprovechar la iluminación

natural, ya que la altura de ventanas es de $H = 3$ metros y la profundidad se calcular como $1.5 * H = 4.5$ metros.

Los sensores se ubican en todo el perímetro de las oficinas desde el piso 2 hasta el piso 14.

En la siguiente imagen se indica en color rosado la zona de influencia que tendrá los sensores de luz-día

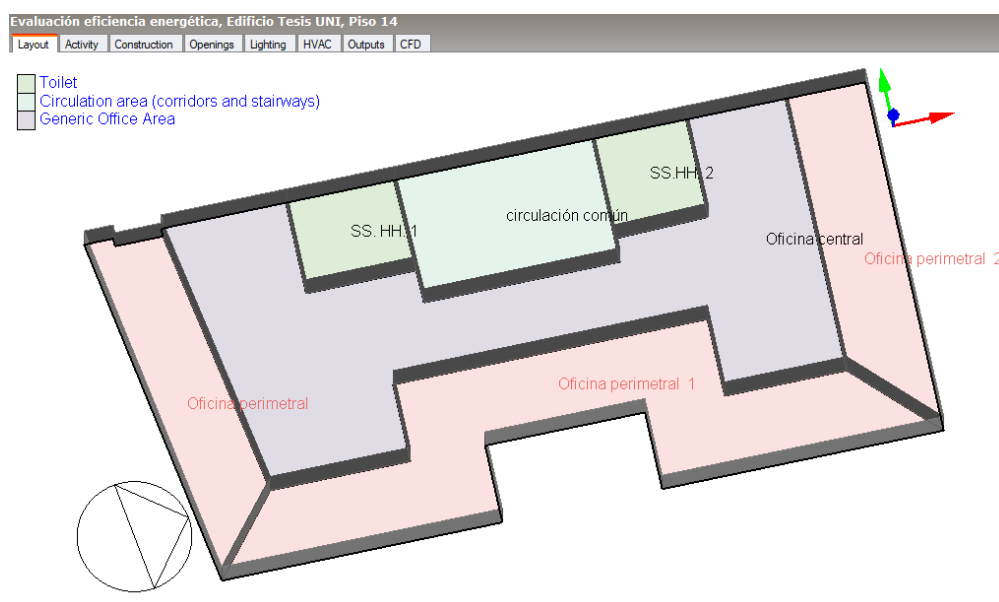


Figura 3.27 Zona de influencia de sensores de luz-día -en rosado-

Fuente: Propia

3.7.3 Diagrama de Control de luz natural

La variable controlada es el nivel de iluminación en el ambiente en luxes. La variable manipulada es la corriente suministrada a las luminarias perimetrales.

Las perturbaciones son las condiciones climáticas como la variación de luz natural que ingresa a través de las ventanas.

El lazo de control se indica en la siguiente imagen:

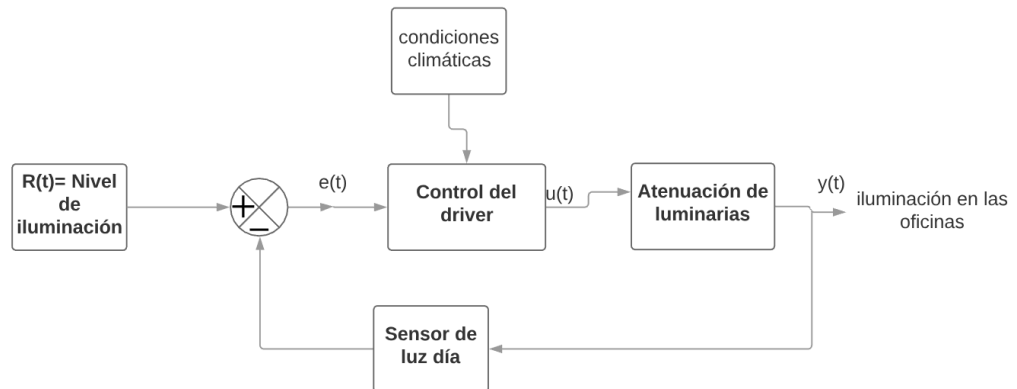


Figura 3.28 Sistema de control en lazo cerrado para el control de luz natural.

Fuente: Propia

$R(t)$ es el nivel deseado de iluminación en los puestos de trabajo.

$e(t)$ es la diferencia entre el valor medido y el valor deseado de iluminación, cuando la diferencia es negativa no se realiza ninguna acción de control, en cambio, cuando la diferencia es positiva se envía una señal $u(t)$ por el control del driver para atenuar las luminarias.

La atenuación de luminarias óptima generará el nivel adecuado total de iluminación $y(t)$. La atenuación se basa en mantener los 600 luxes, cuando la iluminación natural sobrepasa este valor no es necesario prender las luminarias, cuando la iluminación natural disminuye el sensor indicará una falta de iluminación por lo que la señal de control indicará cuando falta iluminar para

aproximarse al set Point, el cálculo se basa en la diferencia, la capacidad de iluminación de las laminarias y el porcentaje de funcionamiento requerido.

3.8 Diseño del sistema de control de iluminación con sensores de presencia

3.8.1 Narrativa de requerimiento

Las áreas de estacionamientos consideran sensores que detecta la circulación vehicular o peatonal, se considera sensores de movimiento y por motivos de seguridad se prenden las luminarias a un 100% cuando se detecta presencia y atenúan a un 30% después de 30 minutos que no se detecte presencia.

Las áreas de circulación en hall de ascensores consideran sensores de movimiento y cuando se detecta movimiento se prenden las luminarias, el apagado se da a los 30 minutos de no detección de presencia.

Los baños consideran sensores infrarrojos, los cuales activan las luminarias cuando se detecta presencia y se apagan las luminarias después de 30 minutos de no detección de presencia.

3.8.2 Estrategia de ubicación

Se ubica un sensor en cada baño y en cada hall de ascensores, es decir, un sensor por ambiente. En sótanos se divide los sensores basados en circuitos eléctricos y en dirección de tránsito para los vehículos, se utiliza un sensor por cada cinco luminarias.

3.8.3 Cuadro de señales de control

En la siguiente tabla se indican las señales de control para cada tipo de ambiente

Tabla 3-21 Señales de control de iluminación

Iluminación en zonas perimetrales de oficinas	Medición de luxes
	Estado de interruptor general en tableros generales
	Driver de control de iluminación
	Integración de analizadores de red, los cuales deben brindar al menos los siguientes parámetros: V, I, Kw/h, fdp, consumos acumulados y lecturas en tiempo real.
	PLC para iluminación
	Contactador
Iluminación en áreas de sótanos, baños y hall de ascensores.	
	Control On/Off horario.
	Detector de presencia On/Off de circuitos de iluminación en sótanos.
	Detector de presencia On/Off de circuitos de iluminación en baños.
	Detector de presencia On/Off de circuitos de iluminación en hall de ascensores.
	Relé
	PLC para iluminación
	Contactador
	Driver de control de iluminación

Fuente: Propia

3.8.4 Diagrama de Control por sensor de presencia

La variable manipulada es el control del driver, que es un controlador que activa o desactiva la alimentación eléctrica del circuito de iluminación, para prender o apagar las luminarias con un temporizado ajustable a 30 minutos. Como no es un sistema con retroalimentación el valor de salida no va a afectar a la señal de control. La precisión del sistema dependerá de la calibración de los sensores y controles para un correcto funcionamiento.

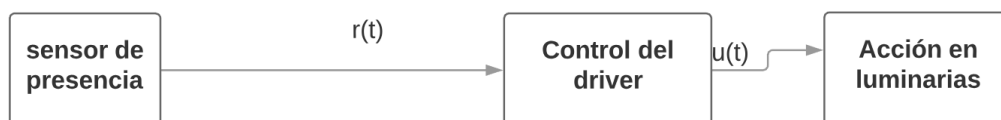


Figura 3.29 Sistema de control en lazo abierto para el control de luz con sensores.

Fuente: Propia

3.9 Cálculo de ahorro energético en iluminación mediante software

Para estimar el ahorro de energía se ha utilizado los softwares Design Builder y Energy Plus.

Se han considerado dos estrategias de control para optimizar el consumo de la iluminación:

1. Utilizar sensores de luz-día en ambientes de oficinas perimetrales.
2. Utilizar sensores de presencia en estacionamientos, baños y hall de ascensores.

3.9.1 Resultados de ahorro por sensores de luz-día

Se ha modelado tres diferentes estrategias de control de luz-día:

- Control On/off:

Se ha modelado la estrategia de control que apaga las luminarias perimetrales cuando se tiene una iluminación natural de 600 luxes en los ambientes de trabajo.

[0006] Daylighting Controls		Daylighting Reference Point Coordinate System file Glare from daylighting is also calculated.					
Field	Uni	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Zone Name		PisoTipicc	PisoTipico	PisoTipico	Piso14:	Piso14:	Piso14
Total Daylighting Reference Points		1	1	1	1	1	1
X-Coordinate of First Reference Point	m	49.737	32.269	11.296	50.237	32.269	10.796
Y-Coordinate of First Reference Point	m	-7.341	-9.691	-7.591	-7.341	-10.191	-7.591
Z-Coordinate of First Reference Point	m	3.8	3.8	3.8	6.8	6.8	6.8
X-Coordinate of Second Reference Point	m						
Y-Coordinate of Second Reference Point	m						
Z-Coordinate of Second Reference Point	m						
Fraction of Zone Controlled by First Reference Point		1	1	1	1	1	1
Fraction of Zone Controlled by Second Reference Point		0	0	0	0	0	0
Illuminance Setpoint at First Reference Point	lux	600	600	600	600	600	600
Illuminance Setpoint at Second Reference Point	lux						
Lighting Control Type		2	2	2	2	2	2
Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clock	deg	0	0	0	0	0	0
Maximum Allowable Discomfort Glare Index		22	22	22	22	22	22
Minimum Input Power Fraction for Continuous Dimming I							
Minimum Light Output Fraction for Continuous Dimming							
Number of Stepped Control Steps		1	1	1	1	1	1

Figura 3.30 Control on/off de iluminación con sensor luz día

Fuente: Propia

- Control por pasos:

Se ha modelado la estrategia de control de acuerdo a la siguiente secuencia para las luminarias perimetrales: Cuando la iluminación natural es de 600 luxes o mayor en los ambientes de trabajo se apagan las luminarias, cuando se tiene un nivel entre 400 y 600 luxes se prende 1/3 de las luminarias controladas, cuando se tiene un nivel entre 200 y 400 luxes se prende 2/3 de las luminarias controladas, cuando se tiene un nivel entre 0 y 200 luxes se prende todas las luminarias controladas.

[0006] Daylighting:Controls		Daylighting Reference Point CoordinateSystem file Glare from daylighting is also calculated.					
Field	Uni	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Zone Name		PisoTipicc	PisoTipico	PisoTipico	Piso14:	Piso14:	Piso14
Total Daylighting Reference Points		1	1	1	1	1	1
X-Coordinate of First Reference Point	m	49.737	32.269	11.296	50.237	32.269	10.796
Y-Coordinate of First Reference Point	m	-7.341	-9.631	-7.531	-7.341	-10.191	-7.531
Z-Coordinate of First Reference Point	m	3.8	3.8	3.8	6.8	6.8	6.8
X-Coordinate of Second Reference Point	m						
Y-Coordinate of Second Reference Point	m						
Z-Coordinate of Second Reference Point	m						
Fraction of Zone Controlled by First Reference Point		1	1	1	1	1	1
Fraction of Zone Controlled by Second Reference Point		0	0	0	0	0	0
Illuminance Setpoint at First Reference Point	lux	600	600	600	600	600	600
Illuminance Setpoint at Second Reference Point	lux						
Lighting Control Type		2	2	2	2	2	2
Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clock	deg	0	0	0	0	0	0
Maximum Allowable Discomfort Glare Index		22	22	22	22	22	22
Minimum Input Power Fraction for Continuous Dimming							
Minimum Light Output Fraction for Continuous Dimming							
Number of Stepped Control Steps		3	3	3	3	3	3

Figura 3.31 Control de tres pasos de iluminación con sensor luz día

Fuente: Propia

- Control por atenuación

Se ha modelado la estrategia de control considerando atenuación de luminarias perimetrales. En este caso las luminarias se atenúan proporcionalmente a la necesidad de iluminación proporcionada por el sensor de luz día, mediante una recta donde a 0 luxes se activa el 100% de la potencia y a 600 luxes se activa el 0% de potencia.

[0006] Daylighting Controls		Field Description: 1=continuous,2=stepped,3=continuous/off					
Field	Uni	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Zone Name		PisoTipicc	PisoTipico	PisoTipico	Piso14:	Piso14:	Piso14
Total Daylighting Reference Points		1	1	1	1	1	1
X-Coordinate of First Reference Point	m	49.737	32.269	11.296	50.237	32.269	10.796
Y-Coordinate of First Reference Point	m	-7.341	-9.691	-7.591	-7.341	-10.191	-7.591
Z-Coordinate of First Reference Point	m	3.8	3.8	3.8	6.8	6.8	6.8
X-Coordinate of Second Reference Point	m						
Y-Coordinate of Second Reference Point	m						
Z-Coordinate of Second Reference Point	m						
Fraction of Zone Controlled by First Reference Point		1	1	1	1	1	1
Fraction of Zone Controlled by Second Reference Point		0	0	0	0	0	0
Illuminance Setpoint at First Reference Point	lux	600	600	600	600	600	600
Illuminance Setpoint at Second Reference Point	lux						
Lighting Control Type		3	3	3	3	3	3
Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clock	deg	0	0	0	0	0	0
Maximum Allowable Discomfort Glare Index		22	22	22	22	22	22
Minimum Input Power Fraction for Continuous Dimming I							
Minimum Light Output Fraction for Continuous Dimming							
Number of Stepped Control Steps							

Figura 3.32 Control de atenuación de iluminación con sensor luz día

Fuente: Propia

Reporte de resultados: En la figura 3.33 se puede apreciar el consumo por iluminación en un edificio que utiliza diversas configuraciones para los sensores de luz día: on_off, 3 pasos y atenuación. Como se puede observar, el mayor ahorro se logra con el control de atenuación, el cual será la estrategia de control a elegir, muestra un ahorro adicional de 7% comparado con la selección de control on/off.

En la tabla 3.22 se muestra el desglose del consumo de energía para las diversas configuraciones para los sensores de luz día: on_off, 3 pasos y atenuación, con los siguientes consumos de energía respectivamente: 1,635,707 kWh, 1,616,240 kWh y 1,608,000 kWh.

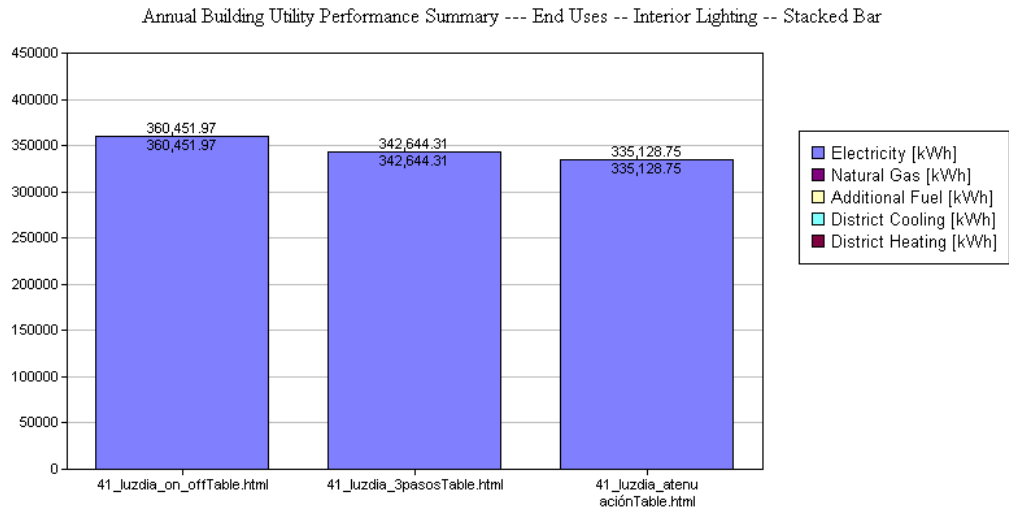


Figura 3.33 Comparación del ahorro de iluminación para cada una de las estrategias de sensores de luz día.

Fuente: Propia

Tabla 3-22 Desglose del consumo anual de energía

	Electricity [kWh]		Electricity [kWh]		Electricity [kWh]
Heating	638.22	Heating	641.19	Heating	642.02
Cooling	347421.15	Cooling	346262.59	Cooling	345810.32
Interior Lighting	360451.98	Interior Lighting	342644.31	Interior Lighting	335128.75
Exterior Lighting	0.00	Exterior Lighting	0.00	Exterior Lighting	0.00
Interior Equipment	472170.48	Interior Equipment	472170.48	Interior Equipment	472170.48
Exterior Equipment	0.00	Exterior Equipment	0.00	Exterior Equipment	0.00
Fans	258425.21	Fans	258350.28	Fans	258310.44
Pumps	172749.28	Pumps	172401.61	Pumps	172264.12
Heat Rejection	23851.58	Heat Rejection	23769.67	Heat Rejection	23734.75
Humidification	0.00	Humidification	0.00	Humidification	0.00
Heat Recovery	0.00	Heat Recovery	0.00	Heat Recovery	0.00
Water Systems	0.00	Water Systems	0.00	Water Systems	0.00
Refrigeration	0.00	Refrigeration	0.00	Refrigeration	0.00
Generators	0.00	Generators	0.00	Generators	0.00
Total End Uses	1635707.91	Total End Uses	1616240.14	Total End Uses	1608060.88

Fuente: Propia

En la figura 3.34 se puede observar que no sólo se logra un ahorro en la iluminación, ya que al reducir el uso de las luminarias se reduce la ganancia térmica interior del edificio e indirectamente se reduce el consumo del aire acondicionado con sus equipos asociados: chillers, bombas, torres de enfriamiento y ventiladores. Como se indica en los resultados, utilizar sensores de luz día que atenúa la potencias de las luminarias proporciona un ahorro de 126,783 kWh al año, el cual equivale al 7.31% del consumo total anual.

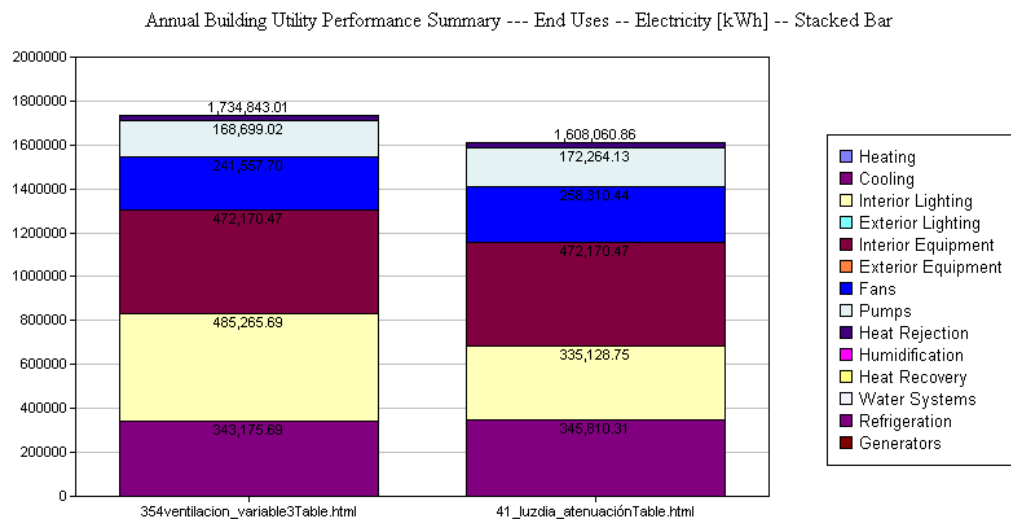


Figura 3.34 Comparación del consumo anual de energía caso sensores de luz día.

Fuente: Propia

3.9.2 Resultados de ahorro por sensores de movimiento

- Sensores de presencia en estacionamientos, baños y hall de ascensores

Se ha modelado la estrategia de utilizar sensores de presencia en cada uno de los estacionamientos, baños y corredores de acuerdo a lo indicado en el estándar ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2010. Si bien se puede utilizar diversos

rangos de reducción de potencia (William O'Brien, 2017, pp. 1235,1236) se ha utilizado la recomendación de ASHRAE ya que se ha modelado de manera independiente el ahorro por sensores de luz día y además ninguno de los ambientes modelados con sensores de presencia para iluminación tiene acceso directo a iluminación natural, por ende, siempre se tendría que utilizar iluminación artificial.

Tabla 3-23 Porcentaje de reducción de potencia de iluminación por sensores de ocupación

TABLE G3.2 Power Adjustment Percentages for Automatic Lighting Controls

Automatic Control Device(s)	Non-24-h and $\leq 460 \text{ m}^2$	All Other
1. Programmable timing control	10%	0%
2. Occupancy sensor	15%	10%
3. Occupancy sensor and programmable timing control	15%	10%

Note: These credits are only allowed where the control is not required by Section 9.4. The 460 m^2 condition pertains to the total *conditioned floor area* of the building.

Fuente: (ANSI/ASHRAE/IES, 2010)

Reporte de resultados: En la figura 3.35 se puede apreciar el consumo anual de energía utilizando sensores de ocupación en baños, estacionamiento y hall de ascensores, y en otro edificio que no utiliza estos sensores. Como se indica en los resultados, utilizar sensores de ocupación en baños, estacionamiento y hall de ascensores proporciona un ahorro de 10,350 kWh al año, el cual equivale al 0.64% del consumo total anual.

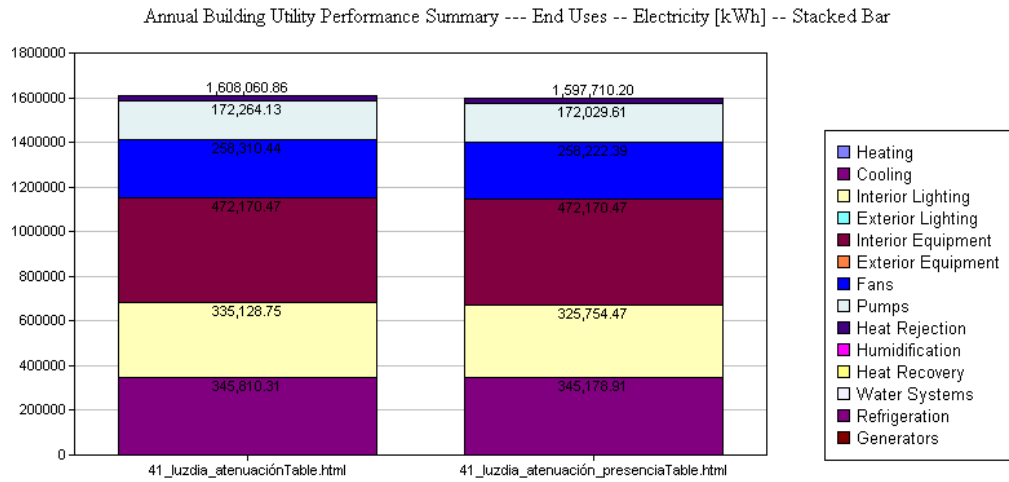


Figura 3.35 Comparación del consumo anual de energía caso sensor de presencia.

Fuente: Propia

En la tabla 3.24 se muestra el desglose del consumo de energía tanto para el edificio que utiliza los sensores de ocupación en baños, estacionamiento y hall de ascensores, y el otro edificio que no utiliza estos sensores. El lado izquierdo de la tabla muestra el resultado del edificio que no utiliza estos sensores y el lado derecho muestra el edificio que si utiliza. Como se puede apreciar, se ha reducido el consumo en la iluminación, pero también indirectamente se ha reducido en consumo en el sistema de aire acondicionado, lo cual era esperado ya que al existir menos carga interna y menos calor de disipación debido a luminarias prendidas, se reduce el uso de los chillers y equipos asociados.

Tabla 3-24 Desglose del consumo anual de energía

	Electricity [kWh]		Electricity [kWh]
Heating	642.02	Heating	646.13
Cooling	345810.32	Cooling	345178.90
Interior Lighting	335128.75	Interior Lighting	325754.48
Exterior Lighting	0.00	Exterior Lighting	0.00
Interior Equipment	472170.48	Interior Equipment	472170.48
Exterior Equipment	0.00	Exterior Equipment	0.00
Fans	258310.44	Fans	258222.39
Pumps	172264.12	Pumps	172029.61
Heat Rejection	23734.75	Heat Rejection	23708.23
Humidification	0.00	Humidification	0.00
Heat Recovery	0.00	Heat Recovery	0.00
Water Systems	0.00	Water Systems	0.00
Refrigeration	0.00	Refrigeration	0.00
Generators	0.00	Generators	0.00
Total End Uses	1608060.88	Total End Uses	1597710.22

Fuente: Propia

3.10 Integración de los sistemas de aire acondicionado, de ventilación y de iluminación

La intención es asegurar que el diseño de control sea una integración de los sistemas del edificio de modo que el consumo de energía sea el más óptimo alcanzable de acuerdo con las estrategias escogidas en las secciones 3.5 y 3.9.

La integración se conformará por controladores conectados a una red centralizada, los cuales reciben señales analógicas y digitales indicadas en la sección 3.10.2, emitidas por los dispositivos de control indicados en las

secciones 2.8 y 2.9. Los controladores integran diversas funciones para el manejo de los actuadores, y además se considera un controlador principal para supervisar, controlar, administrar y acceder remotamente a diversos parámetros del sistema de control de la automatización. Independiente del acceso remoto, el sistema debe poder funcionar de manera autónoma sin ninguna supervisión.

El diseño de los controladores considera un mismo tipo de comunicación con el control principal y con cada uno de los componentes como sensores, y el controlador principal se debe conectar con los actuadores.

3.10.1 Lógica de control

La lógica de control se ha descrito en las secciones 3.3.4, 3.3.5, 3.4.3, 3.7.3 y 3.8.4.

El control principal, aparte de optimizar el consumo de energía mediante las estrategias de control, debe asegurar el funcionamiento normal de todo el sistema, es decir debe cumplir con las siguientes funciones:

- Controlar las unidades de Fan Coil y medición de temperatura en el ambiente asociado.
- Controlar encendido y apagado de los ventiladores de inyección de aire.
- Medición del caudal de aire de los ventiladores en salas de reuniones y salas de capacitaciones.
- Monitoreo de la temperatura de salida y retorno del agua utilizada en los equipos chiller.

- Recepción de parámetros de funcionamiento del variador de frecuencia utilizados en ventiladores y bombas.
- Monitoreo del nivel de dióxido de carbono en salas de reuniones y salas de capacitaciones.
- Monitoreo del funcionamiento de los equipos de extracción.
- Control del arranque de los extractores de monóxido.
- Consumo de corriente de la unidad enfriadora Chiller.
- Control remoto del encendido del Chiller.
- Control y Monitoreo de las bombas de agua fría (primarias y secundarias).
- Recepción de parámetros de funcionamiento del controlador del Chiller.
- Monitoreo de la torre de enfriamiento.
- Modificación manual o por programación de los set-point de cada uno de los equipos que forman este sistema.
- Activación o detención de equipos manual o por programación de cada uno de los equipos
- Realizar programaciones de ahorros de consumos de estos equipos en base a horas, temperatura exterior, etc.

3.10.2 Listado de entradas y salidas de las señales de control

En la tabla 3-25 se indican el tipo y cantidad de señales analógicas y digitales para el sistema de control de climatización.

Tabla 3-25 Lista de señales de control de la planta de agua helada

Equipo a controlar	Número de Bloques	Parámetro	Cantidad por bloque	AI	DI	DO	AO	Comunicación
Bombas Secundarias	1	Equipo energizado	1		X			
		Control On/Off	1			X		
		Presión diferencial en Fan coil más alejado	1	X				
		Control de Variador de frecuencia	1				X	
Bombas Primarias	2	Equipo energizado	1		X			
		Control On/Off	1			X		
Bombas de Condensación	1	Equipo energizado	1		X			
		Control On/Off	1			X		
Analizadores de red en tableros	3	V, I, fdp, , kW y kWh.	1					X
Chiller	2	Control On/Off	1			X		
		Estatus de chiller	1		X			
		Medición de BTU en salida de chiller	1	X				
		Temperatura de suministro de agua helada	1	X				
		Temperatura de retorno de agua helada	1	X				
		Temperatura de suministro	1	X				

		de agua de condensación					
		Temperatura de retorno de agua de condensación	1	X			
		Presión diferencial entre suministro y retorno de agua helada	1	X			
		Falla general	1		X		
Torres de Enfriamiento	1	Detección de nivel alto de agua	1		X		
		Estatus de torre	1		X		
		Control de variador de válvula	1				X
		Temperatura del exterior de la torre	1	X			
		Temperatura del agua en la torre	1	X			

Fuente: Propia

En la tabla 3-26 se indican el tipo y cantidad de señales analógicas y digitales para el sistema de control de ventilación.

En la tabla 3-27 se indican el tipo y cantidad de señales analógicas y digitales para el sistema de control de la iluminación.

Tabla 3-26 Lista de señales de control de demanda de ventilación

Equipo a controlar	Número de Bloques	Parámetro	Cantidad por bloque	AI	DI	DO	AO	Comunicación
Sensor de CO2 en ambientes de afluencia pública	2	Nivel de CO2 en ambiente	1	X				
Control de Ventiladores en sala de capacitaciones y Sala de reuniones	2	Monitoreo de ventilador energizado: on/off	1		X			
		Control de Variador de frecuencia	1				X	
		Medición del caudal de aire	1	X				

Fuente: Propia

Tabla 3-27 Lista de señales de control de iluminación

Equipo a controlar	Número de Bloque	Parámetro	Cantidad por bloque	AI	DI	DO	AO	Comunicación
Iluminación en zonas perimetrales de oficinas	1	Medición de luxes	39	X				
		Estado de interruptor general en tableros generales	1		X			
		Driver de control de iluminación	117				X	

		Integración de analizadores de red, los cuales deben brindar al menos los siguientes parámetros: V, I, Kw/h, fdp, consumos acumulados y lecturas en tiempo real.	1					X
		PLC para iluminación	1					X
		Contactor						
Tableros de iluminación	1	Driver de control de iluminación	82					
		Control On/Off horario.				X		
		Detector de presencia On/Off de circuitos de iluminación en sótanos.	40		X			
		Detector de presencia On/Off de circuitos de iluminación en baños.	28		X			
		Detector de presencia On/Off de circuitos de iluminación en hall de ascensores.	14		X			
		Relé	6			X		
		PLC para iluminación	1					X
		Contactor				X		

Fuente: Propia

En la siguiente tabla 3-28 se indican el tipo y cantidad de señales analógicas y digitales para el funcionamiento del aire acondicionado de cada uno de los ambientes interiores mediante termostatos y control de válvulas en los Fan Coils.

Tabla 3-28 Lista de señales de control de confort interior

Equipo a controlar	Número de Bloque	Parámetro	Cantidad por bloque	AI	DI	DO	AO	Comunicación
Termostato en Áreas Comunes y oficinas.	55	Temperatura	1	X				
		Control on/off de válvula con actuador eléctrica de 2 vías para un diferencial máximo de 5 PSI.	1			X		
		Válvulas de un cuarto de vuelta a la entrada del agua helada.	1				X	
		Válvulas de un cuarto de vuelta a la salida de agua helada.	1				X	
		Control de velocidad de tres posiciones (03 señales).	3			X		

Fuente: Propia

En base a las tablas 3-25 al 3-28 con señales de automatización necesitamos un módulo para 11 y 74 entradas digitales y analógicas y para 226 y 114 salidas digitales y analógicas, respectivamente.

Para disminuir la cantidad de entradas y salidas, se escoge para el sistema de iluminación, sensores que trabajen inalámbricamente y actúen directamente hacia un driver que controle la iluminación, esto brinda el beneficio de evitar la conexión física de cada sensor y cada actuador al sistema central del edificio así como mejorar la velocidad de transmisión de las señales de control.

3.11 Selección del sistema de automatización del edificio

De la selección del sistema de automatización, dependerá la elección de los periféricos finales, principalmente porque se deben escoger unidades terminales que compartan el mismo protocolo de comunicación. A continuación se describen los equipos seleccionados.

3.11.1 Especificaciones del controlador principal de supervisión

Se escoge un controlador de supervisión Boss BMHST00XS0, proporcionado por la marca CAREL, el cual tiene comunicación Modbus, la cual es utilizada por diversos sensores y actuadores y también se comunica con protocolo BACnet, el cual es utilizado por el equipo Chiller.

Este controlador cuenta con una herramienta de ahorro de energía y optimización, mediante algoritmos para análisis y comparación de los consumo de energía.

Cumple con las siguientes características:

Voltaje de operación: 100-240 VAC, 1.5A, 50-60Hz

Corriente máxima: 1.5 A

Temperatura de funcionamiento: 5 to 45 °C

Temperatura de almacenaje: -20 to 65 °C

Condiciones de relé: 3 relé 24 V max, 8A max,

Buzzer: Max 80 dB at 10 cm

Puertos seriales: 2 RS485 master

Puertos USB: 2 standard HOST puertos tipo A y 4 puertos tipo A en el frente.

Capacidad: 300 dispositivos.

Batería interna: CR2032 X memoria CMOS

Dimensiones: 340 x 77 x 145 mm

Acceso remoto con conexión segura a wi-fi.

Adicionalmente, el controlador debe estar suministrado de energía eléctrica mediante un UPS o sistema de administración ininterrumpida, el cual sirve como soporte secundario de emergencia al integro de sistema de automatización, incluyendo controladores y dispositivos de campo.

3.11.2 Módulos de ingreso y salida

Los módulos IOM0002400 son módulos de expansión. Diseñado para interconectar sensores y entradas digitales necesarias para monitorear y administrar una planta con el Sistema de Supervisión / Monitoreo CAREL. Se comunica con el protocolo CAREL a velocidad estándar a través de la serie RS485. Puede gestionar entradas NTC, 4-20 mA, sondas, entradas digitales de contacto opto-aisladas y / o sin tensión. El instrumento puede administrar 6 entradas (seleccionadas a través de software), que permiten la administración de:

2 entradas analógicas (temperatura NTC, 4 -20 mA, radiometría V);

2 entradas analógicas (temperatura NTC) o digitales (contacto libre);

2 entradas digitales (lectura de tensión, optoaisladas).

Se pueden programar umbrales de alarma, tiempos, funciones y asociaciones entre entradas.

Un relé de alarma (contactos de cambio) y un zumbador interno indican condiciones de alarma o comandos auxiliares.

3.11.3 Especificaciones de controlador de campo

El controlador PLC permite una gestión puntual de sensores y actuadores, planificadores horarios y perfiles configurables, todo en un único control.

Un sistema inteligente y fiable que opera autónomamente sin comprometer el confort y la seguridad.

El controlador cuenta con las siguientes características.

Voltaje de operación: 24Vac (+/-15%)

Temperatura de operación: -20°C a 60°C a 90% H.R.

Máxima potencia 45VA.

Categoría de Resistencia del calor y al fuego: Categoría D (UL94-V2)

Características de envejecimiento (horas de funcionamiento): 80,000

Número de ciclos de maniobra: 100,000 (EN6073-1); 30,0000 (UL60730)

CPU: 32bit, 100Mhz

Memoria de datos: 3.2 Mbyte

Categoría de inmunidad a sobretensiones (CEI EN61000-4-5): Categoría III

3.11.4 Especificaciones de sensores de ocupación de iluminación

Sensor de ocupación ultrasónico, alcance de 47 m², configurable a 8 metros, temporizado entre 1, 5, ,10 y 30 minutos para el apagado. La alimentación en por tres cables: línea de fuerza, línea neutra y tierra. Tiempo ajustable y sensibilidad ajustable.

Dependiendo de la geometría del ambiente se debe optar:

SENSORES DE TECHO 360°

Cumple con las siguientes características:

Sensor PIR, IP20.

Rango de 8m.

Consumo de 0.4W en modo espera.

Rango de Operación 220Volt.

SENSORES DE TECHO DUAL 360°

Cumple con las siguientes características:

Sensor PIR/US, IP20.

Rango de 8m.

Consumo de 0.4W en modo espera.

Rango de Operación 220Volt

SENSORES DE TECHO 180°

Cumple con las siguientes características:

Sensor PIR, IP20.

Rango de 8m.

Consumo de 0.4W en modo espera.

Rango de Operación 220Volt.

3.11.5 Especificaciones del Relé

Cumple con las siguientes características:

Temperatura de operación: -40°C a 55°C

Rango de operación de la bobina: 85% a 110% de la tensión nominal

Voltaje límite: 15% de la tensión nominal

Expectativa de vida: Eléctrico: 100 000 ciclos

Tiempo de operación: 15ms

3.11.6 Especificaciones del Switch de corriente

Este dispositivo es necesario para saber si un equipo está energizado o no. Sirve para diagnosticar errores, por ejemplo, falso contacto de un actuador o avería en motor de bomba o ventilador.

Cumple con las siguientes características:

Dimensionado para la carga máxima del equipo donde estará conectado.

Alimentación inducida desde el conductor monitoreado.

Rango de frecuencias 50 y 60 Hz.

Rango de temperaturas al menos entre 4 a 65°C.

Rango de humedad al menos entre 10 y 90%.

3.11.7 Especificaciones del contactor de accionamiento

Recibe una señal de control de un sistema de automatización y actúa como un interruptor para accionar o detener un circuito eléctrico de potencia, por ejemplo, motores, ventiladores, equipos de aire acondicionado, etc. De esta forma, se puede controlar de forma remota el funcionamiento de varios equipos en una edificación.

Los contactores de accionamiento deberán cumplir con los siguientes requisitos mínimos:

Voltaje de trabajo a 220V / 60Hz

Voltaje de control de 12 o 24V AC.

Rango de temperatura de -25 a 70°C.

Dimensionado para la potencia adecuada de la carga que accionará.

3.11.8 Especificaciones de la válvula motorizada by pass

Este dispositivo es necesario para permitir el flujo de agua hacia el circuito secundario del chiller y modularlo. Cuando la válvula está cerrada toda el agua se recircula en el circuito primario del chiller y no llega agua al circuito secundario, cuando esta válvula está abierta toda el agua pasa por la bomba secundaria del chiller.

Las características de esta válvula son:

Entrada analógica disponible (4-20mA o 0-10Vdc)

Salida analógica disponible (4-20mA o 0-10Vdc)

Contar con estas características para monitoreo y control

3.11.9 Especificaciones del variador de frecuencia

En base a las capacidades de los motores de las bombas, torre de enfriamiento y ventiladores, se escoge el Variador de frecuencia Danfoss, ya que cumple con las siguientes características:

Rango de voltaje: 3 x 200 - 240 V

Rango de potencia: 0.25 - 45 kW

Clasificaciones de cerramiento

- IP 20 / Chasis
- IP 21 / NEMA UL Tipo 1 (kit de opción separado)
- IP 54

3.11.10 Especificaciones del sensor de dióxido de carbono

Cada sensor de dióxido será monitoreado y entregará una señal analógica al controlador (analog input), las características mínimas que debe tener son:

Sensor de dióxido por infrarrojo

Montaje en pared de interiores

Alimentación: 24VDC

Rango: 0 a 2000ppm

Salidas: 0-10Vdc / 4-20mA

Precisión: + 3%

3.11.11 Especificaciones del sensor de caudal de aire

Cada sensor de caudal de aire será monitoreado y entregará una señal analógica al controlador (analog input), las características mínimas que debe tener son:

Sensor de caudal de aire para montaje en ducto

Alimentación: 16-30Vdc

Rango: 0-8m/s – 0-16m/s

Temperatura de operación: -10°C/50°C

Precisión: + 5%

3.11.12 Especificaciones del sensor de temperatura en tubería

Se usarán sensores de temperaturas de agua para los chillers y la torre de enfriamiento. Los sensores serán de inmersión (RTD) y deberán contar con su respectivo termopozo para protegerlos y sean reemplazables de una manera más práctica cuando sea necesario. Los requisitos mínimos son:

Temperatura de operación: -25°C a 105°C

Señal de salida Ω "1 μ A/°C or 10mV/°C

Señal de entrada VDC 5 a 30 VDC

Tipos: pt100 (T=0°, R=100 Ω) o pt1000 (T=0°, R=1000 Ω)

Sonda: Acero inoxidable

3.11.13 Especificaciones del sensor de temperatura en ducto

Se usarán sensores de temperaturas en ductos de aire acondicionado. Los sensores serán de inmersión (RTD) y deberán contar con su respectivo termopozo para protegerlos y sean reemplazables de una manera más práctica cuando sea necesario. Los requisitos mínimos son:

Temperatura de operación: -25°C a 105°C

Medición salida 1k ohm de película delgada de níquel

1k ohm promedio de níquel

1k ohm de película delgada de platino

100 ohm promedio equivalente de platino

2.2k (2,252) ohm termistor

10k ohm termistor

Tipos: pt100 ($T=0^{\circ}$, $R=100\Omega$) o pt1000 ($T=0^{\circ}$, $R=1000\Omega$)

Sonda: Acero inoxidable

3.11.14 Especificaciones del termostato

Termostato MS/TP, con pantalla retroiluminada, dispositivos de red que proveen control a 2 a 4 tubos de fan coils usando control on/ off, flotante o proporcional de 0 a 10 VDC con 3 velocidades del ventilador.

3.12 Filosofía del sistema de integración

La filosofía del sistema de integración se basa en los lazos de control y el adecuado funcionamiento de los sistemas. El controlador Boss BMHST00XS0 será el control maestro. El cual supervisará cada uno de los controladores específicos para la planta de agua helada, demanda de ventilación e iluminación: BACnet, Carel ir33 y pChrono, respectivamente. Adicionalmente, se considera medidores Carel i20 para ir monitoreando los consumos de energía en operaciones y poder optimizarlos.

3.12.1 Control del ventilador de aire fresco con variador de frecuencia

La medición del nivel de CO₂ se realiza mediante el sensor DPW502000 de Carel el cual envía una señal de 0 a 10 V (0 es 0 ppm y 10 es 2000 ppm) al controlador IR33B7HR20 Universal de Carel, este controlador en base al nivel medido y al nivel preestablecido, en el presente caso el nivel preestablecido es 800 ppm equivalente a 4 V. Cuando la señal es menor al valor preestablecido de 4 V no envía ninguna señal es decir todos los equipos aguas abajo se apagan o se mantienen apagados. Cuando la señal es mayor a 4 V suministra una señal entre 0 y 10 V al variador de frecuencia VLT HVAC Basic Drive de Danfoss cuando el valor es entre 800 ppm y 2000 ppm respectivamente, así como también envía una señal a un relé de apertura de dámper. El dámper en base a la señal digital procede su apertura o cierre. El variador de frecuencia en base a la señal recibida de 0 a 10 V incrementa o disminuye la frecuencia de suministro en el motor del inyector de aire entre 20 Hertz y 60 Hertz el cual debe dar como resultado el caudal entre 400 y 2000 CFMs. El caudal es medido con el transmisor de velocidad EE65 y envía una señal entre 4 y 20 mA al variador de frecuencia el cual sirve como retroalimentación para asegurar el caudal indicado, donde 4 mA es 0 CFMs y 20 mA es 2000 CFMs. El nivel de CO₂ se modificará y el proceso se realizará de manera continua, empezando por la medición del nivel de CO₂ en cada tiempo de muestreo o 2 minutos.

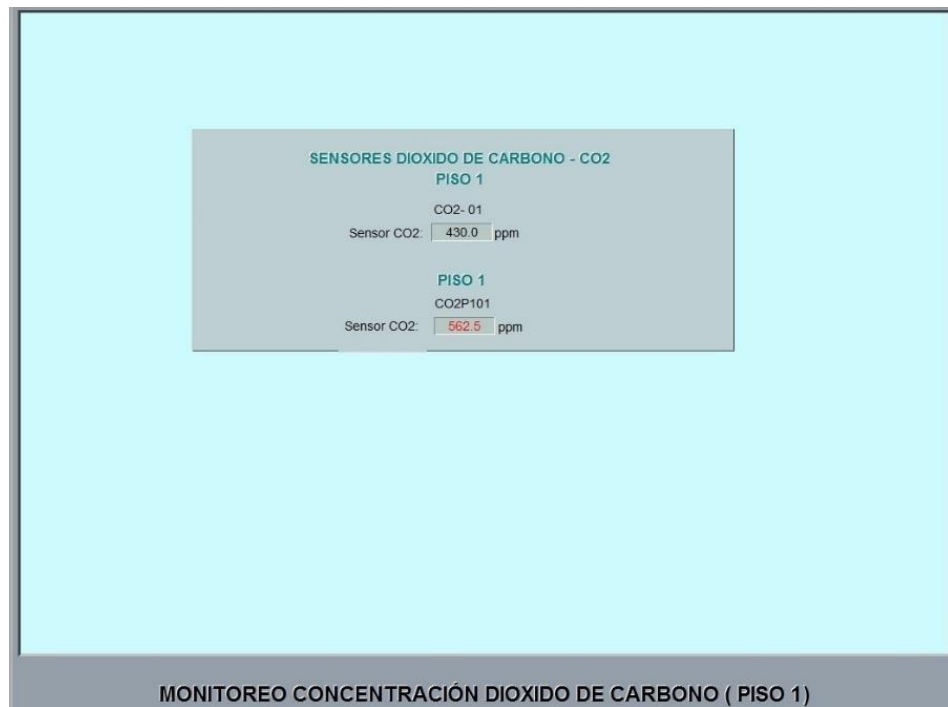


Figura 3.36 Nivel de CO2 indicado en el sistema de control BMS.

Fuente: Propia

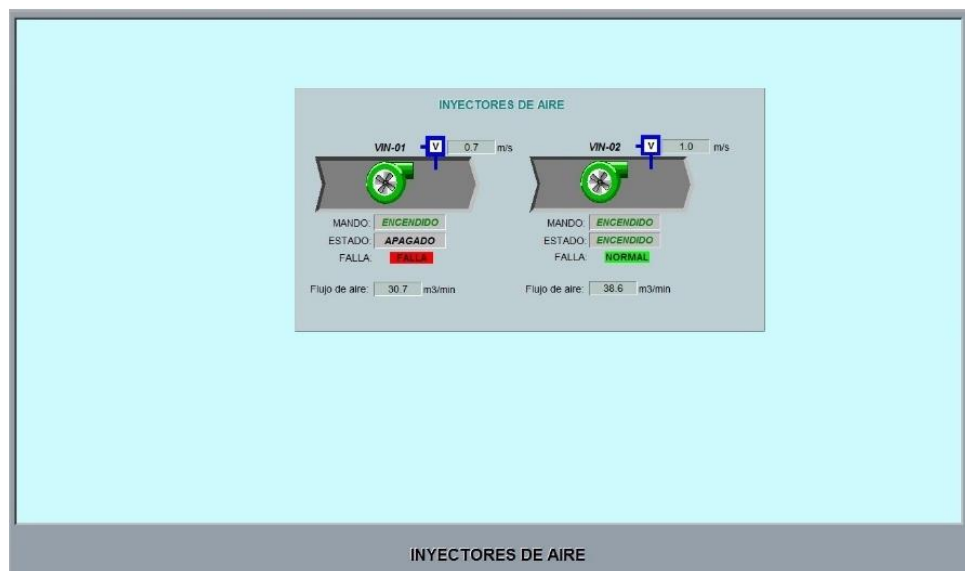


Figura 3.37 Caudal de ventiladores en CFMs indicado en el sistema de control BMS.

Fuente: Propia

3.12.2 Secuencia de operaciones de la planta de agua helada:

El chiller de 120 tons cuenta con un controlador BACnet UPC Open Controller y el chiller de 300 tons cuenta con un controlador Direct Digital Product Integrated Control. Estos controladores propios de cada chiller regulan el funcionamiento óptimo de cada chiller, las señales de estos controladores son enviadas al controlador principal Boss BMHST00XS0 para su registro y monitoreo. El controlador principal Boss seleccionará el funcionamiento del chiller de 120 tons o 300 tons y sus equipos asociados en base a la carga térmica del edificio de acuerdo a la secuencia de operaciones indicadas en la sección 3.5.3. Además de controlar el arranque de los chillers, se monitorea su operación, estados de alarma y falla, parámetros de temperatura de suministro y retorno de agua helada, consumo de BTU, presión diferencial entre suministro y retorno de agua helada.

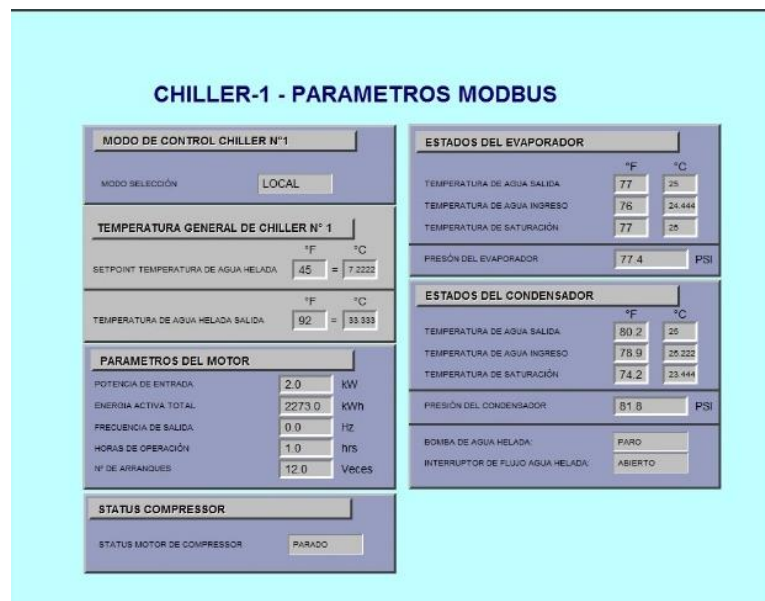


Figura 3.38 Parámetros recopilados del chiller en el sistema de control BMS.

Fuente: Propia

3.12.3 Control de bomba secundaria con variador de frecuencia

La medición de la temperatura de retorno de agua de condensación se realiza mediante el sensor PT100 030220655 de Carel el cual es una termocupla que tiene una resistencia de 100 Ohm a 0 °C y varía entre 100 Ohm a 0 °C y 119.4 Ohm a 50 °C. Se genera una señal en un arreglo con voltaje constante, la cual es leída como corriente de 4mA a 20 mA (4mA es 0 °C y 20 mA es 50 °C) en el controlador IR33B7HR20 Universal de Carel. El nivel preestablecido como set-point es 54 °F (12.22 °C) equivalente a 7.91 mA. Este controlador en base al nivel medido y al nivel preestablecido envía una señal a todos los equipos aguas abajo para prender todo a máxima capacidad cuando esta sea mayor a 7.91 mA, cuando la señal es menor a 7.91 mA suministra una señal entre 0 y 10 V al variador de frecuencia VLT HVAC Basic Drive de Danfoss cuando el valor es entre 0 ppm y 7.91 mA respectivamente, así como también envía una señal a la válvula de bypass motorizada. La válvula en base a la señal digital procede su apertura o cierre. El variador de frecuencia en base a la señal recibida de 0 a 10 V incrementa o disminuye la frecuencia de suministro en el motor de la bomba entre 20 Hertz y 60 Hertz el cual debe dar como resultado el caudal entre 112 y 1008 gpm. Además, se medirá la presión en la tubería de agua con el sensor SPK250000 de Carel en las tuberías de agua helada en el equipo fan coil más lejano con la finalidad de monitorear la presión de agua en las tuberías. El sensor de presión envía una señal entre 4-20 mA cuando la presión es entre 0 y 360 psi al variador de frecuencia, para mantener la presión estable el caudal se incrementará cuando baja la presión o se disminuirá cuando sube la presión. La temperatura de retorno de agua helada se modificará y el

proceso se realizará de manera continua, empezando por la medición temperatura de retorno de agua helada en cada tiempo de muestreo o 2 minutos.

Adicionalmente, el estado de esta bomba será monitoreado por medio de switches de corriente y en caso el estado de la bomba no coincida con la orden enviada a la misma se generará una alarma y la bomba será detenida.

3.12.4 Control de motor de ventilador de torre de enfriamiento con variador de frecuencia

La planta también contará con 01 torre de enfriamiento en la cual se controlarán los parámetros de temperatura del agua, temperatura exterior, estatus de la torre y control de la válvula de ingreso de agua.

La medición de la temperatura de retorno de agua de condensación proveniente de la torre de enfriamiento se realiza mediante el sensor PT100 030220655 de Carel el cual es una termocupla que tiene una resistencia de 100 Ohm a 0 °C y varía entre 100 Ohm a 0 °C y 119.4 Ohm a 50 °C. Se genera una señal en un arreglo con voltaje constante, la cual es leída como corriente de 4mA a 20 mA (4mA es 0 °C y 20 mA es 50 °C) en el controlador IR33B7HR20 Universal de Carel. El nivel preestablecido como set-point es 85 °F (29.44 °C) equivalente a 13.42 mA. Este controlador en base al nivel medido y al nivel preestablecido envía una señal a todos los equipos aguas abajo para prender todo a máxima capacidad cuando esta sea mayor a 13.42 mA, cuando la señal es menor a 13.42 mA suministra una señal entre 0 y 10 V al variador de frecuencia VLT HVAC Basic Drive de Danfoss cuando el valor es entre 0 mA y 13.42 mA respectivamente, así como también envía una señal a la válvula de bypass

motorizada. La válvula en base a la señal digital procede su apertura o cierre. El variador de frecuencia en base a la señal recibida de 0 a 10 V incrementa o disminuye la frecuencia de suministro en el motor del ventilador entre 20 Hertz y 60 Hertz el cual debe dar como resultado el caudal entre 400 y 5000 CFMs. La temperatura de salida de agua de la torre se modificará y el proceso se realizará de manera continua, empezando por la medición temperatura de temperatura de salida de agua de la torre en cada tiempo de muestreo o 2 minutos.

Adicionalmente, el estado del motor de ventilador de la torre será monitoreado por medio de switches de corriente y en caso el estado del ventilador no coincida con la orden enviada a la misma se generará una alarma y el ventilador será detenido.

- Medición:

Se considera el consumo de energía eléctrica se realizará integrando el analizador de red del tablero de torres, bombas, chillers (protocolo MODBUS RTU).

3.12.5 Control del confort de temperatura por termostatos

Los fan coils se controlarán en función a la temperatura medida en el ambiente enviando las señales para la activación del ventilador dependiendo de las velocidades que cada uno de estos tengan. Ante un aumento de temperatura sobre el valor pre fijado (set point) se comandará encender el ventilador y modular la válvula de agua helada. La señal será enviada mediante

controladores dedicados utilizando los contactos secos de las 3 velocidades (Low, médium, fast) así como la válvula de agua helada de 24Vac.

3.12.6 Sistemas de iluminación mediante sensores de luz-día

La medición del nivel de luz natural se realiza mediante el sensor ZUMMESH-OL-PHOTOCELL-BATT de Creston el cual envía una señal inalámbrica al controlador ZUM LOAD CONTROLLER el cual automáticamente ajusta en nivel de iluminación de las luminarias en base al nivel detectado. La iluminación se atenuará y el proceso se realizará de manera continua, empezando por la medición del nivel de luz día en cada tiempo de muestreo o 2 minutos.

3.12.7 Sistemas de iluminación mediante sensores de presencia

Mediante el sensor ZUMMESH-PIR-OCCUPANCY-BATT de Creston se detecta la ocupación de un ambiente. Cuando se detecta ocupación, se envía una señal inalámbrica al controlador ZUM LOAD CONTROLLER el cual prende las luminarias y 30 minutos después de no detección estas se apagan. La configuración se realiza en el propio sensor, el cual puede escoger el apagado en 5,10 y 30 minutos. En el caso de los estacionamientos se mantiene prendido siempre un 30% de la carga de iluminación por seguridad, el cual funciona con un circuito eléctrico independiente.

3.13 Diagrama de Control

En el siguiente diagrama se indica el funcionamiento del controlador principal Supervisor Boss, el cual controla los equipos mediante protocolo Profibus en el caso de medidores, y al sistema Chiller mediante comunicación Modbus.



Figura 3.39 Diagrama de comunicación del sistema de control BMS.

Fuente: Propia

3.14 Estructura de costo del equipamiento

Los equipos del sistema de automatización se han dividido en equipos necesarios en un sistema de automatización, y en equipos diseñados específicamente para optimizar el consumo de energía, ya que en base a estos últimos, y al ahorro de energía, se podrá evaluar en cuanto tiempo se obtiene un retorno de la inversión. Los equipos de control necesarios para el funcionamiento de los sistemas se indican en la tabla 3-29:

Tabla 3-29 Lista de equipos del sistema de control centralizado

Sistema	Modelo de Equipo	Cantidad
Controlador Principal	Supervisión Boss BMHST00XS0	1
Controladores de Campo	pChrono	1
	BACnet UPC Open Controller	1
	Controlador Direct Digital Product Integrated Control	1
Equipos de Campo	Switch de corriente	10
	Relé	6

Fuente: Propia

Los equipos de control para optimizar el consumo de energía se detallan en la tabla 3-30 y 3-31: La tabla 3-30 incluye la automatización de la climatización y la tabla 3-31 la automatización de la iluminación. El presupuesto aproximado para la instalación y los equipos es de 21,850 dólares y 26,880 dólares para el sistema de control de climatización e iluminación, respectivamente.

Tabla 3-30 Lista de equipos para optimización de consumo de energía en climatización

Sistema	Modelo de Equipo	Cantidad	Presupuesto en dólares
Controlador de Campo	Controlador IR33B7HR20 Universal de Carel	4	\$ 2400
Equipos de campo para eficiencia energética	Variador de frecuencia VLT HVAC Basic Drive de Danfoss	4	\$ 18000
	Sensor de temperatura PT100 030220655 de Carel	5	\$ 250
	Transductor de presión en tubería de agua SPK250000 de Carel	1	\$ 500
	Sensor DPW502000 de Carel	2	\$ 100
	Transmisor de velocidad EE65	2	\$ 600

Fuente: Propia

Tabla 3-31 Lista de equipos para optimización de consumo de energía en iluminación

Sistema	Modelo de Equipo	Cantidad	Presupuesto en dólares
Equipos de campo para eficiencia energética	ZUMMESH-OL-PHOTOCELL-BATT	39	\$ 7800
	ZUM LOAD CONTROLLER	117	\$ 11700
	ZUMMESH-PIR-OCCUPANCY-BATT	82	\$ 5740
	ZUM LOAD CONTROLLER	82	\$ 1640

Fuente: Propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

4.1 Análisis descriptivo

Para el análisis de los datos se utilizaron diversos modelamientos energéticos indicados en el capítulo anterior. Los cálculos se realizaron para cada tipo de sistema de control en el edificio de estudio. En la figura 4.1 se muestra la comparación del consumo de energía de un edificio que no posee controles versus un edificio con controles para la climatización y la iluminación. El edificio ha sido modelado con los siguientes controles de izquierda a derecha:

- Edificio 1: sin controles de optimización de energía.
- Edificio 2: variador de frecuencia en la bomba secundaria de 30 HP (22,371 kW) del chiller.
- Edificio 3: Edificio 2 + variador de frecuencia en el motor del ventilador de la torre de enfriamiento de 15 HP (11,185 W).
- Edificio 4: Edificio 3 + optimización de la planta de agua helada mediante cambio del chiller en 75 tons de carga de refrigeración.
- Edificio 5: Edificio 4 + variadores de frecuencia en motores de los ventiladores de aire fresco en sala de reuniones y capacitaciones, de 1.5 HP (1,18 W) cada uno.

- Edificio 6: Edificio 5 + sensores de luz-día en ambientes perimetrales de oficinas del piso 2 al 14.
- Edificio 7: Edificio 6 + sensores de presencia en baños, estacionamientos y hall de ascensores.

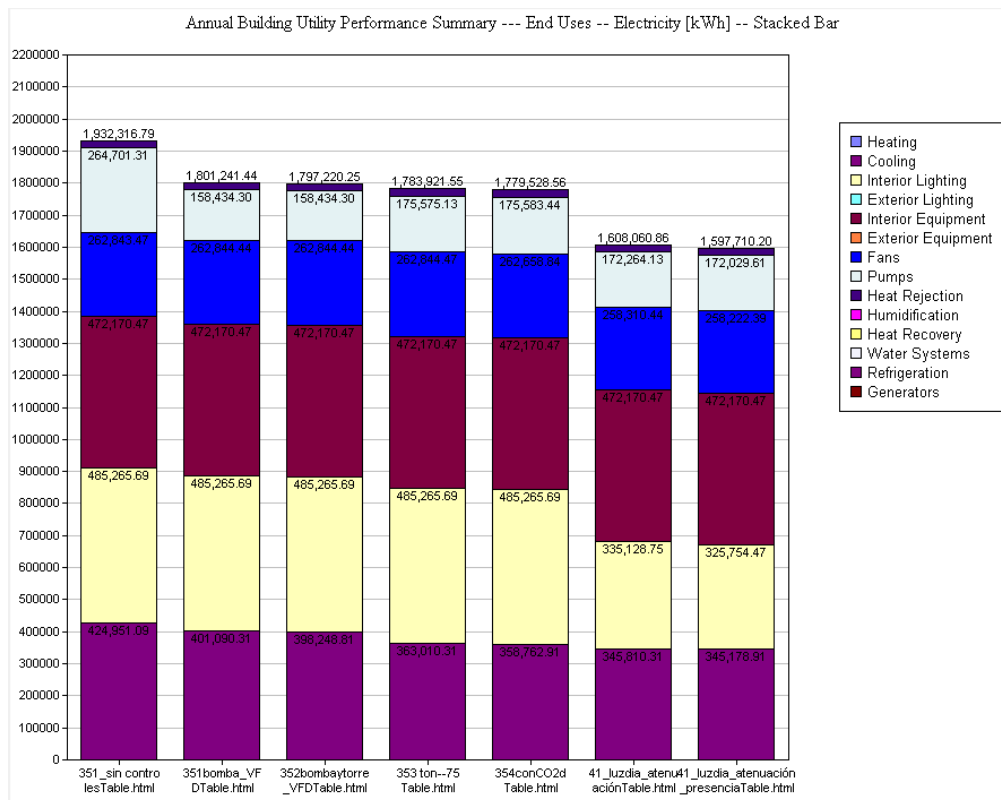


Figura 4.1 Comparación del consumo anual de energía edificio sin control vs edificios con controles para climatización e iluminación.

Fuente: Propia

El ahorro se da principalmente en “cooling”, que significa el consumo de los chillers, y en “interior lighting”, que significa el consumo por la iluminación. Podemos también deducir que las estrategias de control que brindan mayor ahorro es el uso de un variador de frecuencia en el motor de la bomba secundaria y el uso de sensores luz-día que atenúan las luminarias en áreas de

oficinas perimetrales. Además, que cada una de las estrategias de control siempre brinda un ahorro de energía.

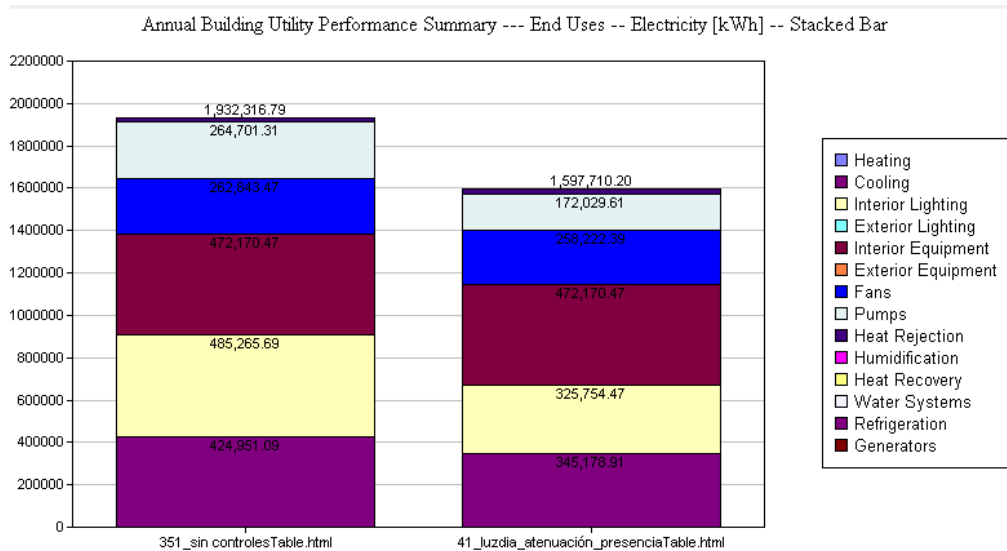


Figura 4.2 Comparación del consumo anual de energía edificio sin control vs edificio con todos los controles simulados para climatización e iluminación.

Fuente: Propia

Por otro lado, ha sido posible diseñar cada de las estrategias de control utilizando sensores, actuadores y controladores que son compatibles entre sí y brindan un adecuado funcionamiento, también se incluyó las señales de control y se calculó la inversión requerida para implementar cada estrategia de control, considerando que el edificio ya posee un sistema central de automatización.

Los resultados de ahorro se resumen en la tabla 4.1, la cual detalla el ahorro de energía y de costo de energía por cada estrategia de control seleccionada para los sistemas del edificio de la presente tesis. La tabla está basada en los resultados de ahorro de energía mediante los modelamientos energéticos realizados en el capítulo 3 y en la tarifa de kWh de electricidad, la cual es de

0.1 \$/kWh, este valor es un promedio de las tarifa MT2 de electricidad en media tensión de entre 0.25 centavos de sol el kWh y 0.41 centavos de sol el kWh para la tarifa BT5D baja tensión. El ahorro puede variar ligeramente en base a la tarifa seleccionada, pero ese análisis no está dentro del alcance de la presente tesis.

Tabla 4-1 Inversión por estrategia de control

Estrategia de control	Ahorro en kWh por año	Ahorro en dólares
Utilizar variador de frecuencia en la bomba secundaria del chiller	131,075	\$13,107
Utilizar variador de frecuencia en el motor del ventilador de la torre de enfriamiento	4,021	\$402
Configuración óptima del chiller	13,299	\$1,330
Utilizar un control de demanda de ventilación mediante monitoreo de CO2	4,393	\$439
Utilizar sensores de luz-día en ambientes perimetrales	126,783	\$12,678
Utilizar sensores de presencia en hall de ascensores, baños y estacionamientos	10,350	\$1,035

Fuente: Propia

En la tabla 4-2 se ha realizado la comparación de cada estrategia de control con la inversión inicial requerida para implementarla. En la última columna de la tabla se indica el retorno de inversión de cada estrategia de control, cabe aclarar que se asume en el edificio un sistema central de automatización, la cual es usual en edificios de oficinas de gran tamaño. El cálculo no ha considerado el incremento anual de costo de energía, el costo financiero en caso la inversión se realice mediante un préstamo y tampoco los costos de mantenimiento y

cambios de equipos. Aunque todos estos costos son incidentes en el resultado final, no se espera una variación grande en los resultados.

Tabla 4-2 Retorno de inversión de cada estrategia de control

Estrategia de control	Ahorro en kWh por año	Ahorro en dólares	Porcentaje de ahorro	Inversión en dólares	Retorno de inversión en años
Utilizar variador de frecuencia en la bomba secundaria del chiller	131,075	\$13,107	6.78%	\$11,100	0.8
Utilizar variador de frecuencia en el motor del ventilador de la torre de enfriamiento	4,021	\$402	0.22%	\$4,600	11.4
Configuración óptima del chiller	13,299	\$1,330	0.74%	\$0	0.0
Utilizar un control de demanda de ventilación mediante monitoreo de CO2	4,393	\$439	0.25%	\$4,900	11.1
Utilizar sensores de luz-día en ambientes perimetrales	126,783	\$12,678	7.31%	\$19,500	1.54
Utilizar sensores de presencia en hall de ascensores, baños y estacionamientos	10,350	\$1,035	0.64%	\$7,380	7.1

Fuente: Propia

4.2 Contrastación de hipótesis

Diseñar un sistema de control que cumpla con requerimientos de eficiencia energética es posible y, considerando diversas estrategias de control brinda un ahorro anual de energía de \$15,278 y \$13,713 en climatización e iluminación respectivamente. El costo aproximado es de \$20,600 dólares en el sistema de

HVAC y de \$26,880 en el sistema de control para la iluminación. Es decir, en cada caso se tiene un retorno de inversión de 1.35 y 2 años respectivamente. Diseñar el sistema más eficiente ha sido posible gracias a la simulación energética con la cual se pudo escoger las estrategias que brindan un mayor ahorro desde el punto de vista energético.

Ha sido posible diseñar el sistema de control de demanda de ventilación en base al nivel de CO₂ en sala de reuniones y capacitaciones, sistema de control de la planta de agua helada centralizada mediante el uso de variadores de frecuencia en bombas secundarias de chiller y en el motor del ventilador de la torre de enfriamiento y sistema de control de optimización del funcionamiento de los chillers. También, ha sido posible diseñar el sistema de control de iluminación mediante sensores de luz día en ambiente perimetrales de oficinas y sensores de presencia en baños, hall de ascensores y estacionamientos.

Las estrategias de control se han basado en los requerimientos de la certificación LEED, por ende, el diseño de la automatización del edificio contribuye con esta certificación. Incluso, como el ahorro de energía total anual logrado es de 17.3%, se puede decir que bonifica en 8 puntos LEED v4.

CONCLUSIONES

Las estrategias de control han sido validadas mediante un modelamiento energético. El modelamiento energético permite predecir cuanto es el consumo de energía anual en base a los equipamientos del edificio y su secuencia de operaciones y control, por ende, ha sido de gran ayuda para elegir la estrategia de control que contribuye a un mayor ahorro de energía. Además, el modelamiento energético al predecir el consumo de electricidad en kWh, y utilizando un factor de precio de la electricidad en kWh, se puede calcular el consumo y ahorro de energía en dinero.

Como era de esperarse, las estrategias de control ahorran energía en todos los casos, y siempre existe una reducción en el consumo de energía, sin embargo, cuantificar este ahorro no era sencillo, por ello se utilizaron las simulaciones energéticas para estimar los consumos de energía.

Es muy útil utilizar una simulación energética del edificio para seleccionar el tipo de control a utilizar.

Se concluye que:

- 1) “Ha sido factible realizar el diseño de un sistema inteligente en un edificio de oficinas de 14 pisos en Lima ubicado en Camacho, considerando diversas estrategias de control que dan como resultado un edificio automatizado con la

principal ventaja de lograr un ahorro de energía de 17.3% en el sistema de iluminación y aire acondicionado.”

- 2) Mediante los resultados de las simulaciones el nivel de temperatura interior ha sido mantenido en 24 °C, así como también no se ha excedido del nivel de concentración de CO₂ por lo que se cumple los lineamiento de confort interior de temperatura del estándar ANSI/ASHRAE 55-2010 y de calidad de ventilación ANSI/ASHRAE 62.1-2010.
- 3) La inversión del sistema de control para optimizar el consumo de energía es de \$47,480 y el ahorro anual de energía es de \$28,991, por ende, el retorno de inversión es de 1.6 años. Es decir, la implementación de las estrategias de control son viables económicamente.
- 4) Las estrategias de control de automatización para el sistema de aire acondicionado e iluminación lograron un ahorro de energía total anual de 17.3%.

Las conclusiones anteriores, las cuales han sido fundamentadas y comprobadas, se convierten en una tesis.

RECOMENDACIONES

- 1) El diseño de las estrategias de control se basaron en los diversos modelamiento energéticos realizados, sin embargo los resultados de ahorros reales podrían ser distintos a los resultados de la presente tesis ya que en el modelamiento se ha tratado de usar patrones cercanos a la realidad de ocupación, horarios de funcionamiento, horarios de entrada y salida de personas, set-point de temperatura en ambientes interiores, pero en la realidad todos estos valores pueden fluctuar y afectar el desempeño de energía.
- 2) Los resultados se han validado para el equipamiento indicado en el edificio, cualquier cambio en el equipamiento va afectar los resultados, pese a que se puedan mantener las mismas estrategias de control.
- 3) El estudio realizado incluye los datos climáticos de lima, por ende, los ahorros generados en diversas latitudes o zonas climáticas pueden variar.
- 4) Un análisis posterior, no abordado en la presente tesis, es realizar el modelamiento energético en edificios existentes y estimar los ahorros de energía potenciales por cada estrategia de control, para finalmente implementarlos y compararlos con los recibos de electricidad. La dificultad que se podría encontrar es conseguir data real de ocupación, usos, horarios de

prendido y apagado de equipos y estimar en base a la información recopilada lo patrones futuros.

- 5) Las estrategias de control pueden ser muy diversas, e incluso las estrategias analizadas en la tesis pueden ser enfocadas con otros tipos de variables controladas y con valores deseados distintos, por ende el desempeño energético sería distinto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB. (09 de 09 de 2018). *Variadores de frecuencia ABB*. Obtenido de <http://new.abb.com/drives/es>
2. ANSI/ASHRAE. (2010). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
3. ANSI/ASHRAE/IES. (2010). *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
4. ASHRAE. (2001). *2001 ASHRAE Fundamentals Handbook*. Atlanta: ASHRAE Handbook Editor.
5. Assaf, L. (2006). *Sistemas innovadores de iluminación*. Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.
6. Caldas, L., & Norford, L. (2003). Genetic Algorithms for optimization of building envelopes and control of HVAC Systems. (J. o. Engineering, Ed.) 10.
7. CAPECO. (2011). *XVI Estudio ‘‘El Mercado de Edificaciones Urbanas en Lima Metropolitana y el Callao’’*. Lima: Camara Peruana de la Construcción.

8. Cruz Lopez, R. (2008). *Diseño e implementación de la automatización de un sistema de distribución de agua potable para el AA.HH La Pampa*. Lima.: Escuela profesional de Ingeniería mecatrónica. Universidad Nacional de Ingeniería. .
9. Design Builder. (2 de 2 de 2019). *Design Builder EMS*. Obtenido de https://designbuilder.co.uk/downloads/help/DesignBuilder_EMS_Demo_v6.0.pdf
10. Díaz Mínguez, R. (12 de 12 de 2015). *Definamos qué es hoy un edificio inteligente*. Obtenido de https://www.linkedin.com/pulse/definamos-qu%C3%A9-es-hoy-un-edificio-inteligente-ricardo-d%C3%ADaz-m%C3%ADnguez?trk=related_artice_Definamos%20qu%C3%A9%20es%20hoy%20un%2
11. Duong, P. R. (2016). *How can occupancy modeling and occupancy sensors reduce energy usage in academic buildings: An application approach to University of San Francisco*. San Francisco: University of San Francisco.
12. EnergyPlus. (2016). *Input Output Reference - EnergyPlus Version 8.5 Documentation*. California: THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY.
13. Fan, W. (2008). *Optimization of Supply air Temperature Reset Schedule For Single Duct VAV Systems*. U.S.A.: Texas A&M University.

14. Hernández Soriano, J. (2010). *Sistemas de control para la automatización de edificios inteligentes*. México: Escuela de ingeniería Robótica Industrial. Instituto Politécnico Nacional. .
15. Herrera, R. M. (2010). *Casas inteligentes vs casas ecológicas*. Madrid.
16. Huang, W., & Lam, H. (1997). Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems. *Energy and Buildings*, 26.
17. Ibarra, D., & Reinhart, C. (2012). *Building Performance Simulation for Designers*. Massachusetts: Harvard University. Graduate School of Design.
18. Illuminating Engineering Society of North America. (2009). *The IESNA Lighting Handbook* . New York: The Illuminating Engineering Society.
19. Lopez Castellanos, M., Rojas Herrera, A. M., & Ruiz Maldonado, I. A. (2012). *Análisis energético del edificio de estudios industriales y empresariales según lineamientos del sistema de certificación LEED a partir del uso de la herramienta Autodesk Ecotec Analysis*. Bucaramanga, Colombia.: Escuelas de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicacion. Universidad Industrial de Santander.
20. Martinez Fernandez, C. (09 de 09 de 2011). *III Feria Internacional Energía Ecoeficiencia*. Empresa ISDE. Obtenido de <https://docplayer.es/15646709-Conferencia-internacional-los-sistemas-de-automatizacion-y-control-aplicaciones-para-reducir-el-consumo-energetico-en-los-edificios.html>
21. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima: El Peruano.

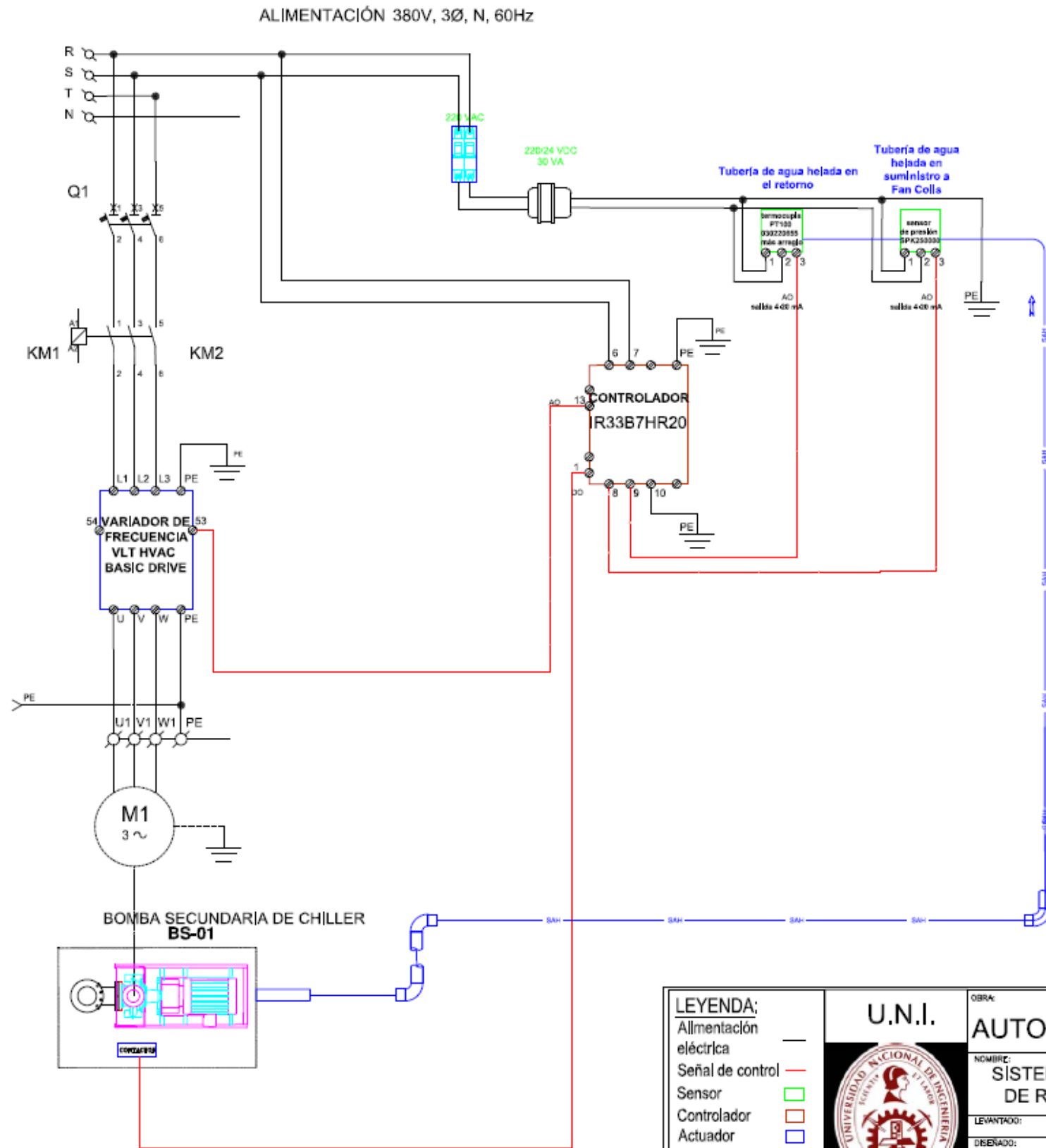
22. Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Prentice Hall.
23. Pajares Correa, F. (2013). *Optimización del consumo y la demanda de energía eléctrica utilizando redes neuronales artificiales y modelos dinámicos de simulación*. Lima.: Escuela profesional de Ingeniería mecatrónica. Universidad Nacional de Ingeniería.
24. Research and Market . (12 de 12 de 2018). *Intelligent Building Market by Component, Type, and End User - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2017-2024*. (A. A. LLP, Ed.) Obtenido de <https://www.researchandmarkets.com/publication/mndfb9g/4580562>
25. Rodríguez Delgado, V. (2010). *Diseño del sistema de control para la ventilación de una mina subterránea usando un controlador ACM800*. Lima: Escuela profesional de Ingeniería mecatrónica. Universidad Nacional de Ingeniería. .
26. U.S. Green Building Council. (2013). *LEED Reference Guide for Building Design and Construction v4*. Washington: U.S. Green Building Council.
27. Valdivia-Nodal, Y., Lapido-Rodríguez, M., & Gómez Sarduy, J. (2012). *Optimización de sistemas centralizados de agua helada en la etapa prematura del diseño comercial*. Universidad de Cienfuegos. Cuba. 2012. La Habana: Universidad de Cienfuegos.
28. Wang, S. K. (2000). *Handbook of air conditioning and refrigeration*. New York: McGraw-Hill.

29. Wang, S., & Lavan, Z. (1999). *Air-Conditioning and Refrigeration - Mechanical Engineering Handbook*. Illinois: Ed. Frank Kreith.
30. William O'Brien, S. G. (2017). Modelling and Simulation of Lighting Use Patterns in Office Spaces. *15th IBPSA Conference* (págs. 1230-1238). California: International Building Performance Simulation Association.
31. Yordanova, S. (2017). Energy Efficient Fuzzy Logic Control of Indoor Air-Conditioning in Real Time. *International Journal of Control Systems and Robotics*, 8.
32. Zaheer-Uddin, M. (1993). Optimal, sub-optimal and adaptive control methods for the design of temperature controllers for intelligent buildings. *Building and Environment*. *Building and Environment*, 11.

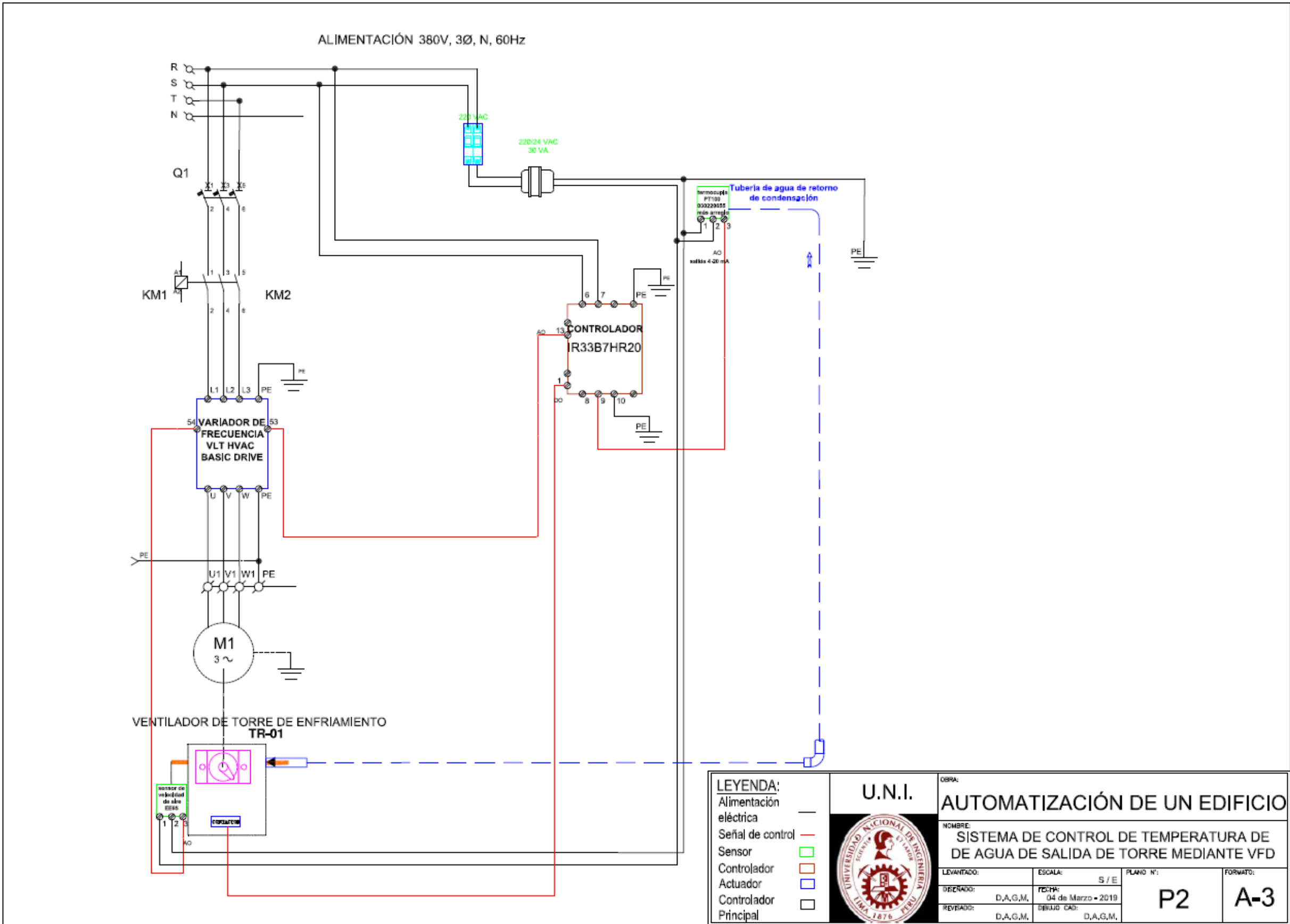
ANEXO 1: PLANOS

Se presentan los planos de conexiones para cada sistema de control en 3 planos; todos los planos se enfocan en el sistema de aire acondicionado por ser los que tienen controladores para funciones específicas, las cuales son:

- P.1. Sistema de control de presión de agua de chiller en la demanda mediante variador de frecuencia en bomba secundaria
- P.2. Sistema de control de temperatura de salida de agua en torre de enfriamiento mediante variador de frecuencia en el ventilador axial.
- P.3. Sistema de control de la demanda de ventilación mediante monitoreo de dióxido de carbono.



LEYENDA: Alimentación eléctrica — Señal de control — Sensor — Controlador — Actuador — Controlador Principal —	U.N.I. 	OBRA: AUTOMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO		
	NOMBRE: SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN DE AGUA DE RETORNO DEL CHILLER MEDIANTE VFD			
	LEVANTADO:	ESCALA: S / E	PLANO N°:	FORMATO:
	DISEÑADO: D.A.G.M.	FECHA: 04 de Marzo • 2019	P1	A-3
REVISADO: D.A.G.M.	DIBUJO CAD: D.A.G.M.			

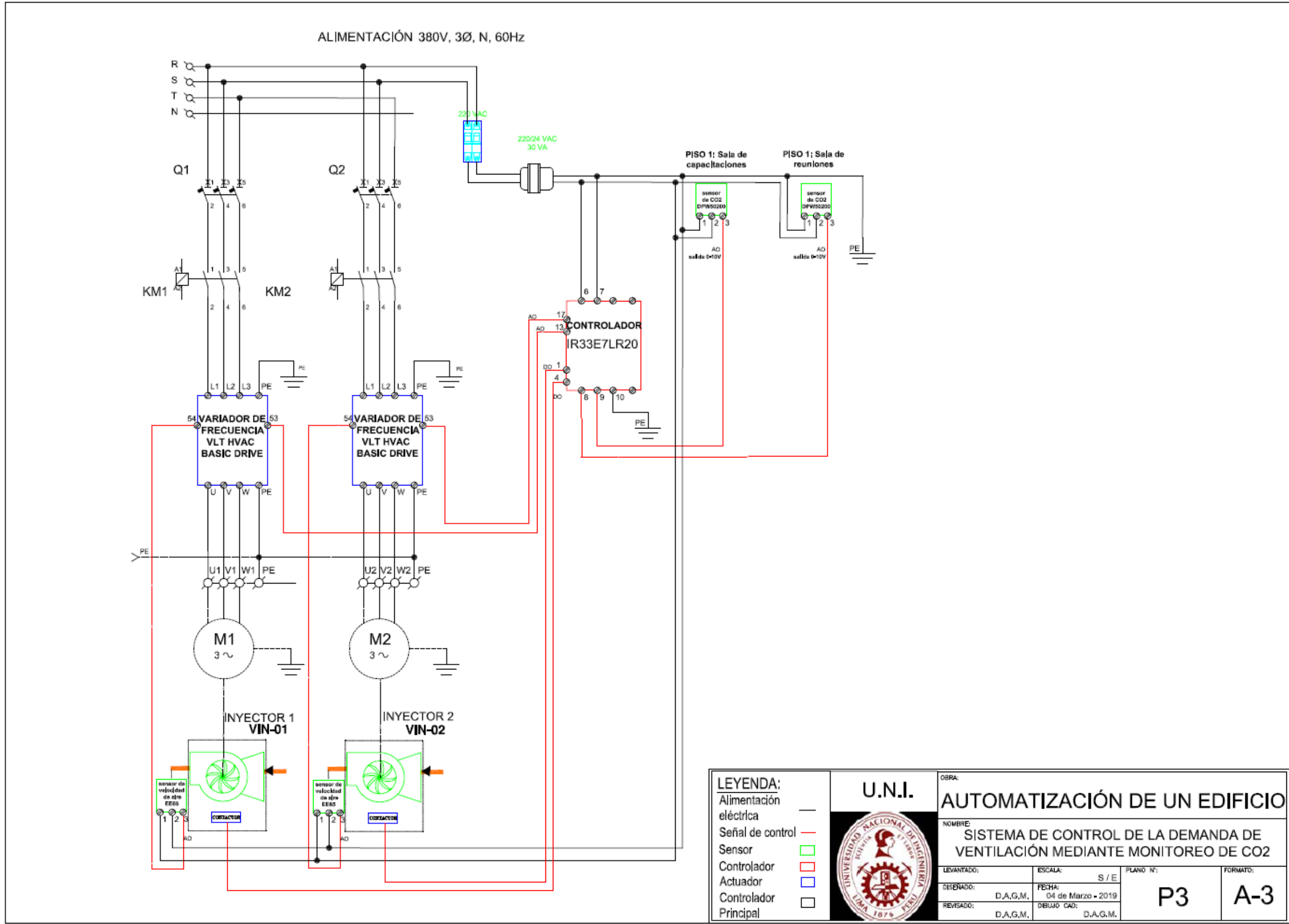


LEYENDA:

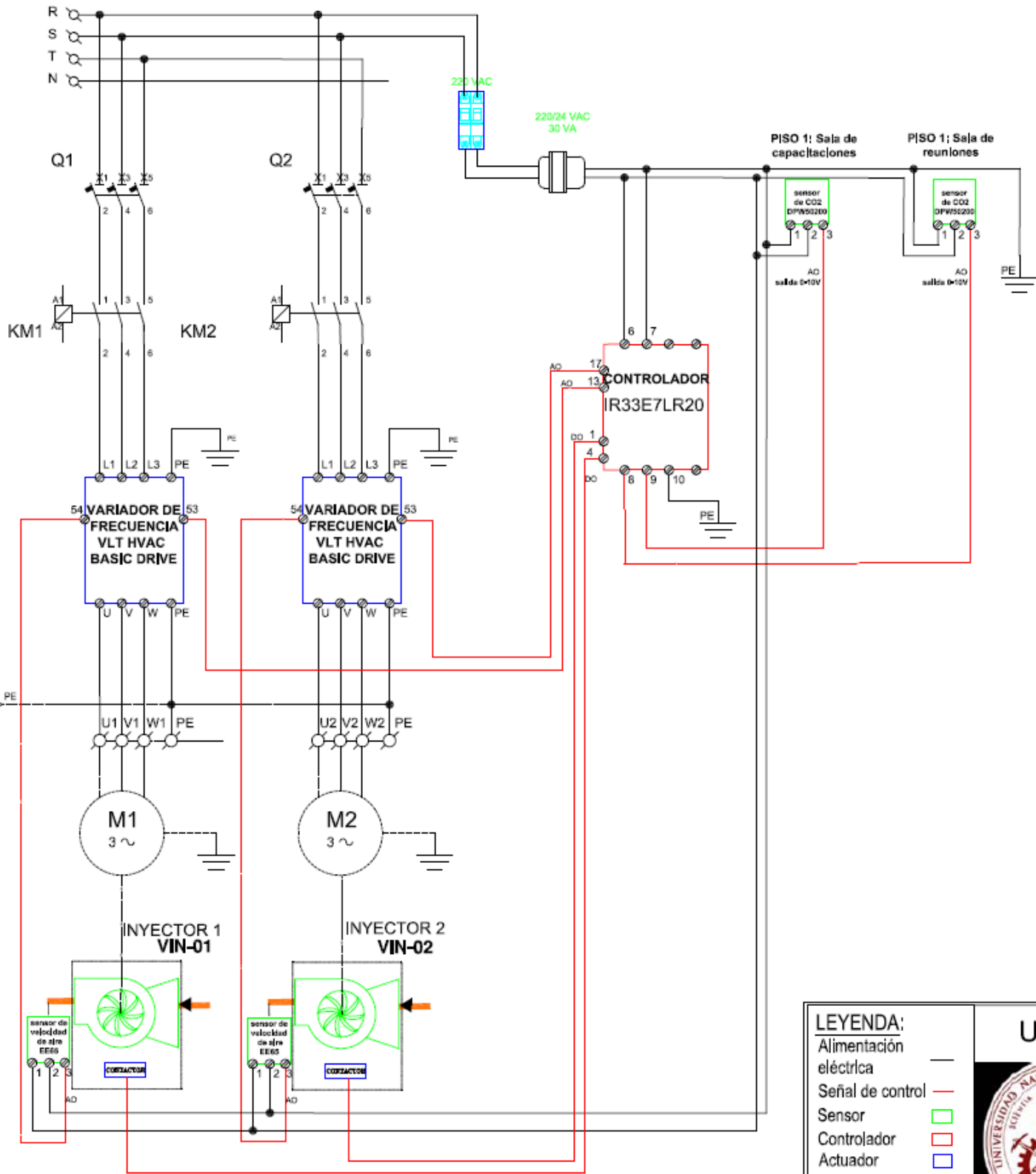
- Alimentación eléctrica —
- Señal de control —
- Sensor —
- Controlador —
- Actuador —
- Controlador Principal —



U.N.I. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA LIMA, 1876				OSRA: AUTOMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO
NOMBRE: SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE DE AGUA DE SALIDA DE TORRE MEDIANTE VFD				
LEVANTADO:	ESCALA: S / E	PLANO N°:	FORMATO:	
DISEÑADO: D.A.G.M.	FECHA: 04 de Marzo • 2019	P2	A-3	
REVISADO: D.A.G.M.	DIBUJOS CAD: D.A.G.M.			



ALIMENTACIÓN 380V, 3Ø, N, 60Hz



LEYENDA:

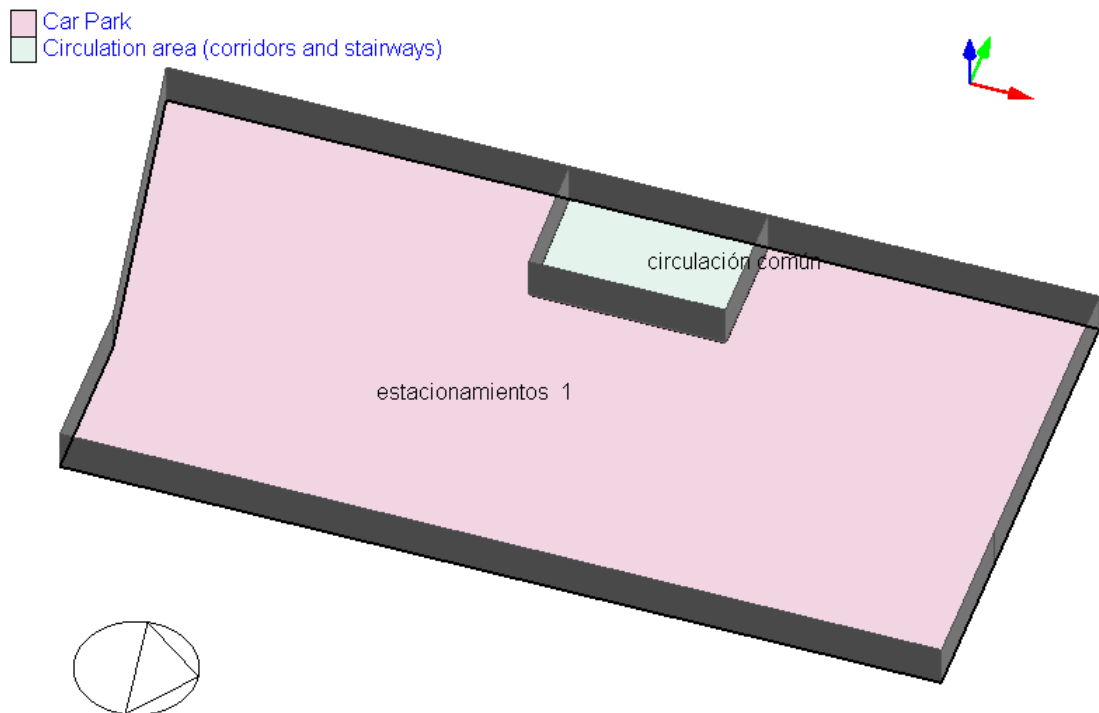
- Alimentación eléctrica —
- Señal de control —
- Sensor □
- Controlador □
- Actuador □
- Controlador Principal



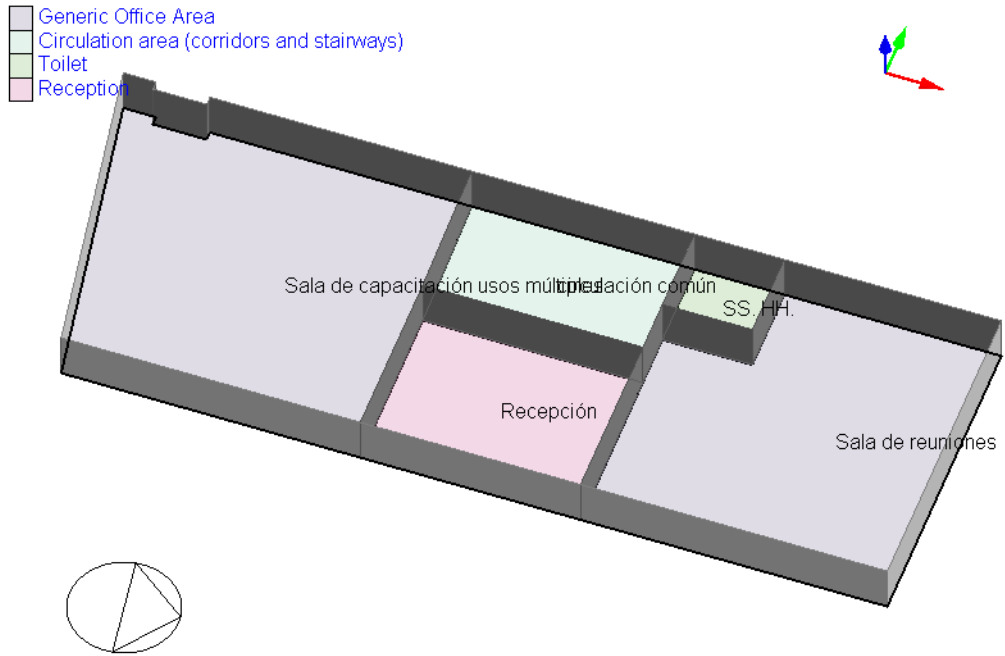
OBRA:		AUTOMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO	
NOMBRE:		SISTEMA DE CONTROL DE LA DEMANDA DE VENTILACIÓN MEDIANTE MONITOREO DE CO2	
LEVANTADO:	ESCALA:	PLANO N°:	FORMATO:
DISEÑADO:	FECHA:	P3	A-3
REVISADO:	DEBILIDAD:		
D.A.G.M.	04 de Marzo - 2019		
D.A.G.M.	D.A.G.M.		

ANEXO 2: VISTA DEL EDIFICIO EN EL MODELAMIENTO ENERGÉTICO Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

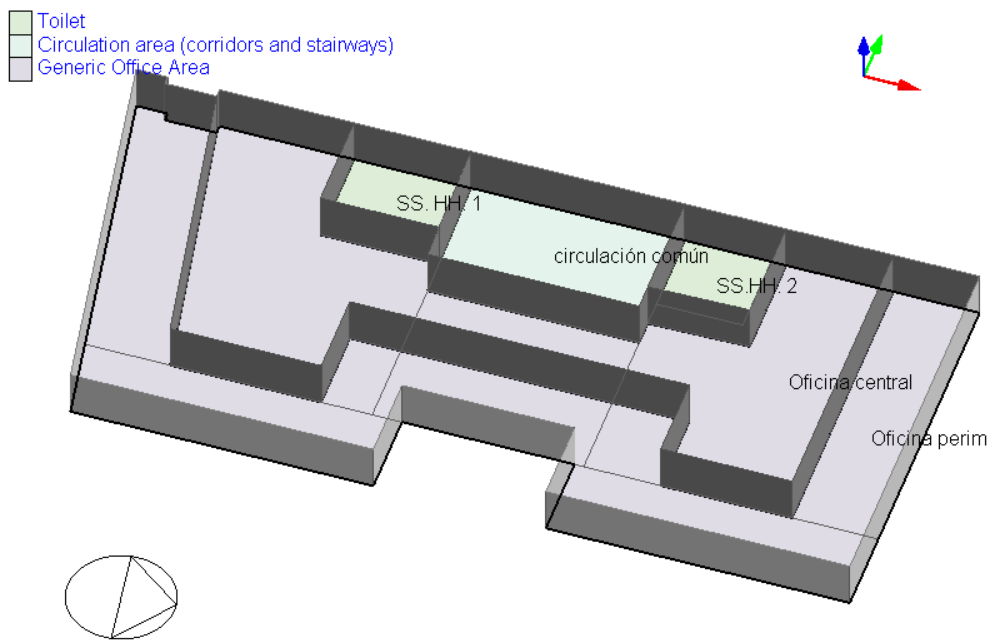
Vista de un sótano típico del edificio de oficinas:



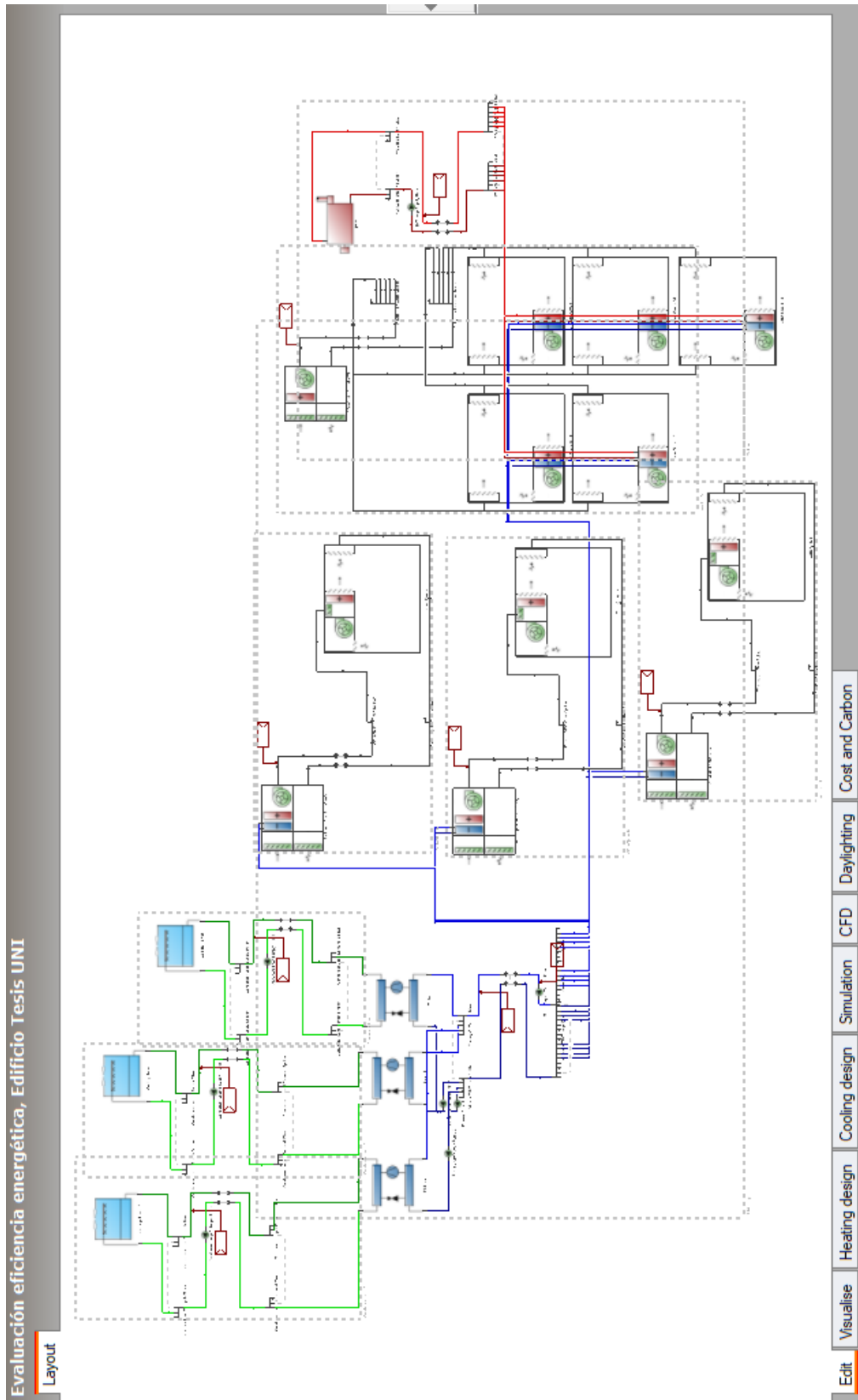
Vista del primer Nivel del edificio de oficinas:



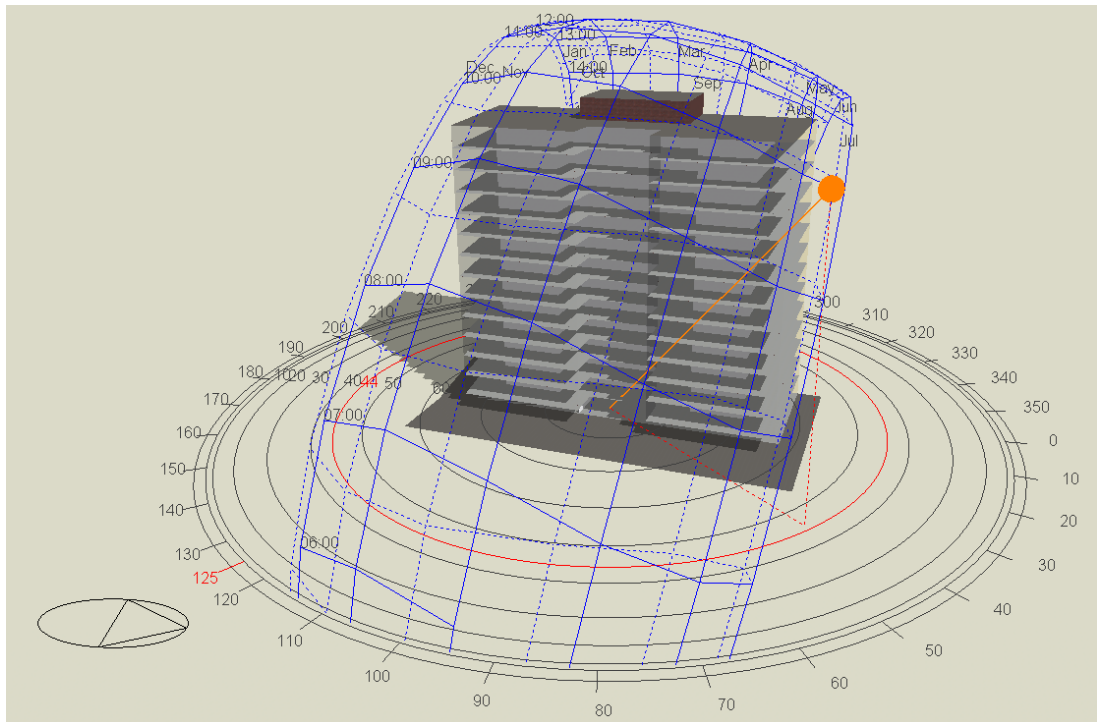
Vista de un piso típico del edificio de oficinas:



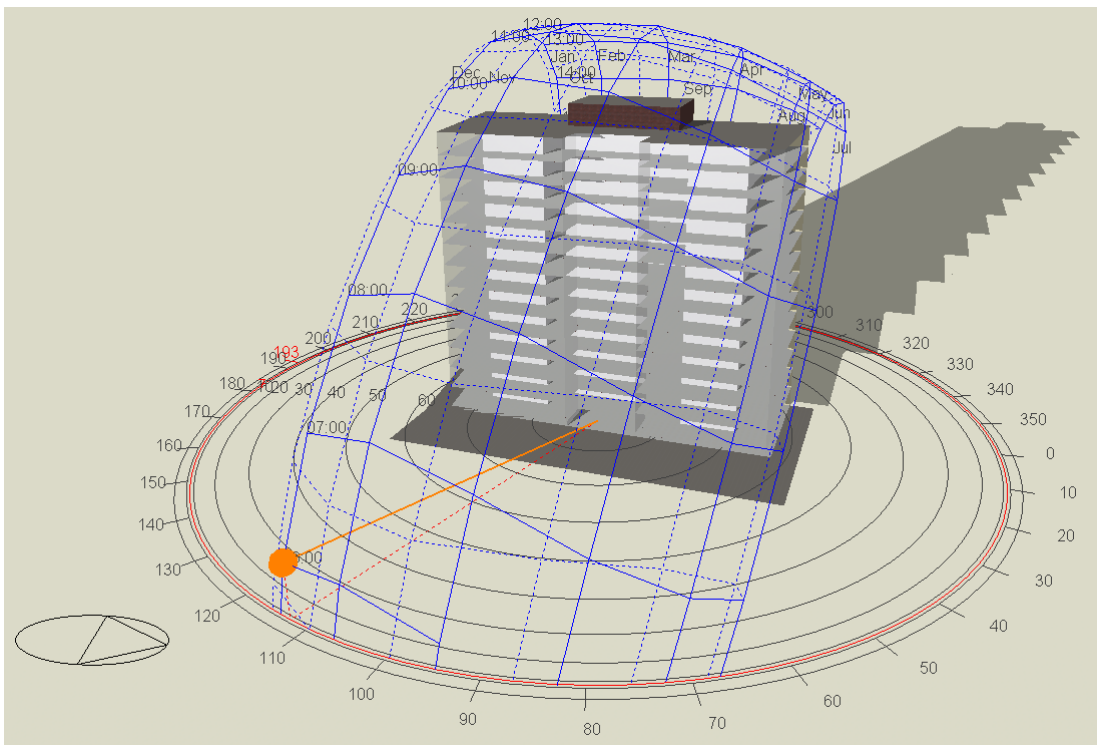
Esquema del sistema de ingreso de datos de climatización y ventilación:



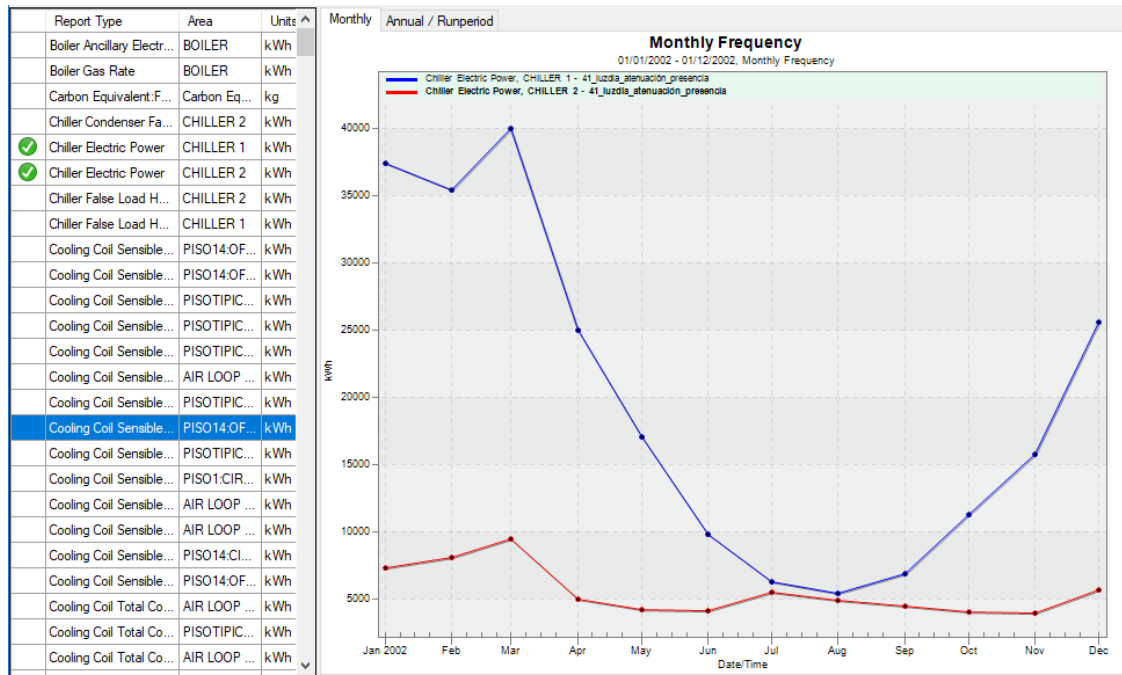
Recorrido Solar y sombras para una simulación a las 10.00 a.m. del 15 de julio.



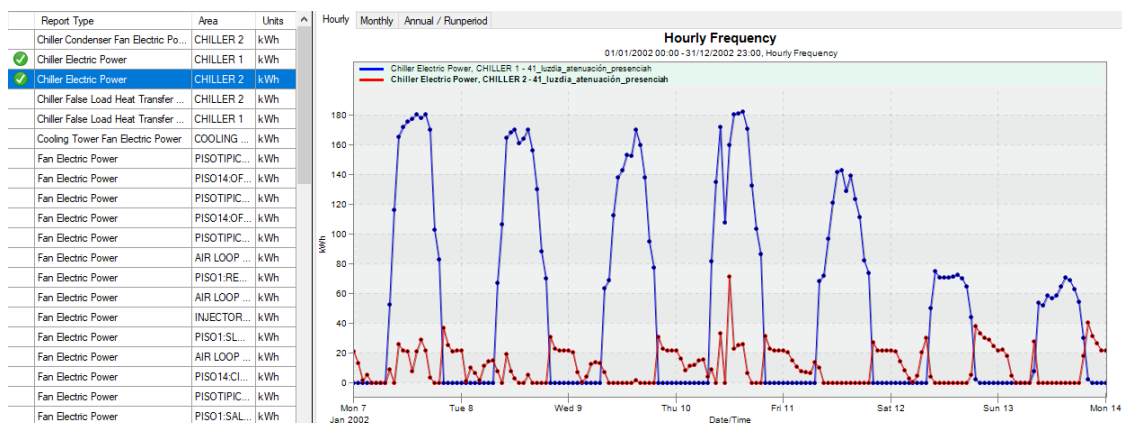
Recorrido solar y sombras para una simulación a las 6.00 p.m. el 1 de diciembre.



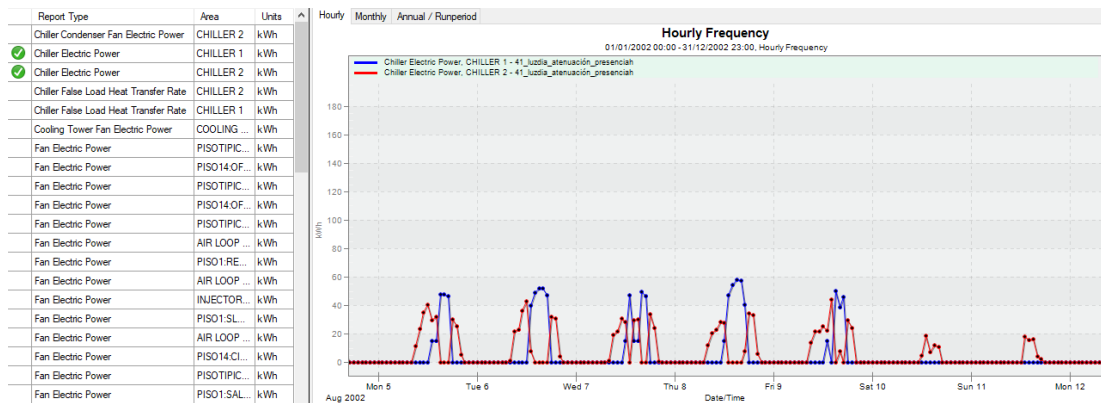
Consumo de electricidad mensual de cada chiller, el color azul representa al chiller de 300 Tons y el color rojo al chiller de 120 Tons.



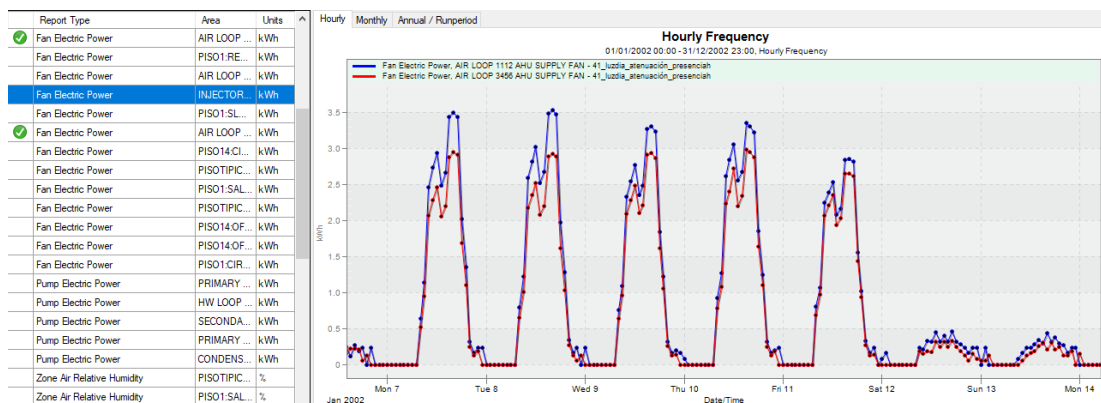
Consumo de electricidad por hora de cada chiller, el color azul representa al chiller de 300 Tons y el color rojo al chiller de 120 Tons, resultados mostrados en la segunda semana de enero.



Consumo de electricidad por hora de cada chiller, el color azul representa al chiller de 300 Tons y el color rojo al chiller de 120 Tons, resultados mostrados en la primera semana de agosto.

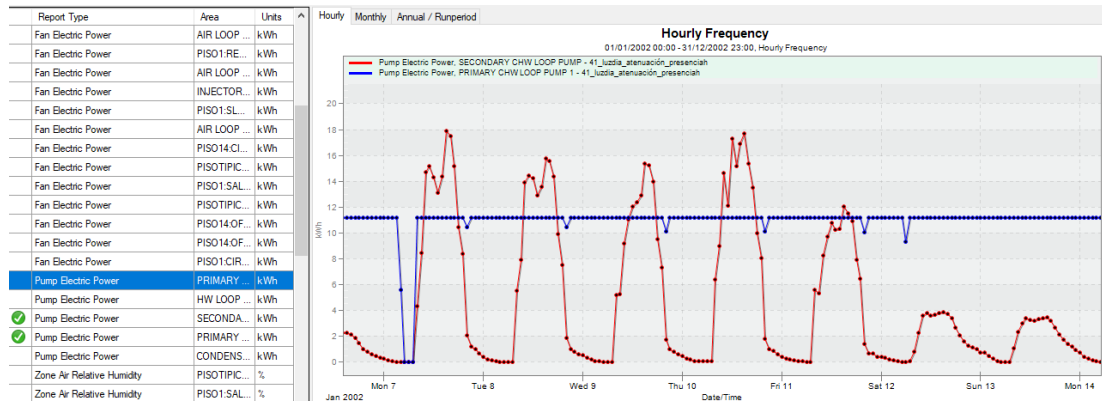


Consumo de electricidad por hora de los dos ventiladores comandados por variadores de frecuencia, resultados mostrados en la segunda semana de enero.

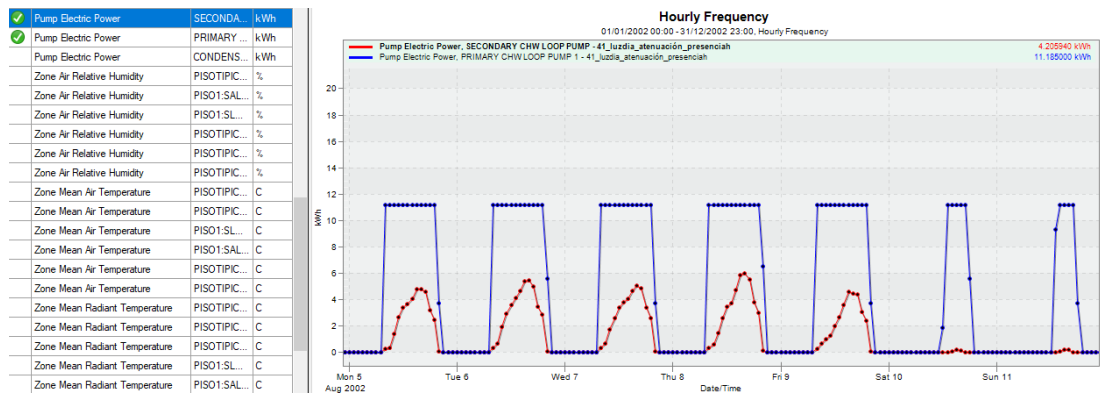


Consumo de electricidad por hora de las bombas primaria y secundaria asociada al chiller de 300 Tons, la bomba secundaria modula el flujo por ende su consumo tal como se aprecia en la siguiente imagen, el color azul representa a la bomba primaria de

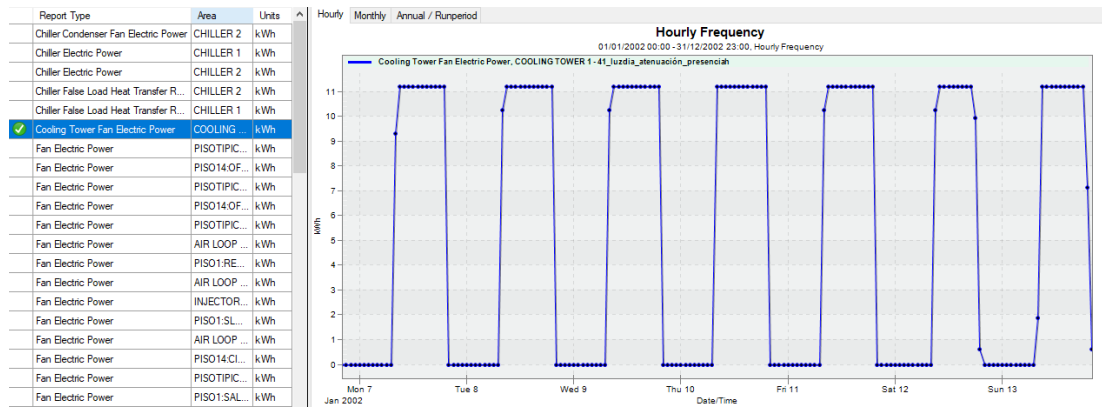
velocidad constante y el color rojo a la bomba secundaria, resultados mostrados en la segunda semana de enero.



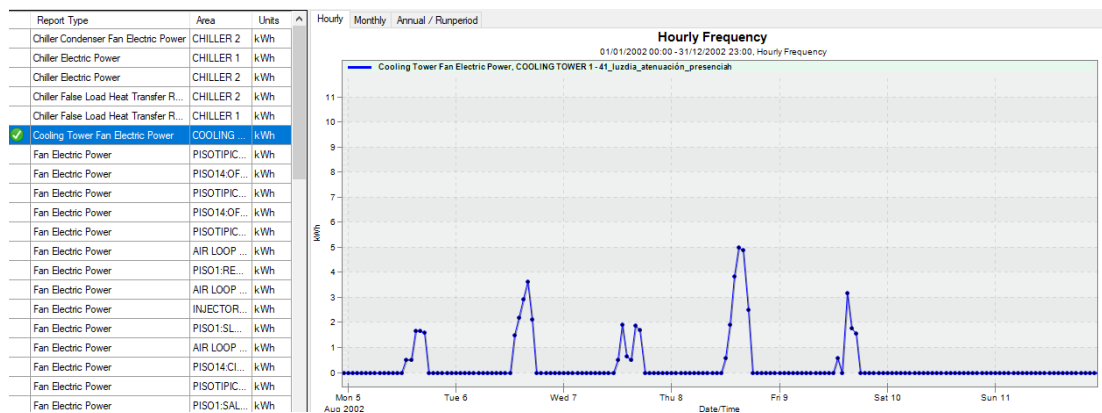
Consumo de electricidad por hora de las bombas primaria y secundaria asociada al chiller de 300 Tons , resultados mostrados en la primera semana de agosto.



Consumo de electricidad por hora del ventilador de la torre de enfriamiento, el cual tiene un variador de frecuencia, resultados mostrados en la segunda semana de enero.



Consumo de electricidad por hora del ventilador de la torre de enfriamiento, el cual tiene un variador de frecuencia, resultados mostrados en la primera semana de agosto.



ANEXO 3: CÓDIGO DE SIMULACIÓN DE CADA ESTRATEGIA DE CONTROL

En esta parte vamos a mostrar el código fuente de simulación de cada una de las estrategias de control, enfocándonos solamente en incluir la parte relacionada al control, ya que el código de simulación de todo el proyecto abarca más de 100 páginas. El formato mostrado es .txt el cual es leído por el programa Energy Plus versión 8.5.

1. Sistema De Control de Presión de agua de retorno de Chiller mediante bomba secundaria de velocidad variable:

```
Pump:VariableSpeed,  
  Secondary CHW Loop Pump, !- Name  
  CHW Loop Demand Side Inlet, !- Inlet Node Name  
  Secondary CHW Loop Pump Water Outlet Node, !- Outlet Node Name  
  0.06359, !- Design Maximum Flow Rate {m3/s}  
  269008.00, !- Design Pump Head {Pa}  
  22371, !- Design Power Consumption {W}  
  0.93, !- Motor Efficiency  
  0.00, !- Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream  
  0.0000, !- Coefficient 1 of the Part Load Performance Curve  
  1.0000, !- Coefficient 2 of the Part Load Performance Curve  
  0.0000, !- Coefficient 3 of the Part Load Performance Curve  
  0.0000, !- Coefficient 4 of the Part Load Performance Curve  
  0.000000, !- Design Minimum Flow Rate {m3/s}  
  Intermittent; !- Pump Control Type
```

2. Sistema de Control de Temperatura de agua de salida de torre de enfriamiento con ventilador de velocidad variable:

CoolingTower:TwoSpeed,
 Cooling Tower 1, !- Name
 Cooling Tower 1 Water Inlet Node, !- Water Inlet Node Name
 Cooling Tower 1 Water Outlet Node, !- Water Outlet Node Name
 autosize, !- Design Water Flow Rate {m3/s}
 autosize, !- High Fan Speed Air Flow Rate {m3/s}
 11185, !- High Fan Speed Fan Power {W}
 autosize, !- High Fan Speed U-Factor Times Area Value {W/K}
 autosize, !- Low Fan Speed Air Flow Rate {m3/s}
 0.5000, !- Low Fan Speed Air Flow Rate Sizing Factor
 1790, !- Low Fan Speed Fan Power {W}
 0.1600, !- Low Fan Speed Fan Power Sizing Factor
 autosize, !- Low Fan Speed U-Factor Times Area Value {W/K}
 0.6000, !- Low Fan Speed U-Factor Times Area Sizing Factor
 autosize, !- Free Convection Regime Air Flow Rate {m3/s}
 0.1000, !- Free Convection Regime Air Flow Rate Sizing Factor
 autosize, !- Free Convection Regime U-Factor Times Area Value {W/K}
 0.1000, !- Free Convection U-Factor Times Area Value Sizing Factor
 UFactorTimesAreaAndDesignWaterFlowRate!- Performance Input Method
 1.2500, !- Heat Rejection Capacity and Nominal Capacity Sizing Ratio
 100000, !- High Speed Nominal Capacity {W}
 autocalculate, !- Low Speed Nominal Capacity {W}
 0.5000, !- Low Speed Nominal Capacity Sizing Factor
 10000.0000, !- Free Convection Nominal Capacity {W}
 0.1000, !- Free Convection Nominal Capacity Sizing Factor
 0.00, !- Basin Heater Capacity {W/K}
 2.00, !- Basin Heater Setpoint Temperature {C}
 On 24/7, !- Basin Heater Operating Schedule Name
 SaturatedExit, !- Evaporation Loss Mode
 0.2000, !- Evaporation Loss Factor {percent/K}
 0, !- Drift Loss Percent {percent}
 ConcentrationRatio, !- Blowdown Calculation Mode
 3.00, !- Blowdown Concentration Ratio
 On 24/7, !- Blowdown Makeup Water Usage Schedule Name
 , !- Supply Water Storage Tank Name
 , !- Outdoor Air Inlet Node Name
 , !- Number of Cells
 MinimalCell, !- Cell Control
 0.3300, !- Cell Minimum Water Flow Rate Fraction
 2.5000, !- Cell Maximum Water Flow Rate Fraction
 1.00; !- Sizing Factor

SetpointManager:FollowOutdoorAirTemperature,

Condenser Loop 1 Setpoint Manager, !- Name
 Temperature, !- Control Variable
 OutdoorAirWetBulb, !- Reference Temperature Type
 0.00, !- Offset Temperature Difference {deltaC}
 29.44, !- Maximum Setpoint Temperature {C}
 21.11, !- Minimum Setpoint Temperature {C}
 Condenser Loop 1 Setpoint Manager Node List; !- Setpoint Node or
 NodeList Name

3. Sistema de Control de la demanda de ventilación mediante monitoreo de
 CO2:

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: FAN:VARIABLEVOLUME =====

Fan:VariableVolume,
 Air Loop 3456 AHU Supply Fan, !- Name
 Copy of 7:00 - 19:00 Mon - Fri, !- Availability Schedule Name
 0.70, !- Fan Total Efficiency
 1247.00, !- Pressure Rise {Pa}
 autosize, !- Maximum Flow Rate {m3/s}
 Fraction, !- Fan Power Minimum Flow Rate Input Method
 0.3000, !- Fan Power Minimum Flow Fraction
 0.000000, !- Fan Power Minimum Air Flow Rate {m3/s}
 0.90, !- Motor Efficiency
 1.00, !- Motor In Airstream Fraction
 0.0013000000, !- Fan Power Coefficient 1
 0.1470000000, !- Fan Power Coefficient 2
 0.9506000000, !- Fan Power Coefficient 3
 -0.0998000000, !- Fan Power Coefficient 4
 0.0000000000, !- Fan Power Coefficient 5
 Air Loop 3456 AHU Heating Coil Air Outlet Node, !- Air Inlet Node Name
 Air Loop 3456 Supply Side Outlet 1, !- Air Outlet Node Name
 General; !- End-Use Subcategory

Fan:VariableVolume,
 Air Loop 1112 AHU Supply Fan, !- Name
 Copy of 7:00 - 19:00 Mon - Fri, !- Availability Schedule Name
 0.70, !- Fan Total Efficiency
 1267.00, !- Pressure Rise {Pa}
 autosize, !- Maximum Flow Rate {m3/s}
 Fraction, !- Fan Power Minimum Flow Rate Input Method
 0.3000, !- Fan Power Minimum Flow Fraction
 0.000000, !- Fan Power Minimum Air Flow Rate {m3/s}
 0.90, !- Motor Efficiency

1.00, !- Motor In Airstream Fraction
0.0013000000, !- Fan Power Coefficient 1
0.1470000000, !- Fan Power Coefficient 2
0.9506000000, !- Fan Power Coefficient 3
-0.0998000000, !- Fan Power Coefficient 4
0.0000000000, !- Fan Power Coefficient 5
Air Loop 1112 AHU Heating Coil Air Outlet Node, !- Air Inlet Node Name
Air Loop 1112 Supply Side Outlet 1, !- Air Outlet Node Name
General; !- End-Use Subcategory

!=ALL OBJECTS IN CLASS:
CONTROLLER:MECHANICALVENTILATION =

Controller:MechanicalVentilation,
 Air Loop 3456 AHU Mechanical Ventilation Controller, !- Name
 On, !- Availability Schedule Name
 Yes, !- Demand Controlled Ventilation
 IndoorAirQualityProcedure, !- System Outdoor Air Method
 1.00, !- Zone Maximum Outdoor Air Fraction {dimensionless}
 Piso1:SalaDeReuniones, !- Zone 1 Name
 Piso1:SalaDeReuniones Design Specification Outdoor Air Object, !- Design
 Specification Outdoor Air Object Name 1
 Piso1:SalaDeReuniones Design Specification Zone Air Distribution
 Object; !- Design Specification Zone Air Distribution Object Name 1

Controller:MechanicalVentilation,
 Air Loop 1112 AHU Mechanical Ventilation Controller, !- Name
 On, !- Availability Schedule Name
 Yes, !- Demand Controlled Ventilation
 IndoorAirQualityProced, !- System Outdoor Air Method
 1.00, !- Zone Maximum Outdoor Air Fraction {dimensionless}
 Piso1:SIDCpctcnUssMltpls,!- Zone 1 Name
 Piso1:SIDCpctcnUssMltpls Design Specification Outdoor Air Object, !-
 Design Specification Outdoor Air Object Name 1
 Piso1:SIDCpctcnUssMltpls Design Specification Zone Air Distribution
 Object; !- Design Specification Zone Air Distribution Object Name 1

!=ALL OBJECTS IN CLASS:
ZONECONTROL:CONTAMINANTCONTROLLER

ZoneControl:ContaminantController,
 Piso1:SalaDeReuniones Contaminant Controller, !- Name
 Piso1:SalaDeReuniones, !- Controlled Zone Name
 On 24/7, !- Carbon Dioxide Control Availability Schedule Name
 Zone CO2 setpoint: Always 900ppm, !- Carbon Dioxide Setpoint Schedule
 Name

Min CO2 concentration: Always 600ppm; !- Minimum Carbon Dioxide Concentration Schedule Name

ZoneControl:ContaminantController,
Piso1:SIDCpctcnUssMltpls Contaminant Controller, !- Name
Piso1:SIDCpctcnUssMltpls,!- Controlled Zone Name
On 24/7, !- Carbon Dioxide Control Availability Schedule Name
Zone CO2 setpoint: Always 900ppm, !- Carbon Dioxide Setpoint Schedule Name
Min CO2 concentration: Always 600ppm; !- Minimum Carbon Dioxide Concentration Schedule Name

4. Optimización de la secuencia de operación del chiller:

!=CLASS: PLANTEQUIPMENTOPERATION:COOLINGLOAD=

PlantEquipmentOperation:CoolingLoad,
CHW Loop Scheme 1, !- Name
0.00, !- Load Range 1 Lower Limit {W}
=\$App1, !- Load Range 1 Upper Limit {W}
CHW Loop Scheme 1 Range 1 Equipment List, !- Range 1 Equipment List Name
=\$App1, !- Load Range 2 Lower Limit {W}
1969437.00, !- Load Range 2 Upper Limit {W}
CHW Loop Scheme 1 Range 2 Equipment List; !- Range 2 Equipment List Name

!- = ALL OBJECTS IN CLASS: PARAMETRIC:SETVALUEFORRUN ==

Parametric:SetValueForRun,
\$App1, !- Name
211011, !- Value for Run 1
228595, !- Value for Run 2
246179, !- Value for Run 3
263764, !- Value for Run 4
281348, !- Value for Run 5
298932, !- Value for Run 6
316516, !- Value for Run 7
334101, !- Value for Run 8
351685, !- Value for Run 9
369269, !- Value for Run 10
386853, !- Value for Run 11
404438, !- Value for Run 12
422022; !- Value for Run 13

5. Control de iluminación perimetral mediante sensors de luz-día:

!-==== ALL OBJECTS IN CLASS: DAYLIGHTING:CONTROLS =====

Daylighting:Controls,

PisoTipico:OficinaPerimetral2, !- Zone Name

1, !- Total Daylighting Reference Points

49.737, !- X-Coordinate of First Reference Point {m}

-7.341, !- Y-Coordinate of First Reference Point {m}

3.8, !- Z-Coordinate of First Reference Point {m}

52.237, !- X-Coordinate of Second Reference Point {m}

-7.341, !- Y-Coordinate of Second Reference Point {m}

3.8, !- Z-Coordinate of Second Reference Point {m}

1, !- Fraction of Zone Controlled by First Reference Point

0, !- Fraction of Zone Controlled by Second Reference Point

600, !- Illuminance Setpoint at First Reference Point {lux}

500, !- Illuminance Setpoint at Second Reference Point {lux}

3, !- Lighting Control Type

0, !- Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction

Clockwise from Zone y-Axis {deg}

22, !- Maximum Allowable Discomfort Glare Index

, !- Minimum Input Power Fraction for Continuous Dimming Control

, !- Minimum Light Output Fraction for Continuous Dimming Control

, !- Number of Stepped Control Steps

1; !- Probability Lighting will be Reset When Needed in Manual

Stepped Control

Daylighting:Controls,

PisoTipico:OficinaPerimetral1, !- Zone Name

1, !- Total Daylighting Reference Points

32.269, !- X-Coordinate of First Reference Point {m}

-9.691, !- Y-Coordinate of First Reference Point {m}

3.8, !- Z-Coordinate of First Reference Point {m}

32.269, !- X-Coordinate of Second Reference Point {m}

-12.191, !- Y-Coordinate of Second Reference Point {m}

3.8, !- Z-Coordinate of Second Reference Point {m}

1, !- Fraction of Zone Controlled by First Reference Point

0, !- Fraction of Zone Controlled by Second Reference Point

600, !- Illuminance Setpoint at First Reference Point {lux}

500, !- Illuminance Setpoint at Second Reference Point {lux}

3, !- Lighting Control Type

0, !- Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction

Clockwise from Zone y-Axis {deg}

22, !- Maximum Allowable Discomfort Glare Index

, !- Minimum Input Power Fraction for Continuous Dimming Control

, !- Minimum Light Output Fraction for Continuous Dimming Control

, !- Number of Stepped Control Steps

1; !- Probability Lighting will be Reset When Needed in Manual Stepped Control

Daylighting:Controls,

PisoTipico:OficinaPerimetral, !- Zone Name

1, !- Total Daylighting Reference Points

11.296, !- X-Coordinate of First Reference Point {m}

-7.591, !- Y-Coordinate of First Reference Point {m}

3.8, !- Z-Coordinate of First Reference Point {m}

8.796, !- X-Coordinate of Second Reference Point {m}

-7.591, !- Y-Coordinate of Second Reference Point {m}

3.8, !- Z-Coordinate of Second Reference Point {m}

1, !- Fraction of Zone Controlled by First Reference Point

0, !- Fraction of Zone Controlled by Second Reference Point

600, !- Illuminance Setpoint at First Reference Point {lux}

500, !- Illuminance Setpoint at Second Reference Point {lux}

3, !- Lighting Control Type

0, !- Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction
Clockwise from Zone y-Axis {deg}

22, !- Maximum Allowable Discomfort Glare Index

, !- Minimum Input Power Fraction for Continuous Dimming Control

, !- Minimum Light Output Fraction for Continuous Dimming Control

, !- Number of Stepped Control Steps

1; !- Probability Lighting will be Reset When Needed in Manual Stepped Control

ANEXO 4: DIAGRAMA DE CONEXIONES DE CONTROLADORES Y EQUIPOS DE CAMPO

Diagrama de conexiones del Sensor CO2 DPW502000 de Carel

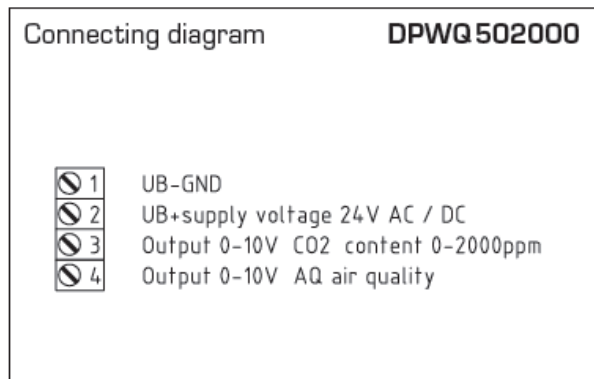
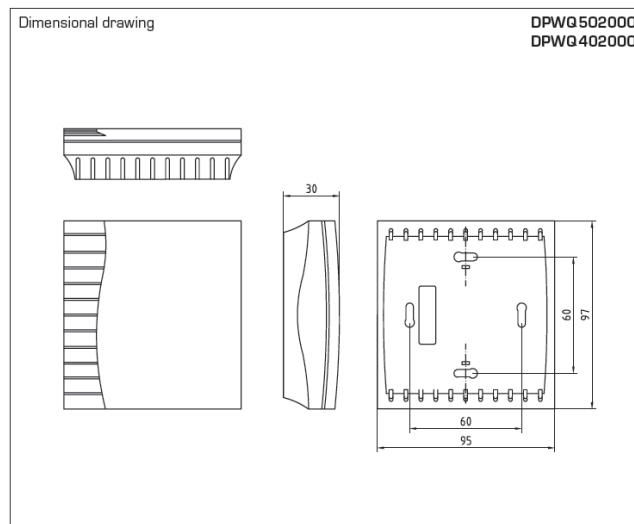


Diagrama de conexiones del sensor de temperatura PT100 030220655 de Carel

Storage conditions	-50T250 °C
Operating range elemento sensible	PT100000A1: -50 °C...+250 °C PT100000A2: 0 °C...+400 °C
Sensor	Pt100 Class B in accordance with DIN IEC751, 3 wire
Precision	+/- class B=(0,005xt)+0,3, a 100°C = ±0,8°C
Connections aliment. e uscita	Stripped ends, dimensions 6±1mm
Cable	PT100000A1: silicone rubber HALOGEN COMPOUNDS ≤ 1.1 x 10 ⁻³ mg/g PT100000A2: 3x0.5 mm ² fibreglass wire and secondary insulation
Dissipation factor (in air)	0,3 K/mW at 0 °C
Thermal constant over time (in air)	ca./approx 20 s
Category of resistance to heat and fire	Range -20 °C +200°C for PT100000A1, +500 °C for PT100000A2
Insulation resistance	>500 Mohm / 250 V
Dielectric strength	250 Vac (code PT100000A1 only) not applicabile for PT100000A2
Primary insulation (porbe and cable)	250 Vac
Sensitive element index of protection	IP65
Sensitive element housing	AISI 316 stainless steel

Tab. 6.a



Fig. 6.a

* = see table of product codes in price list

** = 3-wires cable compensates for the resistance introduced by the cable

Wiring:



Note: the three-wire connection for the Pt100 must be used when the controller is fitted accordingly. If not, the ends are to be connected together on the same terminal.

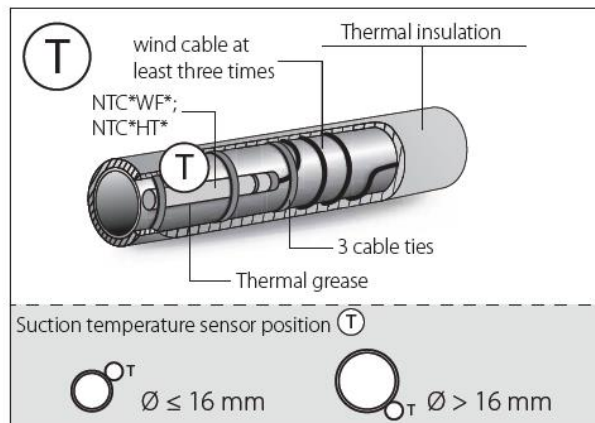
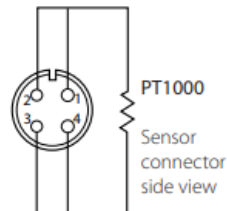


Diagrama de conexiones del transmisor de presión de agua SPK250000

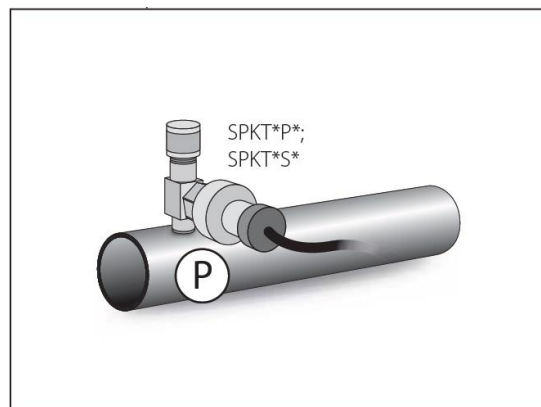
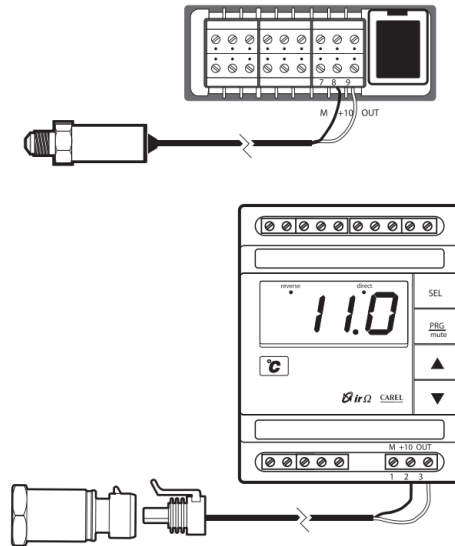


Diagrama de conexiones del transmisor de velocidad de aire EE65

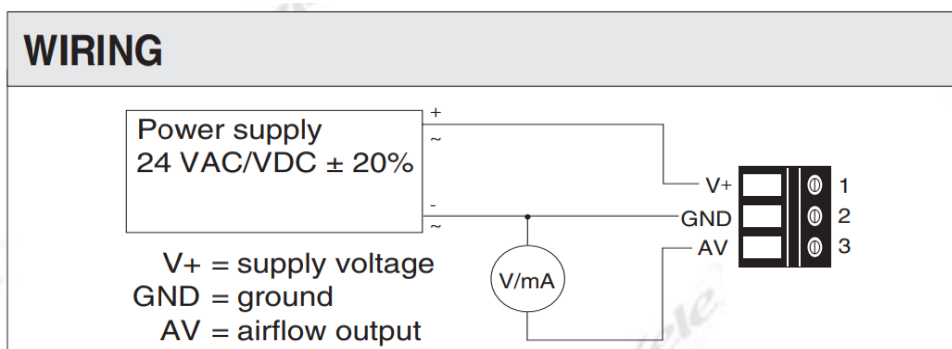
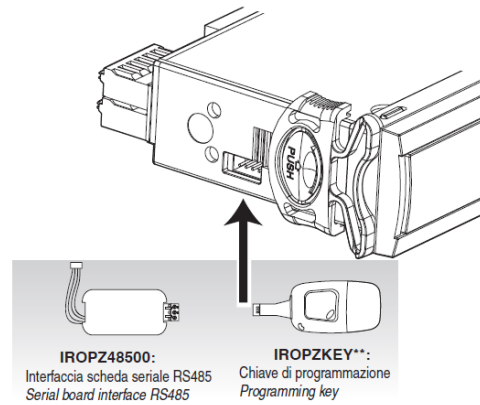
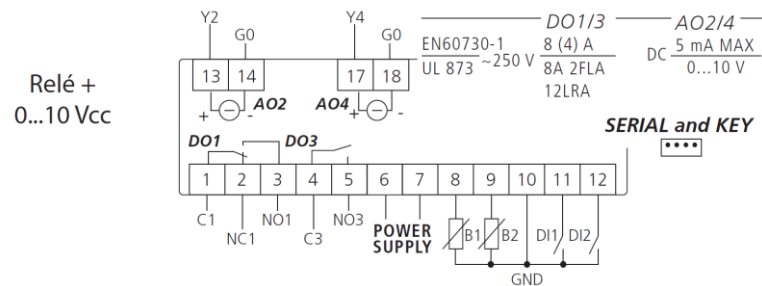


Diagrama de conexiones del Controlador IR33E7LR20 Universal de Carel:

Entradas universales



IR33E7HR20 / IR33E7HB20 / IR33E7LR20



Leyenda

POWER SUPPLY	Alimentación eléctrica
DO1/DO2/DO3/DO4	Salida digital 1/2/3/4 (relés 1/2/3/4)
AO1/AO2/AO3/AO4	Salida PWM para la maniobra de relés de estado sólido (SSR) externos o salida analógica 0...10 Vcc
G0	Referencia de salida PWM o analógica 0...10 Vcc
Y1/Y2/Y3/Y4	Señal de salida PWM o analógica 0...10 Vcc
C/NC/NO	Común/Normalmente Cerrado/Normalmente Abierto (salida de relé)
B1/B2	Sonda 1/Sonda 2
DI1/DI2	Entrada digital 1/Entrada digital 2

2.5 Conexión de sondas IR33/DN33 Universal de entradas universal

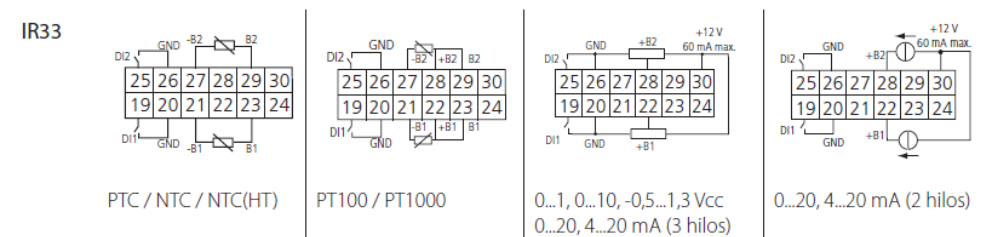
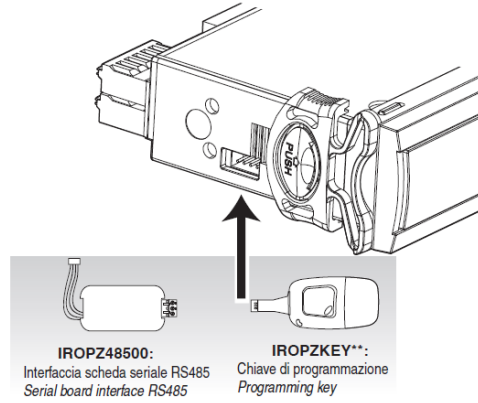
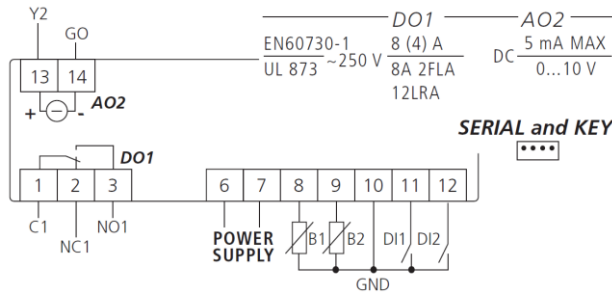


Diagrama de conexiones del Controlador IR33B7HR20 Universal de Carel:

Entradas universales



IR33B7HR20 / IR33B7HB20 / IR33B7LR20



Leyenda

POWER SUPPLY	Alimentación eléctrica
DO1/DO2/DO3/DO4	Salida digital 1/2/3/4 (relés 1/2/3/4)
AO1/AO2/AO3/AO4	Salida PWM para la maniobra de relés de estado sólido (SSR) externos o salida analógica 0...10 Vcc
GO	Referencia de salida PWM o analógica 0...10 Vcc
Y1/Y2/Y3/Y4	Señal de salida PWM o analógica 0...10 Vcc
C/NC/NO	Común/Normalmente Cerrado/Normalmente Abierto (salida de relé)
B1/B2	Sonda 1/Sonda 2
DI1/DI2	Entrada digital 1/ Entrada digital 2

2.5 Conexión de sondas IR33/DN33 Universal de entradas universal

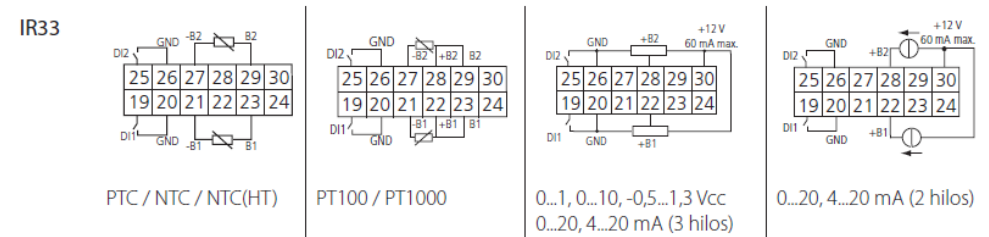


Diagrama de conexiones del Variador de frecuencia VLT HVAC Basic Drive de Danfoss

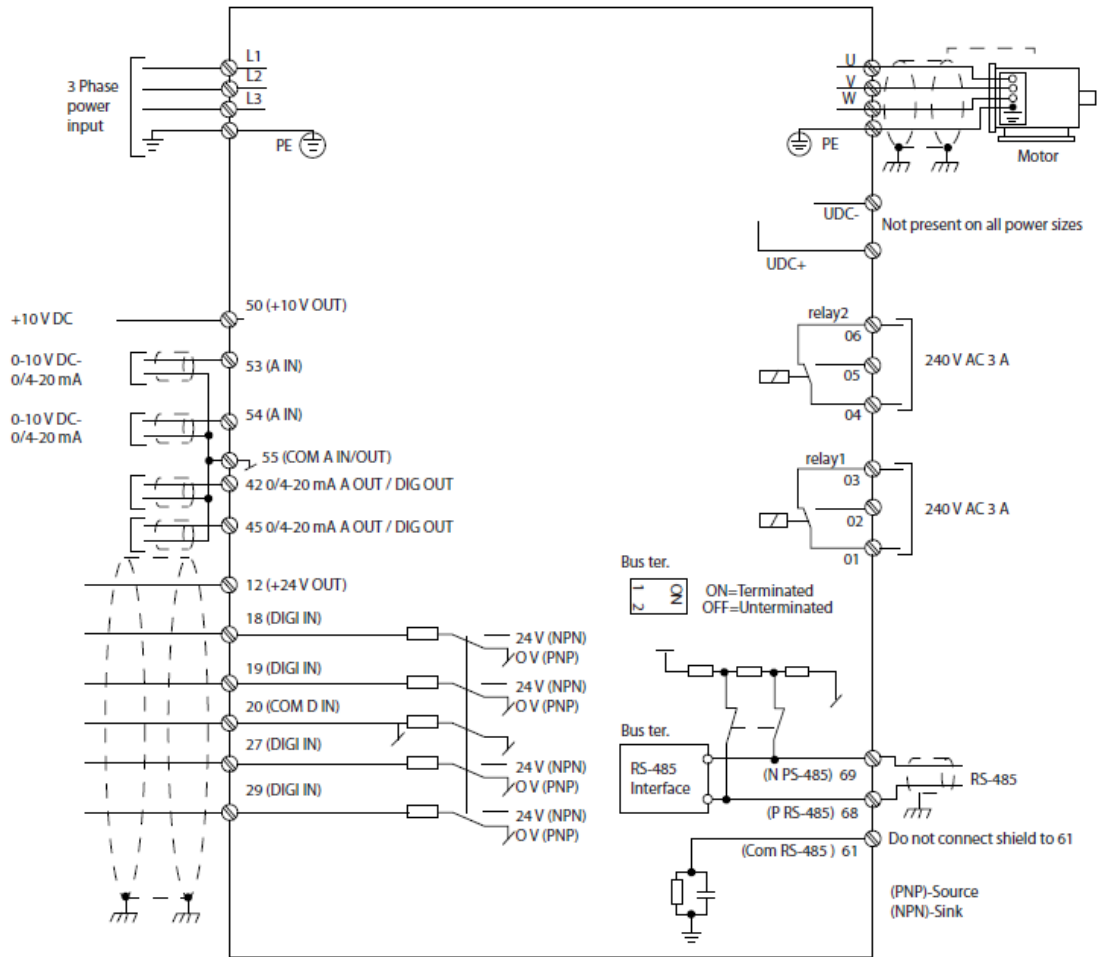


Illustration 5.1 Basic Wiring Schematic Drawing

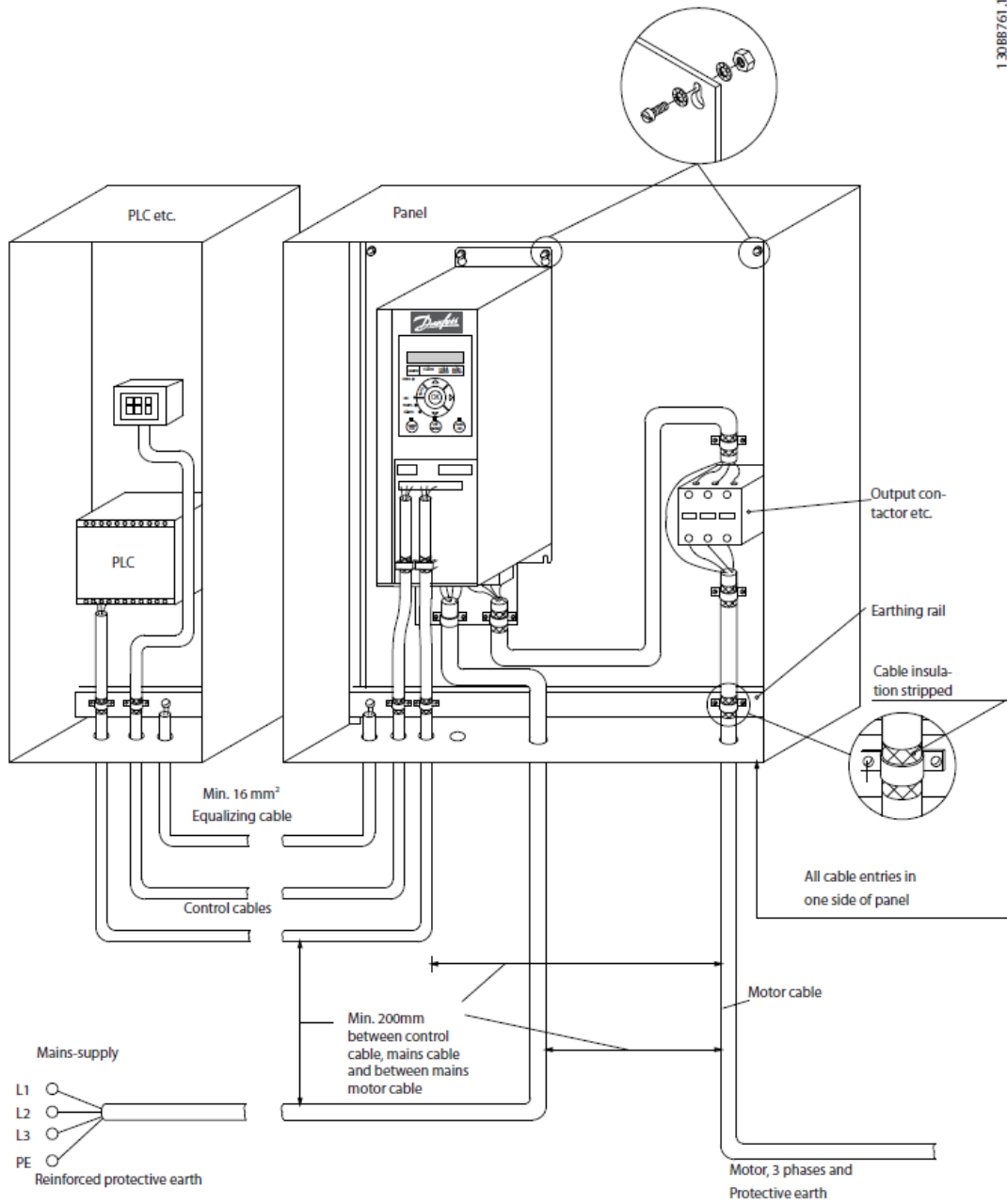


Illustration 5.20 EMC-correct Electrical Installation

Conexiones del controlador pChrono

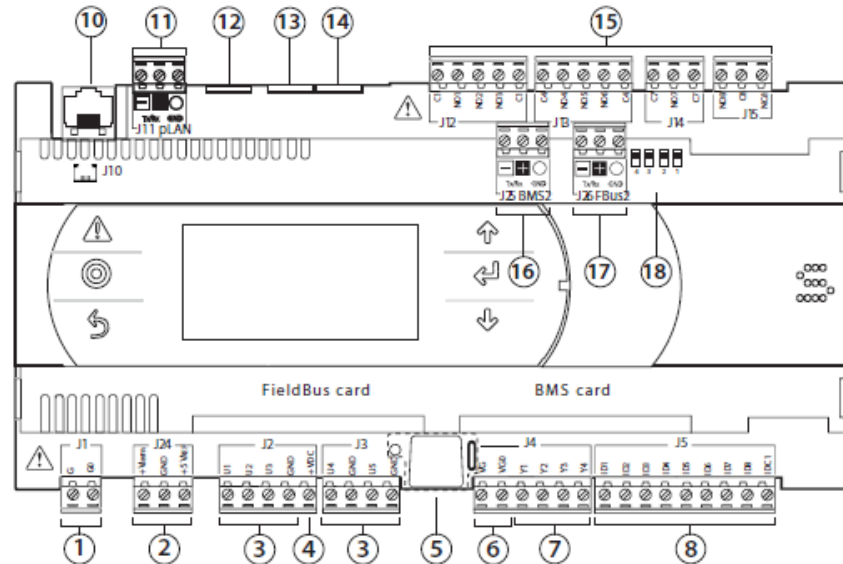


Fig. 9.a

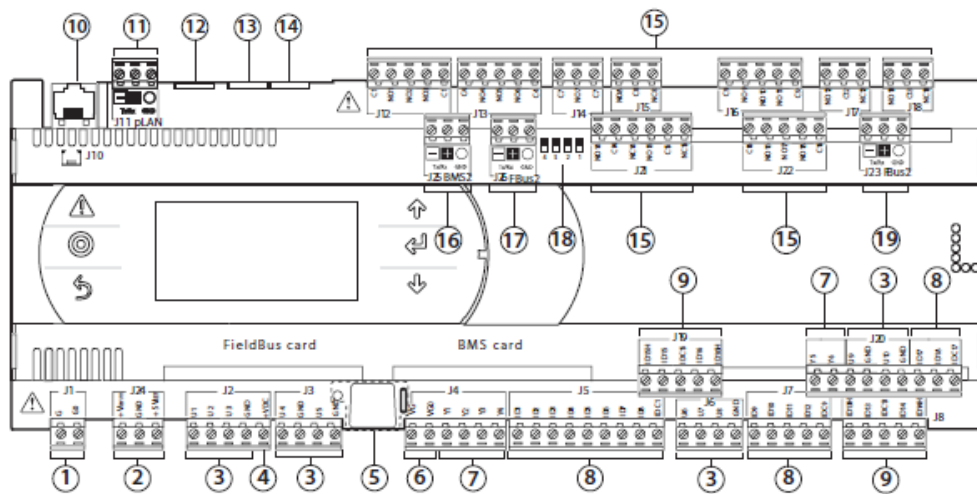


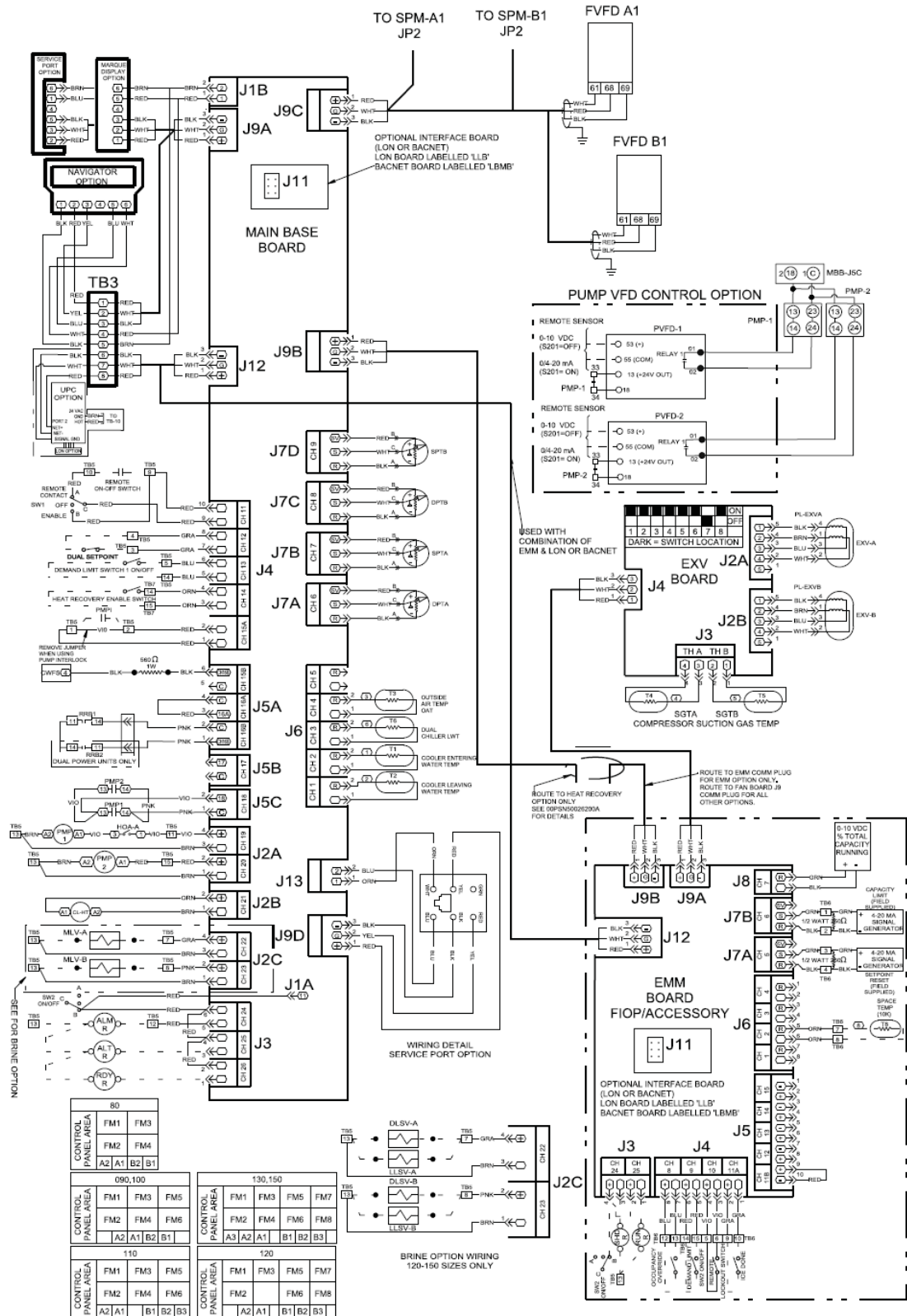
Fig. 9.b

Ref.	Description
1	Power supply connector (G(+), G0(-))
2	+Vterm: power supply for additional terminal +5 VREF power supply for ratiometric probes
3	Universal inputs/outputs
4	+VDC: power supply for active probes
5	Button for setting pLAN address, secondary display, LEDs
6	VG: power supply at voltage A (*) for opto-isolated analogue output VG0: power for optically-isolated analogue output, 0 Vac/Vdc
7	Analogue outputs
8	ID: digital inputs at voltage A (*)
9	ID.: digital inputs at voltage A (*) IDH.: digital inputs at voltage B (**)
10	pLAN telephone connector for terminal/downloading application

(*) Voltage A: 24 Vac or 28 to 36 Vdc; (**) Voltage B: 230 Vac - 50/60 Hz.

Ref.	Description
11	pLAN plug-in connector
12	Reserved
13	Reserved
14	Reserved
15	Relay digital outputs
16	BMS2 port
17	FieldBus2 port
18	Jumpers, leave at ON position
19	Not used

Control esquemático del Chiller 30RB120:



→ Fig. 42 — Control Schematic, 30RB080-150 with HEVCF Option

Panel de Control para Chiller enfriado por agua 19 XRV

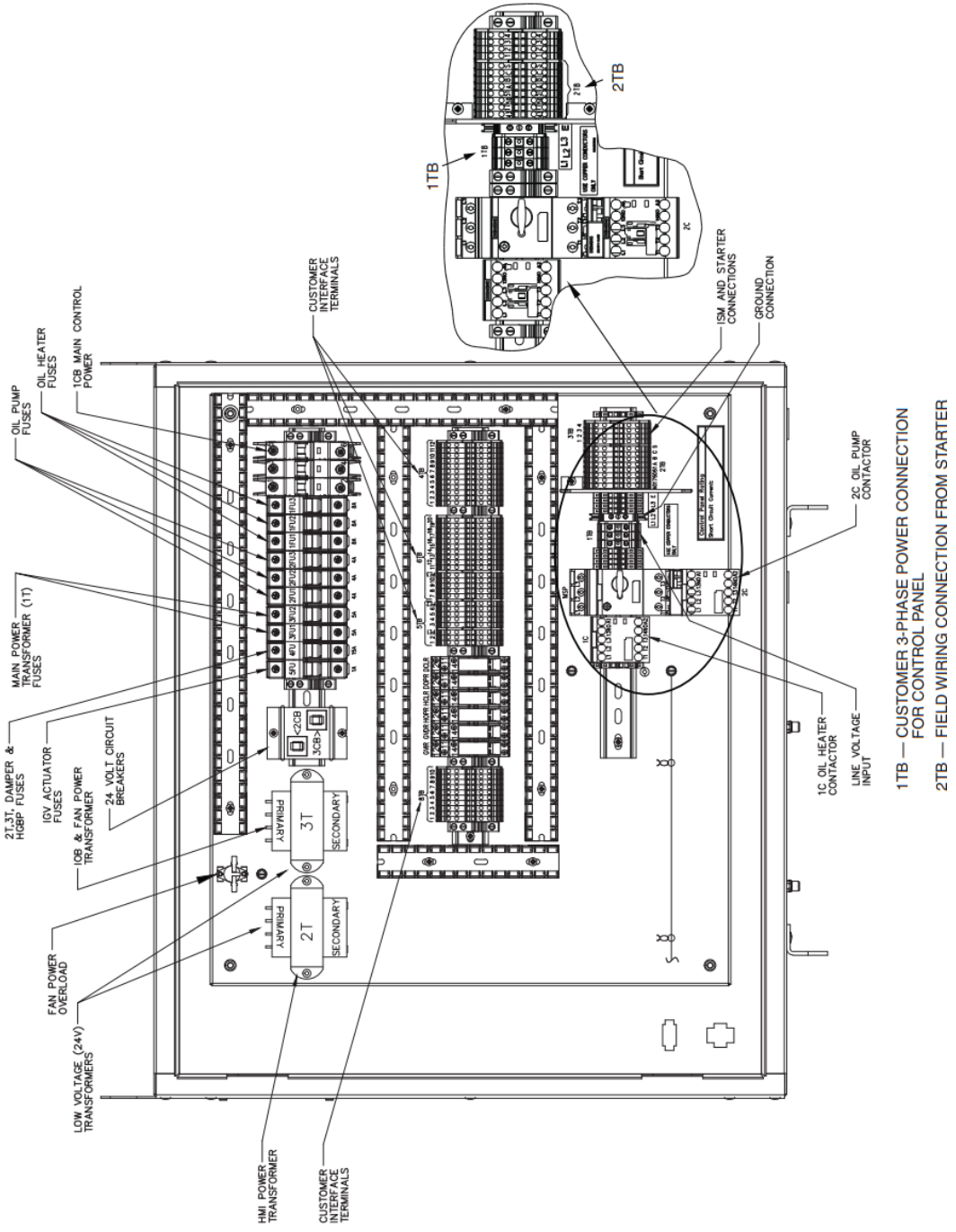
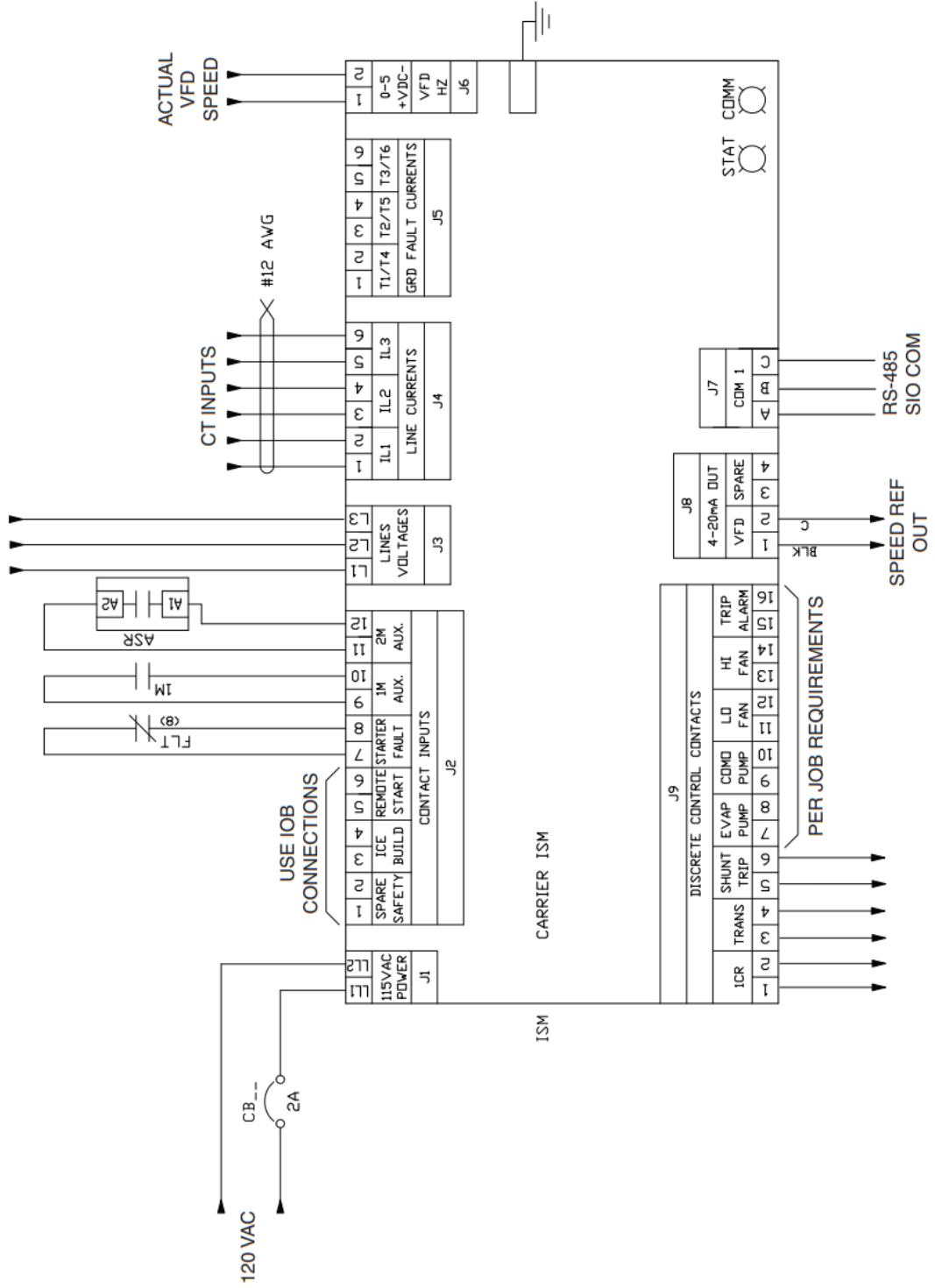
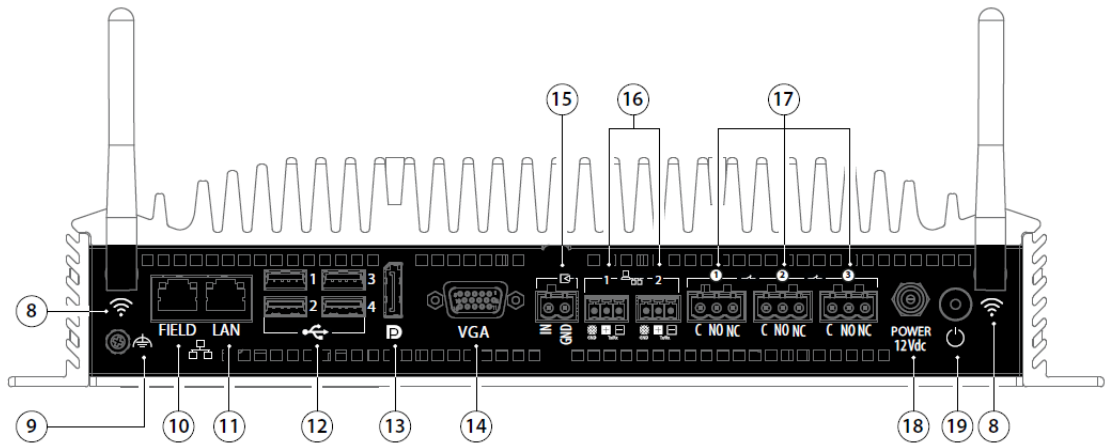


Diagrama de conexión para el Chiller enfriado por agua 19 XRV



Conexiones del controlador principal Boss BMHST00XS0



Key

- | | |
|-----|----------------------------|
| 1. | ON/OFF status LED |
| 2. | Alarm status LED |
| 3. | Digital input status LED |
| 4. | RS485 status LED (1, 2) |
| 5. | relay status LED (1, 2, 3) |
| 6. | μSD port |
| 7. | USB ports (1, 2) |
| 8. | Two antennas |
| 9. | Earth |
| 10. | FIELD Ethernet |
| 11. | LAN Ethernet |
| 12. | USB ports (1, 2, 3, 4) |
| 13. | Display port |
| 14. | VGA port |
| 15. | Digital inputs |
| 16. | RS485 line (1, 2) |
| 17. | Relay outputs (1, 2, 3) |
| 18. | Power supply |
| 19. | ON/OFF button |