

Diseño de un sistema free-cooling para el laboratorio CADD SEDE Robledo

Isaías Córdoba Rodríguez
Ingeniería Electromecánica

MSc. Jorge Andrés Sierra Del Rio

MSc. Luis Fernando Grisales Noreña.

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2019

RESUMEN

Debido a la cantidad de equipos que se encuentran en el laboratorio de modelado F203 y a los requerimientos técnicos referente a las condiciones de operación de estos equipos, se requiere un sistema de acondicionamiento de aire permanente, que garantice temperaturas de operación de 22°C aproximadamente, esto implica un alto consumo energético para el sistema de acondicionamiento de aire debido a la cantidad de equipos, el volumen del cuarto a refrigerar y el tiempo de funcionamiento. Sabiendo que las condiciones ambientales externas durante la noche y en la madrugada son favorables para el proceso de acondicionamiento de aire de la sala, se planteó el interrogante de cómo disminuir el consumo energético para esta sala en particular. Por lo cual este proyecto de investigación busca disminuir la operación del sistema de aire acondicionado del laboratorio CADD SEDE Robledo y su consumo energético, con un sistema de control que monitorea las variables de temperatura y humedad en el interior y exterior de la sala, utilizando actuadores para censar perturbaciones en el ambiente tales como lluvias muy fuertes, filtraciones de agua en el sistema, exceso de humedad, etc.

Inicialmente se analizó la carga térmica del laboratorio CADD SEDE Robledo con varios puntos de medición para obtener la tasa de producción de calor del laboratorio, también se caracterizó el equipo de refrigeración existente, para la posterior integración del sistema free-cooling con dicho equipo y un sistema de compuertas adecuado según el diseño y análisis obtenido con los datos del laboratorio CADD SEDE Robledo. Finalmente se determinó el ahorro energético logrado al momento de evaluar el impacto del sistema free-cooling en laboratorio CADD SEDE Robledo

Palabras clave: Free cooling, eficiencia energética, aire acondicionado.

RECONOCIMIENTOS

A los asesores Luis Fernando Grisales Noreña y Jorge Andrés Sierra Del Rio, a todos los docentes que contribuyeron con mi formación universitaria por el aporte de conocimientos y la asesoría constante para el desarrollo del presente trabajo, también a la empresa SIMAC S.A.S por sus aportes teórico prácticos en el tiempo que labore con ellos); por su ayuda en el cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado por su disposición y apoyo para que se ejecutara; por ultimo agradezco a mi familia la cual siempre me ha brindado los medios necesarios para salir adelante y culminar mis objetivos.

ACRÓNIMOS

UMA: Unidad Manejadora

PLC: Controlador lógico programable

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 119 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 121 |
| 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO | 46 |
| REFERENCIAS | 49 |
| APÉNDICE..... | 50 |

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los equipos de refrigeración son los responsables de un alto porcentaje del consumo de energía eléctrica dentro de las edificaciones terciarias, por lo cual se requieren implementar estrategias que permitan reducir su consumo, y de esta manera impactar de manera positiva los costos asociados a la operación de este tipo de edificaciones. Este es el caso del laboratorio de modelado del instituto tecnológico metropolitano de Medellín, el cual requiere para su operación un alto número de equipos de cómputo, los cuales por requerimientos del fabricante debe mantener una temperatura de 22 °C aproximadamente, para una correcta operación de estos. Lo cual implica el funcionamiento continuo del sistema de acondicionamiento de aire existente en la sala, generando el desgaste prematuro del equipo y un alto consumo energético del sistema. El incremento de la implementación de aires acondicionados para controlar la temperatura en centros de datos, bodegas farmacéuticas, equipos de cómputo, etc. con largos tiempos de operación y alto consumo energético, incentiva la búsqueda de soluciones amigables con el medio ambiente. Con el propósito de bajar los costos de operación de los equipos de aire acondicionado, se propone intervenir el funcionamiento del sistema de acondicionamiento de aire existente en el laboratorio de modelado a través de un sistema de free-cooling para aprovechar las condiciones del medio ambiente y hacer que los equipos disminuyan su tiempo de operación. Siendo esto posible cuando las circunstancias del ambiente son favorables para ser forzado a refrigerar, y así aprovechar el recurso que nos brinda el ambiente. Para cumplir lo planteado anteriormente son propuestos los siguientes objetivos:

Objetivo General

Diseñar un sistema free-cooling para el laboratorio de modelado CADD SEDE Robledo.

Objetivos específicos

- Determinar la carga térmica del laboratorio de modelado CADD SEDE Robledo.
- Caracterizar el sistema de refrigeración actual.
- Realizar la integración del sistema free-cooling al equipo existente.
- Determinar el ahorro energético con la solución planteada.

Este trabajo se encuentra organizado en 5 secciones. En la sección 2 se realiza la presentación del marco teórico en la cual explicados los diferentes elementos que componen un sistema de acondicionamiento de aire y sus diferentes tipos. En la sección 3 se establece la metodología usada para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos del proyecto; los resultados se encuentran en la sección 4, en la cual se determinó la carga térmica del laboratorio de modelado CADD, se obtuvo la caracterización del sistema de refrigeración actual y la determinación del ahorro energético con el sistema free cooling en uso. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

En la actualidad existen desarrollos en varios campos sobre free-cooling, todos buscando la disminución del consumo energético, el cual se aplica en sistemas de refrigeración de grandes superficies comerciales, laboratorios de investigación, salas de computación, edificios de oficinas centros de datos, entre otros; aprovechando el enfriamiento que nos brinda la naturaleza. A continuación, se muestran diferentes estudios realizados con free-cooling.

Udagawa, et al. (2010) presentan un estudio realizado en Japón en centros de almacenamiento de datos con sistemas de refrigeración utilizando free-cooling para las condiciones especificadas en la Tabla 1. Los autores encuentran que la refrigeración con una torre de enfriamiento requiere más espacio y tiene más costo en el consumo eléctrico que la refrigeración con aire acondicionado implementando free cooling, todo esto basado en sus estudios y pruebas con el aire acondicionado. Tal como se muestra en la Ilustración 1.

Tabla 1: Condiciones de simulación. Fuente: Udagawa et al. (2010).

| Ítem | Condición |
|---|--|
| Densidad de calentamiento | 4kW/Rack 1,680W/m ² |
| Bastidores | 210 bastidores (ancho de bastidor = 700 mm) |
| Tamaño del equipo sala de | zona 1 500m ² |
| Altura del piso, altura del suelo elevada | Altura del suelo: 5.000mm Altura efectiva bajo suelo elevado: 550mm |
| Condición del cuarto | 27 °C, 40% RH |
| Temperatura del agua fría | 12 C° |
| Pisos al tejado | 10 pisos |

Como resultado de sus estudios se obtiene el ahorro energético a partir del aprovechamiento de aire exterior, para los sistemas de aire acondicionado, entrando este aire cuando las condiciones del ambiente son las apropiadas, para obtener la refrigeración deseada de los centros de datos. El sistema implementado por los japoneses es más eficiente en lugares donde las temperaturas del ambiente son bajas gran parte del año. El estudio concluye que enfriando los centros de datos con el sistema free-cooling y

aprovechando la baja temperatura exterior, se reduce la intervención del sistema de aire acondicionado y en condiciones de ambiente favorables se apaga, enfriando el centro de datos con el aire del ambiente exterior. Generando reducción en el consumo energético de la planta.

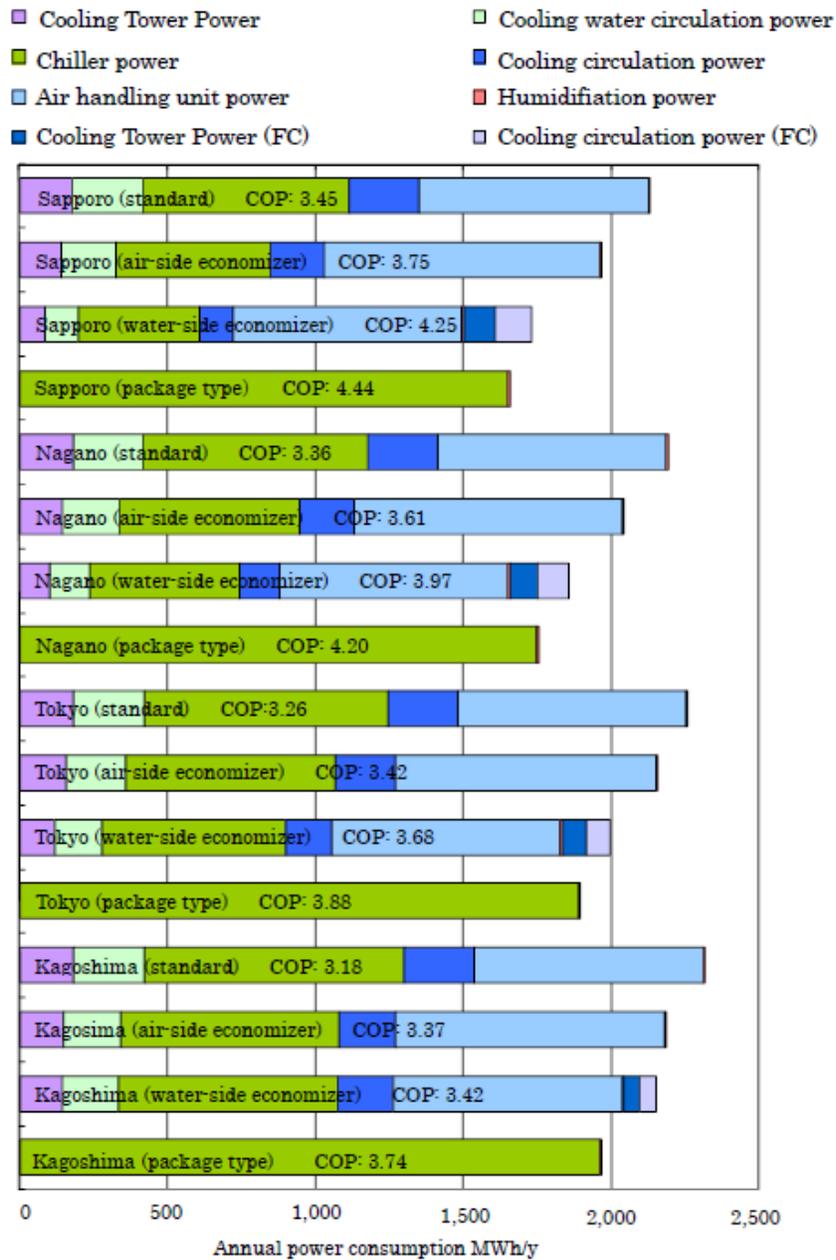


Ilustración 1: Consumo energético en ciudades de Japón con diferentes sistemas de refrigeración. Fuente: Udagawa et al. (2010).

Okitsu. (2012) en su estudio implementa rejillas para la refrigeración con aprovechamiento del ambiente exterior, estas rejillas son utilizadas en Malasia para el free-cooling, debido a

que no se puede aprovechar el aire del ambiente todo el tiempo permitiendo la entrada y salida del aire del ambiente, solo si las condiciones son apropiadas para el sistema. Del estudio se encuentra que se puede utilizar free-cooling alrededor de 5 horas cuando la temperatura está por debajo de 28 grados centígrados y que la mayor utilidad de este sistema se presenta en países tropicales.

Abimannan, S. (2011,). Analiza y concluye que en los centros de datos la tasa de producción de calor se incrementa cada dos años, por lo tanto, la importancia de la refrigeración. Debido a este incremento aumenta el costo energético de la refrigeración, por lo tanto, se plantea un sistema de enfriamiento primario utilizando agua y aire, en el cual se aprovecha el aire del ambiente para la refrigeración de centros de datos, forzando el aire del ambiente a entrar y refrigerar el lugar cuando el clima exterior es adecuado. Con estos sistemas se realizaron una serie de pruebas en Chicago, Atlanta y Phoenix, dando como resultado un ahorro energético de 50 %, 76 % y 79% respectivamente; lo cual evidencia un ahorro energético respecto al sistema convencional

Las compañías de telecomunicaciones se ven cada vez más presionadas a mejorar la eficiencia energética en sus equipos, y asegurar así el menor impacto ambiental, además el incremento de los combustibles y de la energía ha incrementado el costo operativo. D.Hernon et al. (2011). Realizaron un proyecto aplicado en la compañía Alcatel-lucent ,la cual tiene una buena trayectoria en soluciones verdes, muestra de esto es el proyecto Smart Cool, con una idea de refrigeración libre, utilizando el aire fresco del exterior para alcanzar un propósito de maximizar la diferencia de temperatura entre el aire del ambiente de entrada y el aire caliente de salida que es expulsado al exterior, mejorando significativamente el rendimiento térmico como solución de enfriamiento, con lo que plantean una reducción de operación del aire acondicionado de hasta un 99% lo que proporciona ahorros energéticos significativos reduciendo el tiempo del aire acondicionado en operación

2.2 Marco conceptual:

Existen ciertos conceptos termodinámicos muy útiles para aprovechar el aire del ambiente, para enfriar un lugar cerrado, uno de estos es el desplazamiento del aire. El aire caliente es menos denso que el aire frío, por lo que el aire caliente sube y el aire frío desciende. Este concepto es ideal para la implementación del sistema free-cooling y el diseño y posición de las compuertas del sistema, ver Ilustración 2

EL AIRE SE MUEVE



- El aire se calienta en contacto con la superficie terrestre y sube.

- Alejado de la superficie, el aire se enfría y baja.

- El Sol es el responsable del movimiento del aire atmosférico, (de la suave brisa marina y de los vientos huracanados).

Ilustración 2: desplazamiento del aire. Fuente: (perfil, 2017)

Los sistemas free-cooling requieren del apoyo de sistemas de aire acondicionado en la mayoría de los casos, debido que en muchas aplicaciones el intercambio de temperatura interna al medio externo y viceversa no es suficiente; por lo cual a continuación se ampliarán los elementos que componen los sistemas de aire acondicionado, sus principales variables, parámetros, etc.

2.3 Tipos de aire acondicionado:

Existen aires acondicionados con sistema de condensación por aire y por agua, en este proyecto nos interesan los condensados por aire, por su facilidad de aplicación en locales y pequeños recintos. Estos equipos pueden ser compactos o partidos, los compactos solo tienen una unidad, mientras que los partidos contienen dos o más unidades. Los sistemas de aire acondicionado también se denominan unitarios o individuales. Tomado de (perfil, 2017); estos últimos son ampliados a continuación.

2.3.1 Unitarios:

Se implementan cuando tienen una cobertura de una sola habitación o espacio, son de menos potencia, por lo tanto, presentan menos cobertura en un volumen amplio, son pequeños. Cuentan con instalación de climatización que dispone de un aparato en cada dependencia y que regula la temperatura habitación por habitación. A continuación, se muestran algunos tipos de aires acondicionado unitarios.

Tipo consola o pared:

Compacto de descarga directa, se coloca uno por habitación, si es un local grande se instalan varios dependiendo de la necesidad, instalación en ventana o muro. Este se puede apreciar en la Ilustración 3.

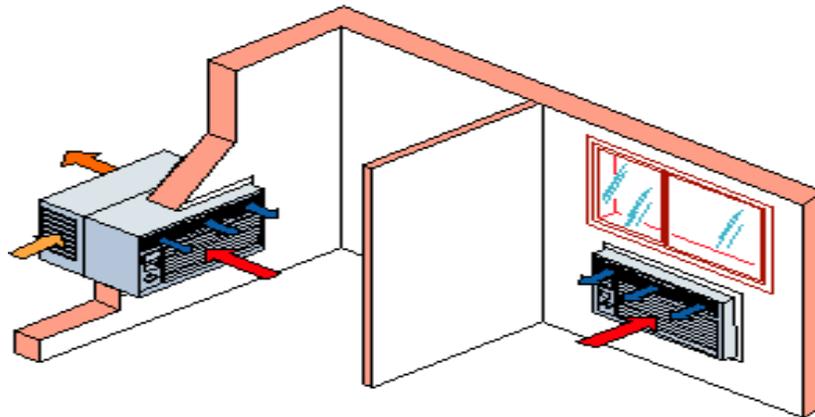


Ilustración 3: aire acondicionado tipo consola o pared. Fuente: (Materias.fi.uba.ar, 2017)

Aire acondicionado portátil:

Compacto o partido de descarga directa y transportable; de fácil instalación, solo una pequeña abertura en la ventana o pared, cubre las necesidades mínimas de acondicionamiento en locales o habitaciones pequeñas (ver Ilustración 4).

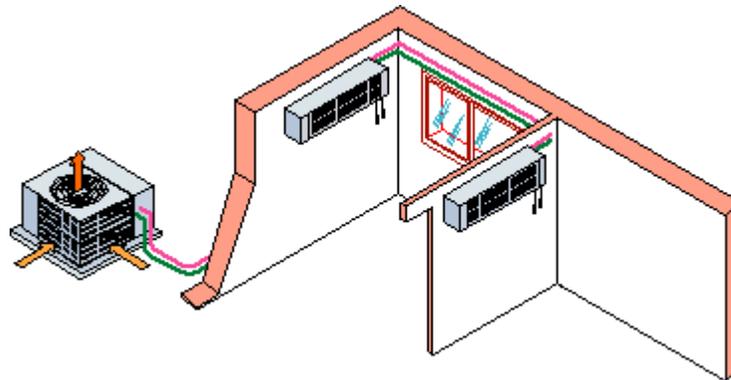


Ilustración 4: aire acondicionado portátil. Fuente: (Materias.fi.uba.ar, 2017)

Partidos (Split o multi-split):

De descarga o expansión directa: Proceso de tratamiento del aire efectuado por evaporación del fluido frigorífico en el circuito primario de una batería. La diferencia con los compactos es que la unidad formada por compresor y condensador va afuera del local o habitación y la unidad evaporadora va en el interior, (sistema Split) una unidad interior, (sistema multi-split) varias unidades en el interior, como se puede ver en la Ilustración 5.

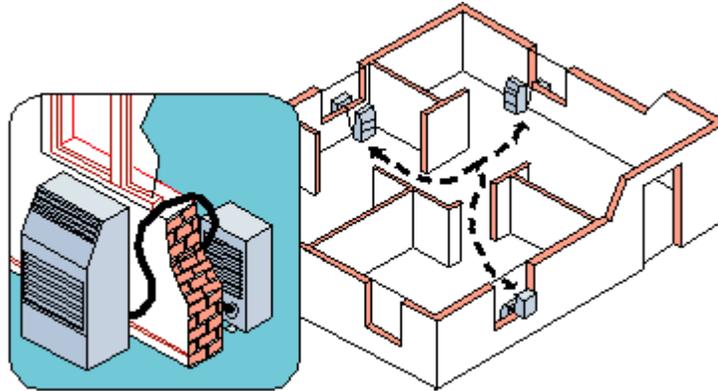


Ilustración 5: aire acondicionado partido (Split o multi-split). Fuente: (Materias.fj.uba.ar, 2017)

2.3.2 Individuales:

Son aquellos cubren todo el local o recinto, estos se diseñan generalmente con incorporación bomba de calor (encargada de transportar el calor de una unidad a otra). Es una instalación de climatización que dispone de un generador de frío y un sistema de distribución del mismo a las diferentes dependencias de la unidad de consumo.

Equipo compacto individual:

Equipo de descarga directa, transportada por ductos, compuertas, rejillas de pared o difusores de techo. De control individual por equipo, dependiendo de la necesidad de confort (ver Ilustración 6).

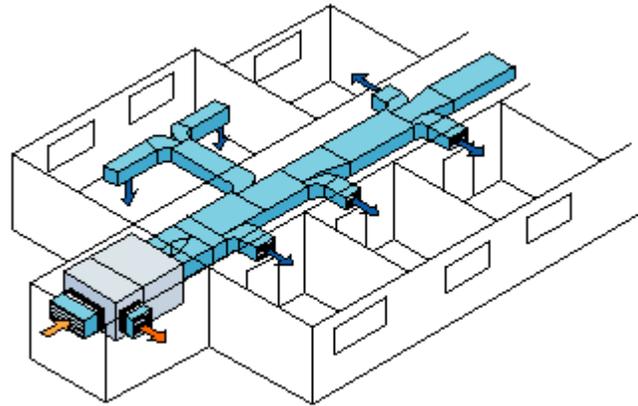


Ilustración 6: aire acondicionado de equipo compacto individual. Fuente: (Materias.fi.uba.ar, 2017)

2.4 Unidad manejadora (UMA):

Son conocidas como climatizadores, son equipos indispensables para el tratamiento del aire en lugares dotados con aire acondicionado, estas son las encargadas de suministrar el aire al lugar y cubren los parámetros fundamentales de tratamiento de aire, los cuales son: renovación y limpieza de aire (bajo contenido de partículas, polvo), control de temperatura, humedad relativa adecuada. La unidad está compuesta por: entrada de aire exterior, filtro, ventilador, intercambiadores de frío/calor, humidificador para el invierno, separador de gotas tal como se muestra en la Ilustración 7 (YORK Home, 2017).



Ilustración 7: Unidad manejadora de aire acondicionado individual. Fuente: (Medcomfort.com.mx, 2017)

2.5 Variables asociadas a free- cooling:

En este trabajo es indispensable el análisis de las siguientes variables las cuales van a ser monitoreadas para obtener información del estado del ambiente exterior e interior y

posteriormente ser controladas con el sistema free-cooling. Las cuales se describen a continuación:

- **Temperatura exterior:**
Es una magnitud física que refleja la cantidad de calor en el ambiente, es la temperatura del ambiente por fuera del laboratorio.
- **Temperatura interior:**
Es la temperatura real promedio medida en 2 puntos diferentes del laboratorio.
- **Humedad interior:**
Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en el aire, es la humedad dentro del laboratorio.

2.6.1 Campos de interacción del free-cooling:

Para la implementación de los sistemas de free-cooling se deben tener en cuenta los siguientes campos:

- **Obra civil:**
Se deben tener en cuenta dentro del diseño, las compuertas de aireación y planos de distribución de tuberías para la red de cableado de instrumentación en el laboratorio.
- **Instrumentación:**
Análisis, selección, ubicación de sensores de humedad y temperatura.
- **Electromecánica:**
Selección y ubicación eléctrica y mecánica de los servomotores utilizados en las compuertas, para dar acceso al flujo de aire, ubicación y selección del tablero de control, programación del controlador, un PLC siemens logo.

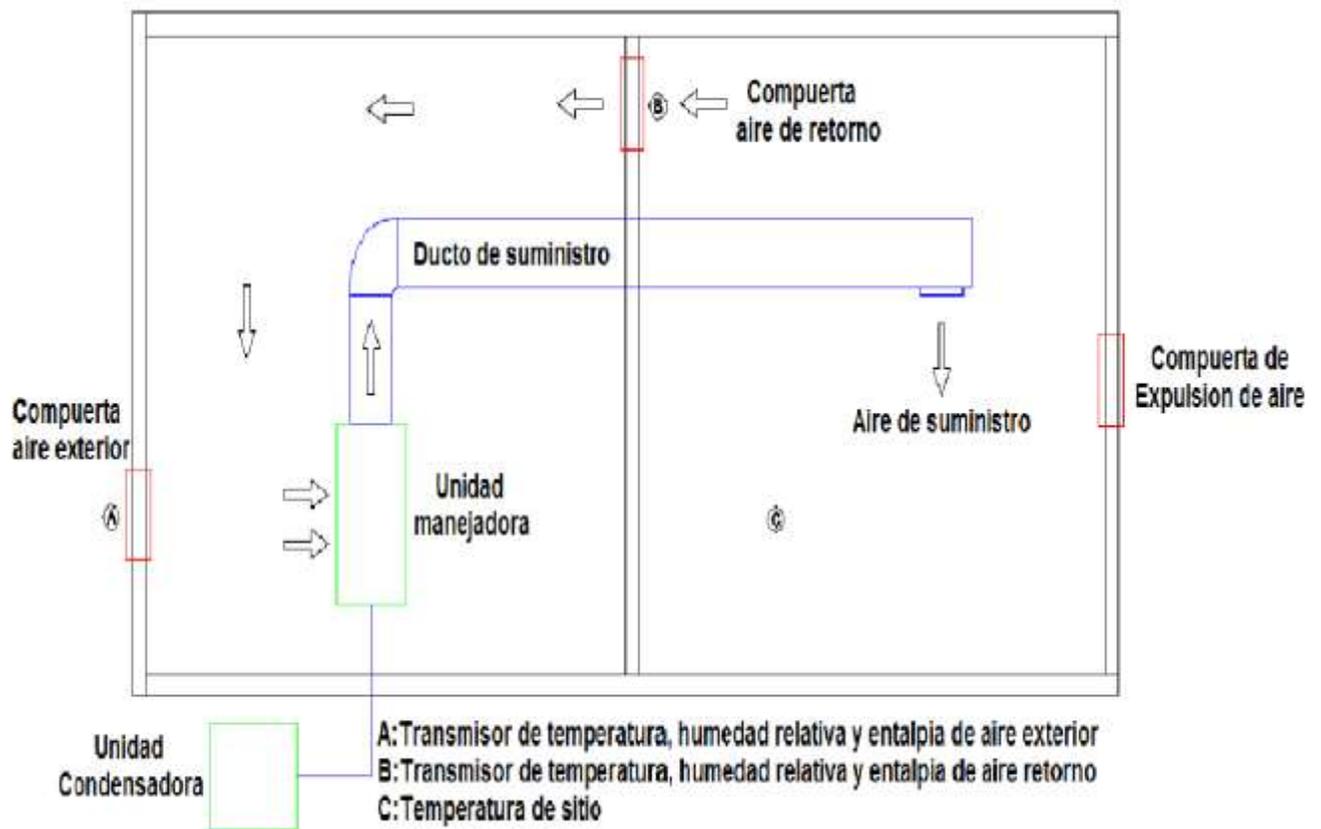
2.6.2 Funcionamiento clásico del free-cooling:

1. Si las condiciones del ambiente exterior están dadas el sistema free-cooling entrara en ejecución.
2. El sistema ejecutara la apertura de las compuertas de entrada de aire de exterior y la de expulsión del aire.
3. El sistema cuenta con un ventilador el cual expulsara el aire al exterior.

4. La regulación de la proporción de aire eliminado o recirculado, se efectúa mediante un juego de compuertas.
5. El sistema continuara en ejecución hasta que las condiciones del ambiente cambien y no sean favorables para su operación.
6. Cuando el ambiente no es favorable se revierte lo ejecutado y continua la refrigeración con el sistema de aire acondicionado.

A continuación, se muestra el recorrido del aire cuando:

- no opera free-cooling: las compuertas de aire exterior y la de expulsión están cerradas y la de retorno abierta, para la recirculación del aire, al mismo tiempo que la unidad manejadora está en ejecución, como se observa en (



- Ilustración 8).

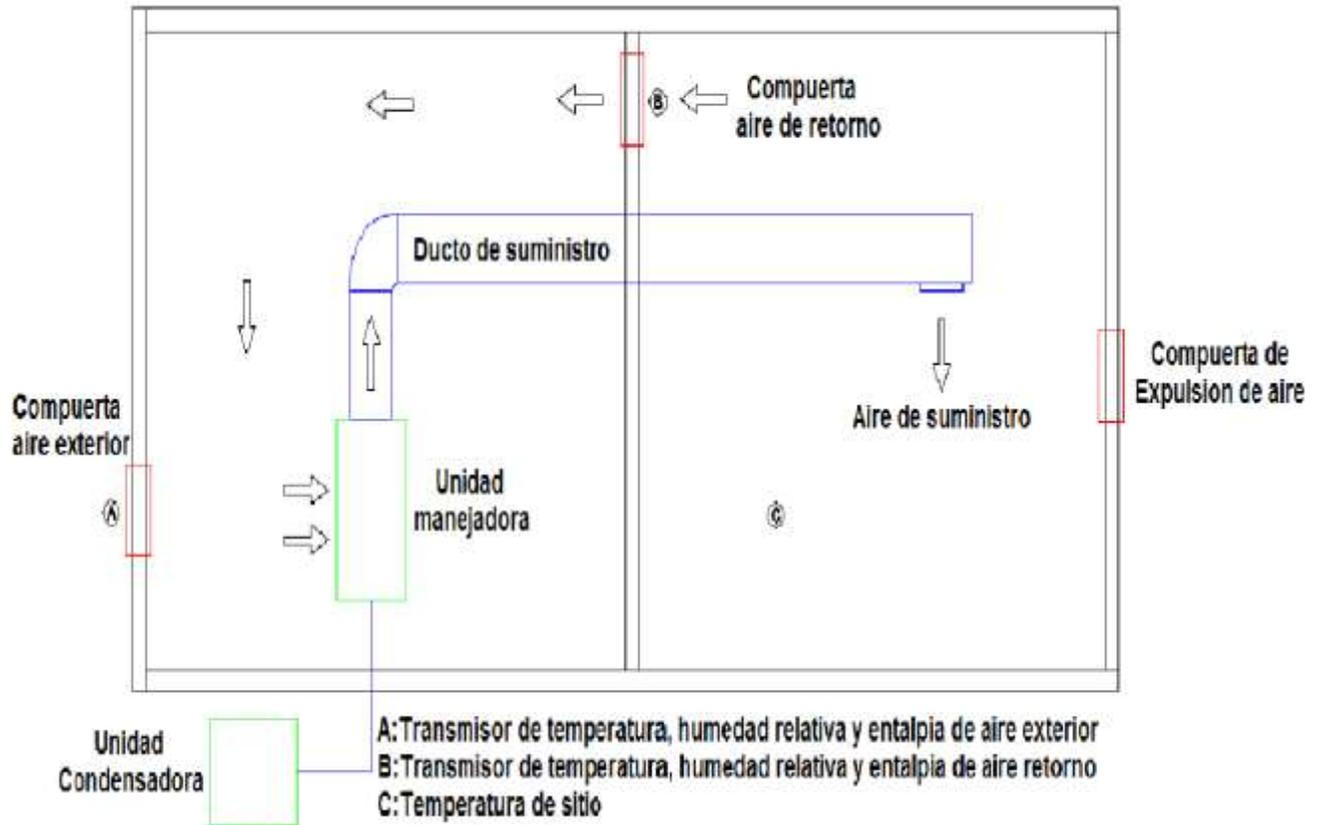


Ilustración 8: free-cooling off (Recorrido del flujo de aire al ser enfriado y recirculado)

- opera free-cooling: las compuertas de aire exterior y la de expulsión están abiertas y la de retorno cerrada, al mismo tiempo que la unidad manejadora estar en ejecución, pero con menos carga térmica y así menos operación, como se observa en (

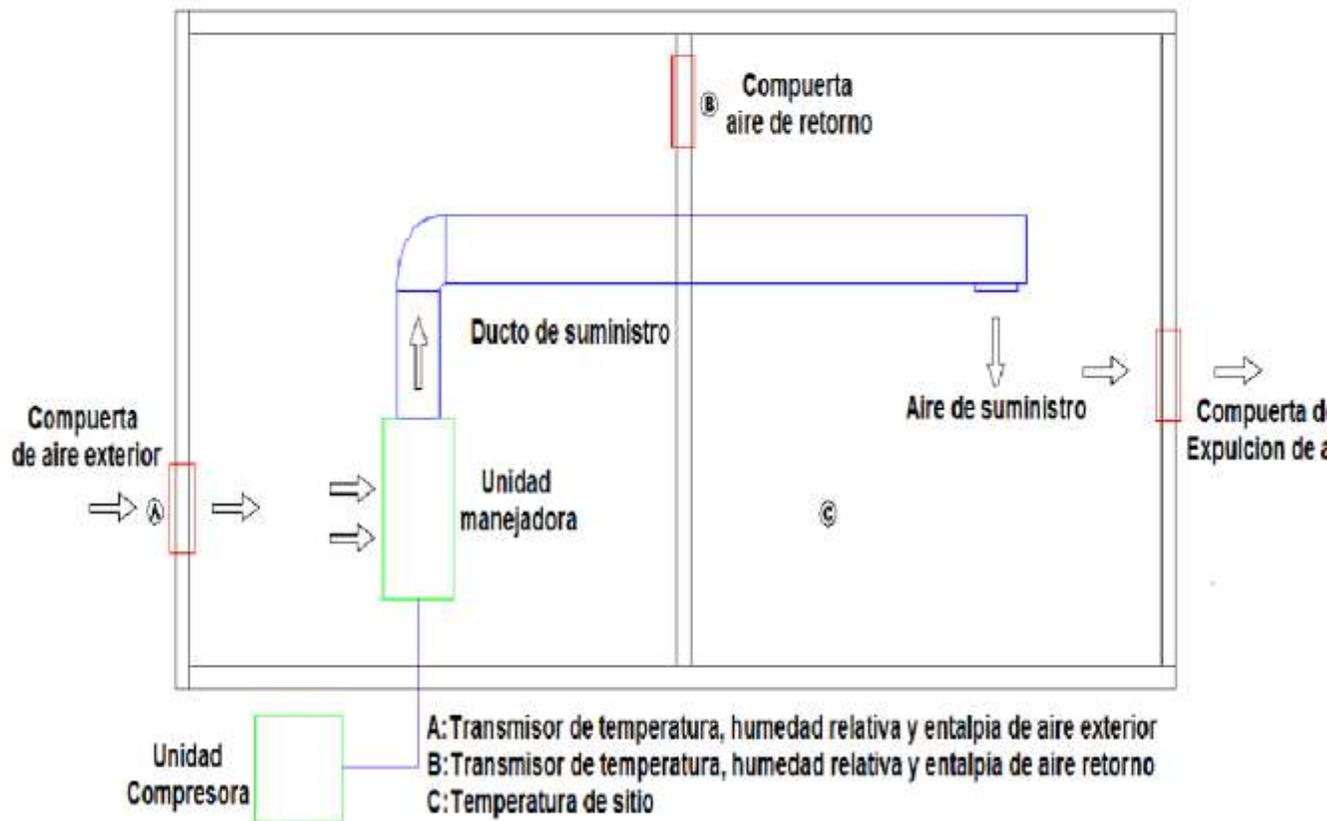


Ilustración 9).

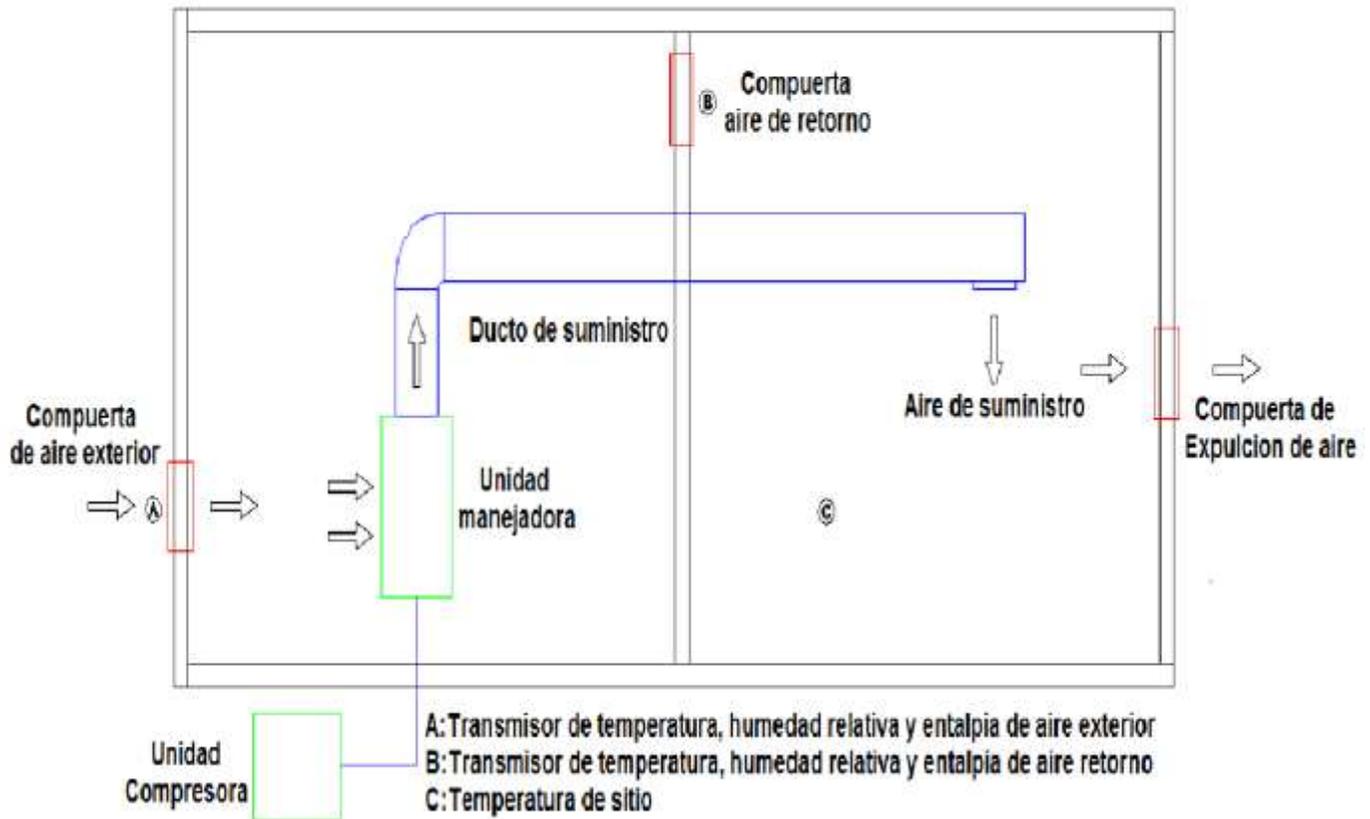


Ilustración 9. Operación del free-cooling (Recorrido del flujo de aire del ambiente forzado a enfriar)

3 METODOLOGÍA

El proyecto free-cooling se realizó por medio de los recursos instalados en la universidad, utilizando los equipos disponibles de los laboratorios de control y control lógico, y la asesoría de los docentes. Se realizó una búsqueda bibliográfica profunda relacionada con el tema, aplicando los conocimientos adquiridos en la universidad e industria. Para dar cumplimiento a los objetivos específicos y de manera directa al general, se dio cumplimiento de la siguiente metodología:

- Se realizó un análisis del laboratorio CADD ROBLEDO sus equipos y cantidades para obtener la carga térmica con sus fichas técnicas. Para la determinación de la carga térmica en el laboratorio, se realizarán mediciones de temperatura en puntos del laboratorio estratégicamente seleccionado acorde a la disposición de equipos existen en el lugar.
- Se realizaron mediciones para obtener el volumen del laboratorio CADD ROBLEDO.
- Se analizó el sistema de refrigeración actual para buscar su integración al sistema free-cooling o su homologación. También, se caracterizó la potencia del equipo existente para la integración del sistema free-cooling; como también el consumo energético actual.
- Con todos los datos obtenidos del laboratorio se implementó el diseño del sistema free-cooling con la integración al sistema de refrigeración antiguo buscando su mejor ubicación estructural.
- Finalmente se analizó el ahorro energético que se obtiene al utilizar el sistema free-cooling en comparación con el sistema actual de acondicionamiento de aire.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al dar cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos en este proyecto de investigación.

4.1 Determinación de la carga térmica del laboratorio de modelado CADD SEDE

Robledo.

Para llevar a cabo el análisis de la carga térmica laboratorio de modelado CADD SEDE Robledo se tomaron datos reales del laboratorio, siguiendo la metodología y las ecuaciones de carga térmica por enfriamiento según (Dossat, 1991) con el cual se obtuvo la carga total de laboratorio y sus pérdidas en tiempo real. A continuación, se presenta el paso a paso para desarrollar la metodología anteriormente mencionada.

Q_{HL} Carga de enfriamiento.

La carga de enfriamiento en un equipo de refrigeración raras veces es el resultado de una sola fuente de calor. Más bien, es la suma de las cargas térmicas en las que están involucradas diferentes fuentes. Algunas de las fuentes de calor más comunes que suministran la carga de refrigeración del equipo son. (Dossat, 1991)

- Q_t pérdida térmica por calor que pasa del exterior al espacio refrigerado por conducción a través de las paredes y cerramientos
- Q_v Pérdida térmica por ventilación o filtración de aire
- Q_{RH} Pérdidas por Capacidad de calentamiento del local tales como:
 - Calor cedido por las personas dentro del espacio refrigerado.
 - Calor cedido por algún equipo productor de calor localizado dentro del espacio, tal como motores eléctricos, alumbrados, equipos electrónicos, etc.

No necesariamente todas estas fuentes de calor intervienen en cada caso y la importancia de cualquiera de éstas con respecto a la carga de enfriamiento total, varía considerablemente para cada aplicación específica (Dossat, 1991).

Para el cálculo de la carga térmica del laboratorio de modelado, se caracterizaron las áreas de transferencia de calor, especificando espesores, materiales y temperaturas exteriores al laboratorio, mediante las siguientes imágenes:

Laboratorio de innovación, este lugar se encuentra refrigerado a una temperatura de 22 grados Celsius y hace parte del cerramiento del laboratorio CCAD



Ilustración 10: laboratorio de innovación pared exterior frontal

Interior laboratorio CADD, es el lugar el cual se le hizo el estudio de las cargas térmicas desde su interior



Ilustración 11: interior laboratorio CADD

Pared exterior puerta, este sector es una de las fronteras con el exterior, por lo cual se encuentra a temperatura ambiente



Ilustración 12: pared exterior puerta

Pared exterior calle acceso, es otra de las fronteras en contacto con el exterior por lo cual está a temperatura ambiente



Ilustración 13: pared exterior calle acceso

Guardería, esta es la frontera inferior del laboratorio CCAD y no está refrigerada, también está a temperatura ambiente



Ilustración 14: guardería

Sala de cómputo, es la frontera superior al laboratorio y se encuentra refrigerada a 22 grados Celsius



Ilustración 15: sala de cómputo

Salón vecino pared trasera laboratorio CADD, este salón se encuentra refrigerado a 24 grados Celsius y es la frontera trasera del laboratorio



Ilustración 16: salón vecino pared trasera laboratorio CADD

Interior laboratorio CADD con la vista invertida para mostrar la frontera trasera y la posición del sistema de refrigeración



Ilustración 17: Interior laboratorio CADD

| | | | |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

Continuando con los cálculos según lo descrito anteriormente, calcule la pérdida térmica Q_t

$$Q_{HL} = Q_t + Q_v + Q_{RH} \quad \text{Ecuación: 1}$$

$$\text{Donde } Q_t = U * A * (T_{ex} - T_{in}) \quad \text{Ecuación: 2}$$

Unidad

$$Q_t = \frac{kcal}{h}$$

U = Coeficiente global de transferencia de calor $\frac{kcal}{m^2 h C^\circ}$

A = Superficie de la pared en cálculo (m^2)

T_{ex} = Temperatura exterior de la pared (C°)

T_{in} = Temperatura interior de la pared (C°)

Para la transferencia en paredes

$$\frac{U}{1} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{l}{\gamma} \quad \text{Ecuación: 3}$$

De tabla 2.1 muros de transferencia verticales

$$\frac{1}{h_i} = 0,13 \quad \frac{1}{h_e} = 0,07$$

l = Espesor de la pared de laboratorio CCAD robleado 0,2 m

$\gamma = 1,10 \frac{kcal * m}{h * m^2 * C^\circ}$ Concreto al exterior. (Scribd, 2018)

$\gamma = 0,60 \frac{kcal * m}{h * m^2 * C^\circ}$ Concreto al interior. (Scribd, 2018)

De tabla 1 de Apéndice C

$U = 2,61904762$ para paredes exteriores

$U = 1,875$ para paredes interiores

Para hallar las pérdidas en las paredes tenemos las siguientes áreas:

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-22 |

PARED EXTERIOR PUERTA

Área pared exterior puerta $27 m^2$

Es el área de la pared menos la de las ventanas y la puerta

Área puerta $2,05 m^2$

Área ventanas $4 m^2$ la suma de las dos ventanas

Área total pared puerta exterior $20,95 m^2$ *De tabla 2 de Apéndice C*

PARED EXTERIOR CALLE ACCESO

Área pared exterior calle acceso $27 m^2$

Es el área de la pared menos la de las ventanas

Área ventanas $10,5 m^2$ la suma de las dos ventanas

Área total pared exterior calle acceso $16,5 m^2$ *De tabla 3 de Apéndice C*

PARED INTERIOR FONTAL

No tiene ventanas ni puertas

Área total pared interior Fontal $27 m^2$

PARED INTERIOR TRASERA

No tiene ventanas ni puertas

Área total pared interior trasera $27 m^2$

PISO

Área total piso $81 m^2$

TECHO

Área total Techo $81 m^2$

La sumatoria de pérdida térmica por calor que pasa del exterior al espacio refrigerado por conducción a través de las paredes y cerramientos es.

$$\sum Q_{tn} = Q_t \text{ PARED EXTERIOR PUERTA} + Q_t \text{ PARED EXTERIOR CALLE ACCESO} + Q_t \text{ PARED INTERIOR FONTAL} + Q_t \text{ PARED INTERIOR TRASERA} + Q_t \text{ PISO} + Q_t \text{ TECHO}$$

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-22 |

Tomando

Temperatura promedio de Medellín 27,5 °C como la temperatura exterior

Temperatura promedio oficinas 24°C como la interior frontal

Temperatura promedio salón 22°C como la interior trasera

Temperatura promedio techo 22°C como el interior techo

Aplicando la ecuación de Q_t

$$Q_t \text{ PARED EXTERIOR PUERTA} = 301,7797619$$

$$Q_t \text{ PARED EXTERIOR CALLE ACCESO} = 237,6785714$$

$$Q_t \text{ PARED INTERIOR FONTAL} = 101,25$$

$$Q_t \text{ PARED INTERIOR TRASERA} = 0$$

$$Q_t \text{ PISO} = 835,3125$$

$$Q_t \text{ TECHO} = 0$$

$$Q_t \text{ VENTANA EXTERIOR PUERTA} = 110$$

$$Q_t \text{ VENTANA EXTERIOR CALLE ACCESO} = 288,75$$

$$Q_t \text{ PUERTA} = 56,375 \quad \text{De tabla 4 de Apéndice C}$$

$$\sum Q_t = 1931,145833 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Para hallar:

Q_v = Perdida térmica por ventilación o filtración de aire

$$Q_v = G * \delta * Ce * (T_{ex} - T_{in}) \quad \text{Ecuación: 4}$$

G = caudal aire filtrado

δ = densidad del aire $1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Ce = calor específico del aire $0,24 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$

T_{ex} = temperatura exterior

T_{in} = temperatura interior

Donde:

$$G = V * A \quad \text{Ecuación: 5}$$

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-22 |

$V =$ velocidad aire = $8 \frac{m}{s}$ *tabla escala de Beaufort velocidad del aire*

$A =$ área de filtración

$$G = 0,16 \frac{m^3}{s}$$

Aplicando ecuación Q_v

Q_v total de aire filtrado por la puerta

$$Q_v = 912,384 \frac{kcal}{h} \text{ De tabla 5 de Apéndice C}$$

Para hallar

Q_{RH} Perdidas por Capacidad de calentamiento del local

$$Q_{RH} = Q_{il} + Q_{eq} + Q_{ps} \quad \text{Ecuación: 6}$$

Q_{il} = perdidas por iluminación

Q_{eq} = perdidas por equipos electrónicos

Q_{ps} = perdidas por persona circulante

$$Q_{il} = n * W * F \quad \text{Ecuación: 7}$$

n = número de lámparas

W = watts lámpara

F = factor de conversión a $\frac{kcal}{h}$

Para 16 lámparas de 2x54 watts

$$Q_{il} = 1486,08 \frac{kcal}{h} \text{ De tabla 6.1 de Apéndice C}$$

$$Q_{eq} = N * (w * \varepsilon) * F \quad \text{Ecuación: 8}$$

N = número de equipos

w = watts equipo

ε = ineficiencia del equipo

F = factor de conversión a $\frac{kcal}{h}$

Para los 16 equipos descritos en: *tabla 6.2 de Apéndice C*

$$Q_{eq} = 7142,601 \frac{kcal}{h}$$

$$Q_{ps} = N * Q_s * F \quad \text{Ecuación: 9}$$

N = número de personas

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-22 |

Q_s = perdida por persona circulante

F = factor de conversión a $\frac{kcal}{h}$

Para 6 personas en promedio

$Q_{ps} = 650,16 \frac{kcal}{h}$: tabla 6.3 de Apéndice C

Sumando las perdidas internas generadas

$Q_{RH} = 9278,84 \frac{kcal}{h}$ tabla 6.3 de Apéndice C

Aplicando los resultados obtenidos

$$Q_{HL} = Q_t + Q_v + Q_{RH}$$

Ecuación: 1

$$Q_{HL} = 5952,30 \frac{kcal}{h}$$

Convirtiendo a BTU

$$Q_{HL} = 23605 \frac{BTU}{h}$$
 tabla 7 de Apéndice C

La unidad condensadora actual es de $36000 \frac{BTU}{h}$, por lo cual se verifica que el equipo instalado cumple con los requerimientos técnicos.

| | | | |
|--|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

4.1 Caracterización el sistema de refrigeración actual.

Estas son las características de fábrica del equipo el cual consta de una unidad interior Fancoil Piso Techo y una unidad exterior Condensadora, evidenciando las especificaciones de desempeño del equipo instalado en sitio, las cuales se muestran en las siguientes tablas.



Ilustración 18: Unidad Interior – Fancoil Piso Techo Inverter

Tabla 2: Unidad Interior – Fancoil Piso Techo Inverter. Fuente: (2018)

| Modelo | Capacidad de Enfriamiento Nominal | | Refrigerante | Datos Eléctricos (V / F / Hz) | Consumo Eléctrico Nominal (Amps) | Potencia Eléctrica Nominal (Watts) | Nivel de ruido Db | Flujo de Aire CFM A/M/B | Conexiones Líquido | | Datos Físicos Cuerpo Netos Embalaje | | | |
|---------------|-----------------------------------|-------|--------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|--------|-------------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
| | Btu | W | | | | | | | Succión (Pulg) | (Pulg) | Dimensiones (P / L / A) (cm) | Peso (kg) | Dimensiones (P / L / A) (cm) | Peso (Kg) |
| MUE-36CRDN1-N | 36000 | 10551 | R410A | 220-1-60 | 1,06 | 235 | 54/51.6/45.9 | 970/844/740 | 3/8 | 5/8 | 23,5x128,5x67,5 | 31,2 | 31,3x136x75,5 | 36,7 |

| | | | |
|--|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-22 |



Ilustración 19: Condensadora Inverter.

Tabla 3: Unidad Exterior - Condensadora Inverter. Fuente: (2018)

| Modelo | Capacidad de Enfriamiento | | Refrigerante | Datos Eléctricos V / Ph / Hz | Consumo Eléctrico Nominal Amps | Potencia Eléctrica Nominal Watts | Nivel de Ruido Db | Flujo de Aire CFM | Conexiones Líquido | | Datos Físicos | | | |
|--------------|---------------------------|-------|--------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------|-----------------------|------|--------------------------|------|
| | Btu / h | W | | | | | | | Succión (Pulg) | (Pulg) | Netas (P x L x A) Cm | | Embalaje (P x L x A) Cm | |
| MOV-36CDN1-N | 36000 | 10551 | R410A | 220-1-60 | (10,45 - 20) | (2090 - 4400) | 65,6 | 3118 | 3/8 | 5/8 | 71x71x84,3 | 66,8 | 73,8x73,8x87,2 | 66,6 |

| | | | |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

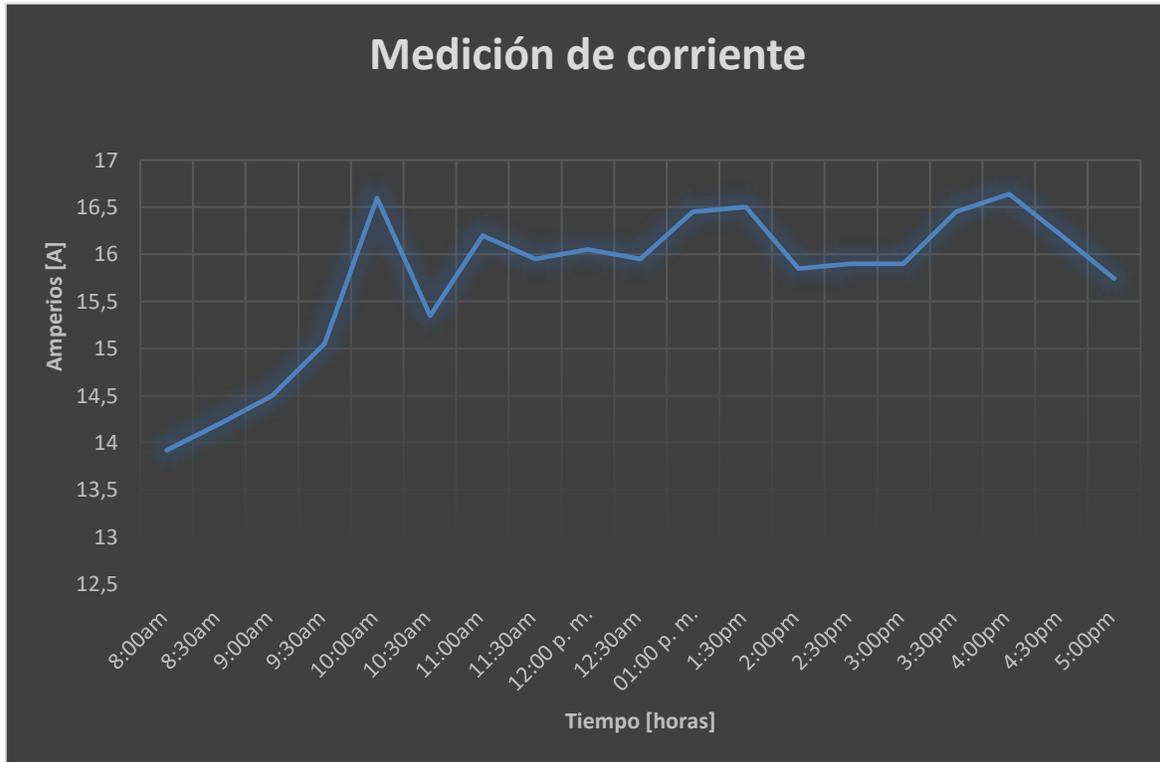
Continuando con la caracterización del sistema, se realizaron mediciones en el tablero de distribución del bloque F, el cual alimenta el aire acondicionado del laboratorio de modelado CADD Robledo, obteniendo mediciones de consumo de corriente a diferentes horas del día, con la Pinza amperimétrica UNI-T UT203 que sirve para medir voltaje AC/DC, corriente AC, resistencia, temperatura, realizar el chequeo de diodos y continuidad.



Ilustración 20. Pinza voltiamperimetrica
Fuente:("UT203 PINZA VOLTI-AMPERIMETRICA DIGITAL UNI-T", s.f.)

| | | | |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
|  Institución Universitaria | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

La siguiente tabla muestra el consumo de corriente de los equipos de aire acondicionado del laboratorio CCAD robledo respeto al tiempo en intervalos de 30 minutos desde las 8:00am hasta las 5:00pm.



Grafica1: Medición de corriente de consumo de los equipos de acondicionamiento de aire del laboratorio de modelado CADD.

Con los datos de amperaje obtenidos en los tableros de distribución aplico la siguiente ecuación para hallar la potencia de consumo por horas

$$P = \frac{I * E * fp * 2}{1000} \quad \text{Ecuación: 10}$$

Donde:

P = potencia [kW]

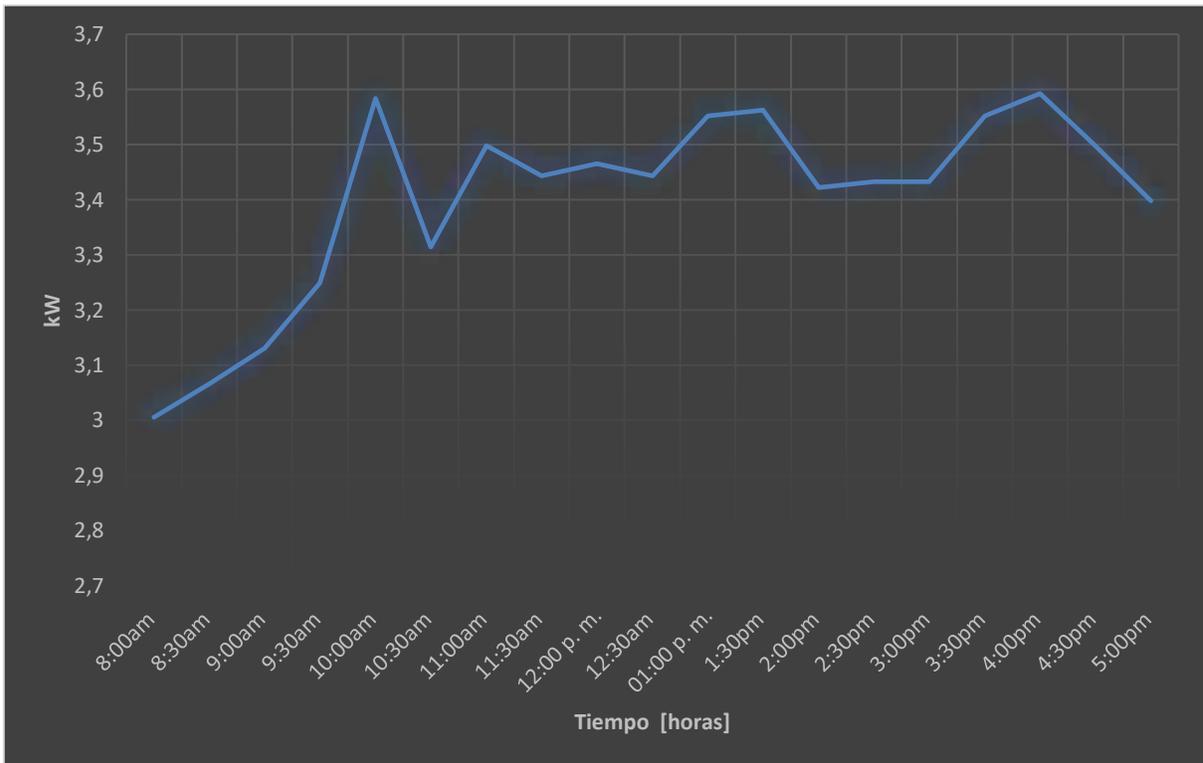
I = Corriente [A]

E = Tensión en [V]

fp = Factor de potencia (0.85)

De los cálculos obtenidos de la Ecuación: 10 se obtiene la siguiente grafica de potencia de consumo de los equipos: unidad interior e unidad exterior

Según la información soportada en la gráfica 2, se observa que el consumo de kilo vatios es proporcional a la temperatura de Medellín, en las horas del día, ya que a medida que pasa el tiempo en la mañana, el consumo aumenta y al caer la tarde empieza a disminuir, siendo consciente de que el factor meteorológico también afecta la temperatura y tiende a cambiar a cualquier hora del día



Grafica2: Potencia de consumo de los equipos de acondicionamiento de aire del laboratorio de modelado CADD.

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

4.2 Integración del sistema free-cooling al equipo existente.

Obra física

La determinación, selección de los elementos de obra civil, actuadores, compuertas se realizó con respeto los datos obtenidos en el laboratorio CCAD robledo, los cuales se presentan a continuación:

Determinación del caudal

El caudal requerido para ventilar adecuadamente un local puede ser calculado, generalmente, en dependencia del volumen del local que debe ventilarse y de la frecuencia de cambio de aire por hora, mediante la relación denominada tasa de renovación, la cual consisten en el número de veces que se renueva el aire al interior de un recinto.

| | Renovaciones por hora | |
|---|-----------------------|----|
| Iglesias | 1 | 4 |
| Habitaciones de viviendas | 3 | 5 |
| Oficinas y despachos | 5 | 8 |
| Salas de conferencias, aulas y escuelas | 4 | 10 |
| Restaurantes, casinos y comedores | 5 | 10 |
| Comercios en general | 6 | 10 |
| Cuartos de baño y guardarropas | 8 | 10 |
| Salas de acumuladores | 8 | 15 |
| Supermercados | 8 | 15 |
| Cafés y bares | 10 | 12 |

* Valor de orientación para algunos locales

Tabla 4: fuente: número de renovaciones de aire por hora. Fuente: ("axiales_siemens.pdf", s.f.)

$$Q = \frac{V * Rh}{3600}$$

Ecuación: 11

Donde:

Q = Caudal de aire requerido (m^3 /s)

V = Volumen del local a ventilar (m^3)

Rh = Número de renovaciones por hora

Para un volumen de $243 m^3$ y la tasa de renovación recomendada para esta aplicación (8 renovaciones por hora), se requiere un caudal de aire inyectado de $0.54 m^3/s$.

Según el resultado de caudal y el nivel de tensión disponible en el laboratorio, se selecciona

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

por:

1. Compuerta de admisión
2. Compuerta expulsión

Para el diseño del sistema de freecooling a implementar en el laboratorio se asume las mismas dimensiones para las compuertas, cumpliendo con la ley de la conservación de la energía y despreciando el cambio en la densidad del aire ya que en Medellín la temperatura esta entre, 15 °C (densidad 1,47 kg/m³) y 28°C (densidad 1,63 kg/m³) una diferencia en la densidad de 0,16 kg/m³, con estos datos las dimensiones de las compuertas se seleccionan conforme a la tasa de renovación de aire y diámetro del ventilador calculado, dejando como resultado una compuerta de dimensiones 60x40x20 cm.



Ilustración 22: compuerta de aire. Fuente: ("Type JZ", 2018)

Las compuertas se activan por medio de un actuador (servomotor a 24 v dc). Cada compuerta esta maniobrada por un actuador para un total de 2 actuadores referencia M9104-AGA-1S, tal como se muestra en la ilustración 23.



Ilustración 23: actuador de compuerta, fuente: ("Johnson Controls M9104-AGA-1S", s.f.)

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

Planos de ubicación de equipos.

Los planos de ubicación de los equipos seleccionados se presentan en el anexo 1.

Obra control

El sistema de control está compuesto por: un controlador lógico programable (PLC), un módulo de entradas y salidas digitales, módulo de entradas analógicas, contactores, relevador, fuente Borneras, cableado, protecciones, tablero de control. En la Tabla 6 se presentan las especificaciones de los equipos en instrumentos que conforman el sistema de control a utilizar en la instalación de tablero de control.

| Ítem | Descripción | Cantidad |
|------|---|----------|
| 1 | Fuente 110vac/24vdc 100W | 1 |
| 2 | Interruptor termomagnéticos 2x3A | 1 |
| 3 | Interruptor termomagnéticos 1x 3A | 1 |
| 4 | Interruptor termomagnéticos 1x1A | 1 |
| 5 | Siemens logo 12/24 RC | 1 |
| 6 | Siemens dm8 12/24 r | 1 |
| 7 | Siemens am2 RTD | 1 |
| 8 | Siemens am2 | 1 |
| 9 | 12 voltios dc relé 24 v/3 /11 pin relevador | 1 |
| 10 | Contactador 20A AC | 1 |
| 11 | Piloto led Verde 24v AC | 1 |
| 12 | Sensor de temperatura PT100 | 2 |
| 13 | Sensor de Humedad Relativa con MODBUS y sonda remota opcional | 1 |

Tabla 6: componentes del tablero de control

Los planos del tablero de control se presentan en el anexo 2. A continuación, se muestra el algoritmo de control y el funcionamiento del sistema describiendo las entradas digitales, entradas analógicas, salidas digitales, las señales de entrada y las condiciones de encendido del sistema, todo en tablas con el nombre dado a cada una de ellas.

Especificaciones para algoritmo de control de free cooling:

Descripción del automatismo

Las entradas digitales son: habilitación modo automático (RUN), encendido UMA 1, paro de emergencia (STOP). En la tabla.2 se muestran las entradas digitales asignadas en el PLC.

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

| ENTRADA | DESCRIPCION |
|---------|-------------------------------|
| %I0.0 | Habilitación modo automático. |
| %I0.1 | Paro de emergencia |
| %I0.2 | Encendido UMA1 |

Tabla 7. Entradas digitales

Las salidas digitales son: encendido compresor (UCA), Apertura y cierre de compuerta exterior, apertura y cierre de compuerta de retorno, apertura y cierre de compuerta de expulsión. En la tabla.8 se muestran las salidas digitales asignadas en el PLC.

| SALIDA | DESCRIPCION |
|--------|---|
| %Q0.0 | Encendido compresor UCA |
| %Q0.4 | Apertura y cierre de compuerta de aire exterior |
| %Q0.5 | Apertura y cierre de compuerta de retorno |
| %Q0.6 | Apertura y cierre de compuerta de expulsión |

Tabla 8. Salidas digitales

Las entradas analógicas son: Transmisor temperatura exterior, Transmisor temperatura interior, Transmisor de humedad interior y temperatura T1. En la tabla 9 se muestran las entradas digitales asignadas en el PLC.

| ENTRADA | DESCRIPCION |
|---------|---------------------------------|
| %IW1.0 | Transmisor temperatura exterior |
| %IW1.2 | Transmisor temperatura interior |
| %IW1.3 | Transmisor humedad interior |
| %IW2.0 | Temperatura T1 zona |

Tabla 9. Entradas análogas

Descripción programa PLC

Activación del sistema Free Cooling

En primer lugar, se adquieren las señales de entrada: le PLC lee las señales descritas a continuación, necesarias para el funcionamiento del sistema free cooling.

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

| ENTRADA | DESCRIPCION |
|----------------|------------------------------------|
| %I0.0 | Habilitación modo automático. |
| %I0.1 | Paro de emergencia |
| %I0.2 | Encendido UMA |
| %IW1.0 | Transmisor temperatura exterior |
| %IW1.2 | Transmisor temperatura de interior |
| %IW1.3 | Transmisor humedad interior |
| %IW2.0 | Temperatura T1 zona |

Tabla 10. Entradas análogas y digitales

Luego se compara la temperatura exterior con la temperatura de consigna (set point) y la humedad interior. El sistema free cooling funciona si la temperatura exterior es menor que la temperatura consigna (set point), además, si la humedad no es mayor al 90%. La activación de free cooling implica:

- Desactivación del sistema de acondicionamiento de aire
- La apertura de la compuerta de aire exterior.
- La apertura de la compuerta de expulsión (con retardo con respecto a la apertura de aire exterior).
- Cuando el free cooling está en operación se enciende un piloto luminoso verde.

Si no se cumplen las condiciones anteriormente descritas, el sistema de free cooling permanece inactivo, lo que implica:

- Activación del sistema de acondicionamiento de aire
- La compuerta de expulsión permanece cerrada.
- La compuerta exterior permanece cerrada.
- Cuando el free cooling no está en operación el piloto luminoso verde se encuentra apagado.

El free cooling se desactiva cuando la temperatura promedio al interior del laboratorio es menor en 6°C a la temperatura de consigna, desactivando todo el sistema de acondicionamiento de aire hasta que la temperatura alcance nuevamente el valor de consigna para el encendido, con esto se evita la saturación de frío en el laboratorio.

4.3 Determinación el ahorro energético con la solución planteada.

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

El ahorro energético se determinó por medio de los estudios realizados en Medellín de la firma Weather Spark y su promedio anual de temperaturas como se muestra en la ilustración 24. Dicha ilustración presenta la variación promedio de la temperatura por hora (eje vertical) en un periodo de 12 meses para la ciudad de Medellín. La temperatura promedio por hora se presenta codificada por franjas de colores. Las áreas sombreadas superpuestas indican la noche y el crepúsculo civil.

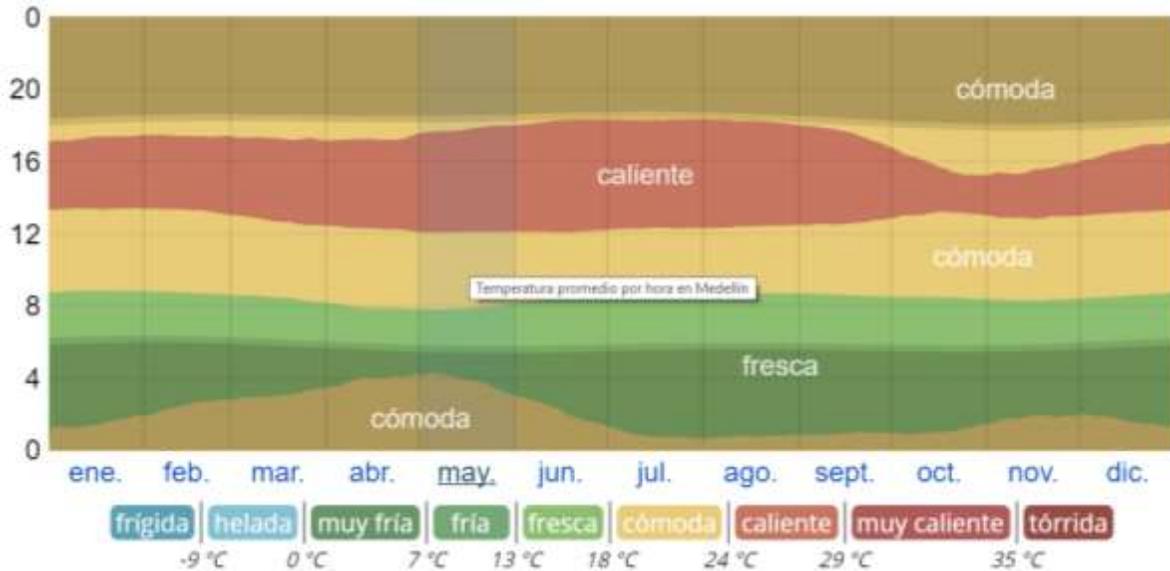


Ilustración 24: temperatura promedio anual Medellín: Fuente:("Clima promedio en Medellín, Colombia, durante todo el año - Weather Spark", 2018)

Según la gráfica anterior, el estimado de tiempo promedio diario en horas que la temperatura está por debajo de 24 °C, sería desde la 0h: 00 hasta 11h: 30 y desde las 18h: 00 a las 0h: 00, por lo cual llegaríamos a un promedio de 15 horas, que la temperatura estaría por debajo de 24 °C y la posibilidad de la intervención del sistema free cooling, si las condiciones climáticas son acordes para la entrada en funcionamiento del sistema.

Analizando la gráfica de potencia presentada en la Grafica2 se obtuvo un consumo promedio del sistema de aire existente de 3,4 kW/h. Implementando el costo por kW/h de 440,8 COP, se obtiene un costo de operación del sistema de \$ 1.474 COP/h. Según los datos de temperatura en Medellín al año, el promedio de kW/h ahorrados con el sistema free cooling sería a l rededor de 50,25 kW al día, lo que representa un ahorro del costo de funcionamiento de 22.060 COP/día lo que as u vez representa un ahorro anual de 8'205.070 COP/Año.

| | | | |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se realizó el diseño de un sistema free-cooling para las instalaciones del laboratorio CADD sede Robledo, con el cual se realizó la caracterización térmica actual del laboratorio, determinando los requerimientos energéticos del laboratorio, para el acondicionamiento de aire, buscando sacar el mejor provecho del aire del ambiente para minimizar los costos energéticos.

Para la integración del sistema free-cooling al equipo existente, se requiere realizar el planeamiento de instalación de un ventilador, dos (2) compuertas, un tablero y los respectivos equipos de control, para realizar la transferencia de aire con el medio externo.

Al analizar la carga térmica del laboratorio de modelado CADD deja un resultado de potencia de los equipos existentes, acorde a las condiciones del laboratorio, presentando un consumo máximo de 3,6 Kw y un promedio de 3,4 Kw, lo que representa un costo de operación anual de 12'948.275 COP, asumiendo un valor por Kw/h de 440,8 COP. Con la propuesta planteada del sistema free-cooling, se obtiene un ahorro energético de 50,2 Kw/día, lo que representa una disminución porcentual del 60%. Esto se traduce en una disminución en el costo de operación anual del sistema de acondicionamiento de aire de 8'205.070 COP.

Se concluye que la implementación del sistema free-cooling es factible para su aplicación como sistemas de ahorro energético en recintos que empleen sistemas tradicionales de acondicionamiento de aire, permitiendo impactar directamente los costos operacionales de las instalaciones y contribuir con el impacto ambiental.

Trabajo futuro:

Como trabajo futuro se propone la integración del sistema free-cooling con diseños arquitectónicos que permitan aprovechar las condiciones climatológicas para realizar acondicionamiento de aire de forma natural, reduciendo de esta manera el impacto económico y ambiental de este tipo de sistemas.

| | | | |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

REFERENCIAS

Okitsu, J., Naono, K., Sulaiman, S. A., Zakaria, N., & Oxley, A. (2012, September). Towards greening a campus grid: Free cooling during unsociable hours. In *Control, Systems & Industrial Informatics (ICCSII), 2012 IEEE Conference on* (pp. 202-207). IEEE.

Abimannan, S. (2011, November). Energy efficient free cooling system for data centers. In *Cloud Computing Technology and Science (CloudCom), 2011 IEEE Third International Conference on* (pp. 646-651). IEEE.

Udagawa, Y., Waragai, S., Yanagi, M., & Fukumitsu, W. (2010, June). Study on free cooling systems for data centers in Japan. In *Intelec 2010* (pp. 1-5). IEEE.

D. HERNON, P. SILVESTRE-CASTILLO and P. HAYDEN, "Significantly extending the operational range of free cooling in radio Base Station indoor shelters," 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Amsterdam, 2011, pp. 1-7. doi: 10.1109/INTLEC.2011.6099755

Materias.fi.uba.ar. (2017). Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires. [Online] Available at: <http://materias.fi.uba.ar> [Accessed 19 Jul. 2017].

Medcomfort.com.mx. (2017). Med Comfort System. [Online] Available at: <http://www.medcomfort.com.mx> [Accessed 19 Jul. 2017].

Perfil, V. (2017). Aire acondicionadosplit.[Online]Airesacondicionadosplit.blogspot.com.co. Available at: <http://airesacondicionadosplit.blogspot.com.co> [Accessed 19 Jul. 2017].

YORK Home. (2017). Sample Open Graph Title. [online] Available at: <http://www.york.com/> [Accessed 25 Sep. 2017].

Construmatica.com. (2017). Free-Cooling | Construpedia, enciclopedia construcción. [online] Available at: <http://www.construmatica.com/construpedia/Free-Cooling> [Accessed 25 Sep. 2017].

(2018). Retrieved from <http://astiane.com/view/user-manual-of-godrej-ac-remote>

UT203 PINZA VOLTI-AMPERIMETRICA DIGITAL UNI-T. (s.f.). Recuperado 25 septiembre, 2018, de <https://www.amvarworld.com/es/sistemas-de-medicion-equipos/484-ut203-pinza-volti-amperimetrica-digital-uni-t.html>

axiales_siemens.pdf. (s.f.). Recuperado de http://www.sumytech.com/fichas_tecnicas/axiales_siemens.pdf

Johnson Controls M9104-AGA-1S. (s.f.). Recuperado 26 septiembre, 2018, de <https://dmsupplysource.com/johnson-controls-m9104-aga-1s/>

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  | <p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p> | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

Type JZ. (2018). Retrieved from <https://www.trox.it/serrande-di-taratura/type-jz-738d06729204093b>

| | | | |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

APÉNDICE

Apéndice A: plano civil laboratorio CADD robledo

Apéndice B plano de tablero de control FREE COOLING

Apéndice C: tabla Excel de cálculos carga térmica

Apéndice D: tabla Excel de cálculos costo energético

FIRMA ESTUDIANTES _____

Isaias C.

FIRMA ASESOR _____

Jorge Sierra

FIRMA ASESOR _____

José Fernando Morales N.
Informe final
23-01-2018

FECHA ENTREGA: 23-01-2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___

ACEPTADO___

ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

| | | | |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

| |
|----------------------|
| ACTA NO. _____ |
| FECHA ENTREGA: _____ |

| | | | |
|---|--|---------|------------|
|  Institución Universitaria | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

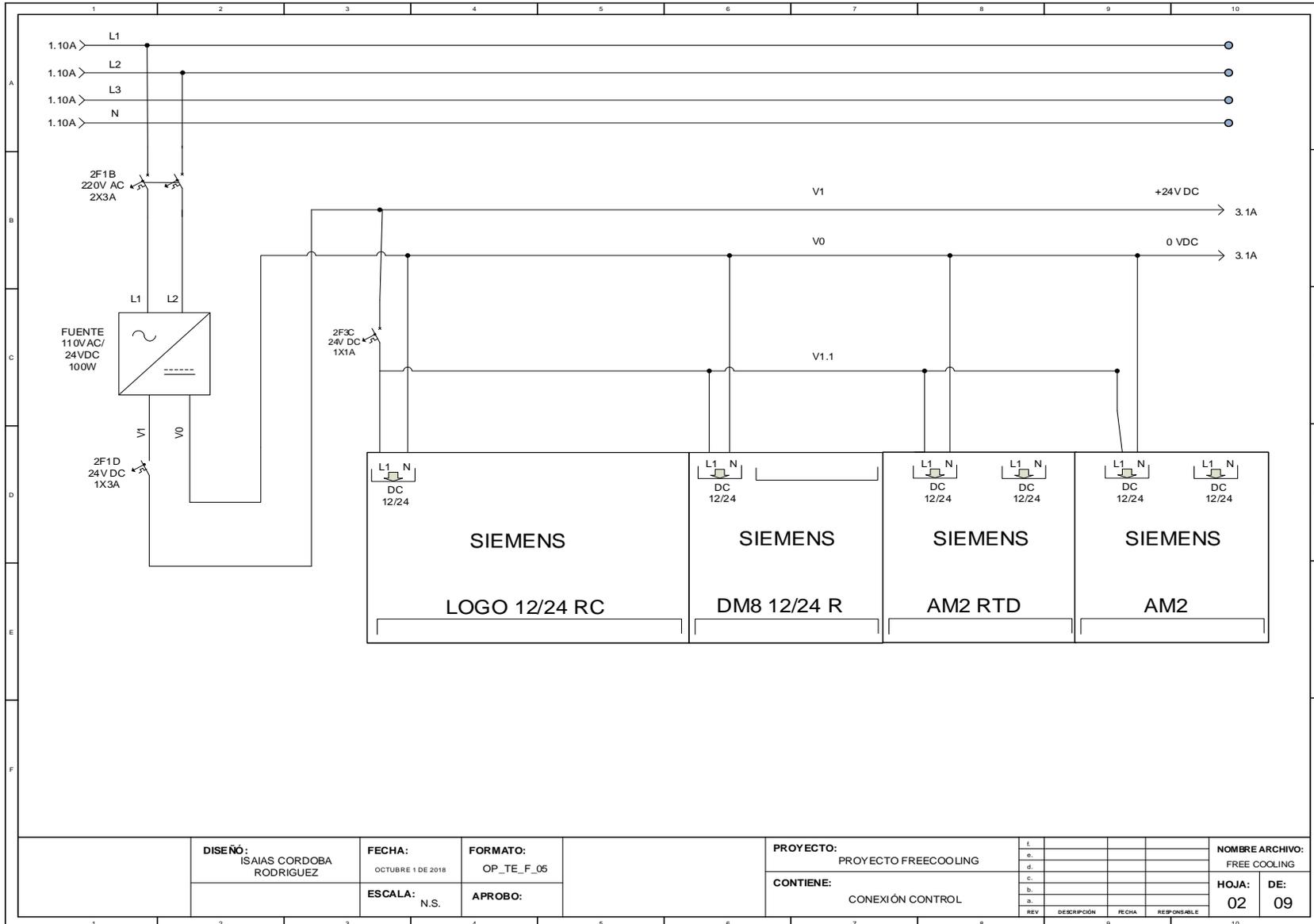
Apéndice B plano de tablero de control FREE COOLING

| | | | | | | | | | |
|---|---|------------------------------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|--|------------------------|------------------|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| A | <h1 style="margin: 0;">PROYECTO FREECOOLING LABORATORIO DE MODELADO CADD ROBLEDO</h1> | | | | | | | | A |
| B | | | | | | | | | B |
| C | | | | | | | | | C |
| D | | | | | | | | | D |
| E | | | | | | | | | E |
| F | | | | | | | | | F |
| | DISEÑO: ISAIAS CORDOBA RODRIGUEZ | FECHA: OCTUBRE 1 DE 2018 | FORMATO: OP_TE_F_05 | | PROYECTO: PROYECTO FREECOOLING | t. e. d. c. b. a. | NOMBRE ARCHIVO: | | |
| | | ESCALA: N.S. | APROBO: | | CONTIENE: PORTADA | | HOJA: 00 | DE: 09 | |
| | | | | | | REV DESCRIPCIÓN FECHA RESPONSABLE | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

| | |
|---------|------------|
| Código | FDE 089 |
| Versión | 03 |
| Fecha | 2015-01-27 |



| | |
|---------|------------|
| Código | FDE 089 |
| Versión | 03 |
| Fecha | 2015-01-27 |



DISEÑO:
ISAIAS CORDOBA
RODRIGUEZ

FECHA:
OCTUBRE 1 DE 2018

FORMATO:
OP_TE_F_05

ESCALA:
N.S.

APROBO:

PROYECTO:
PROYECTO FREECOOLING

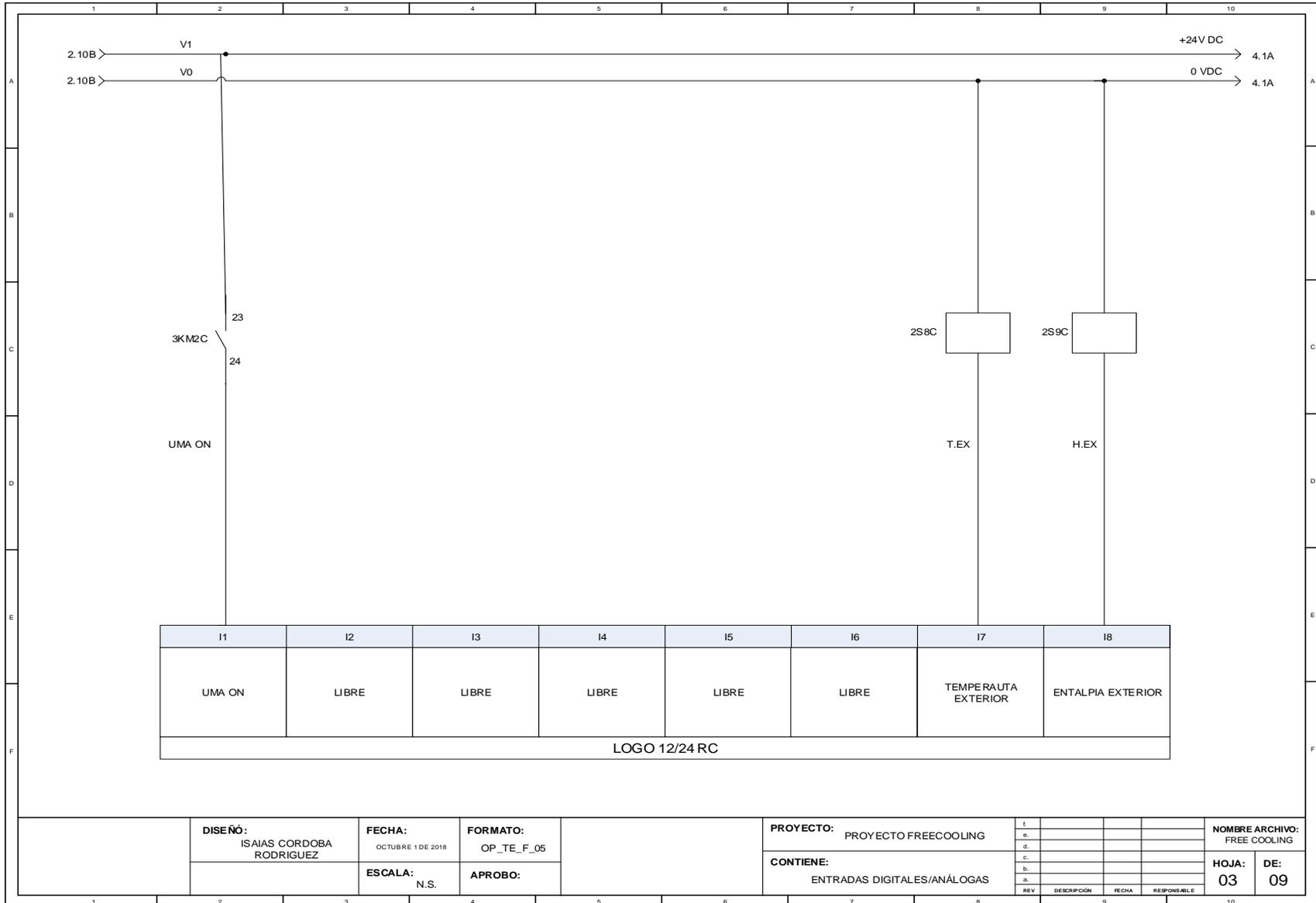
CONTIENE:
CONEXIÓN CONTROL

NOMBRE ARCHIVO:
FREE COOLING

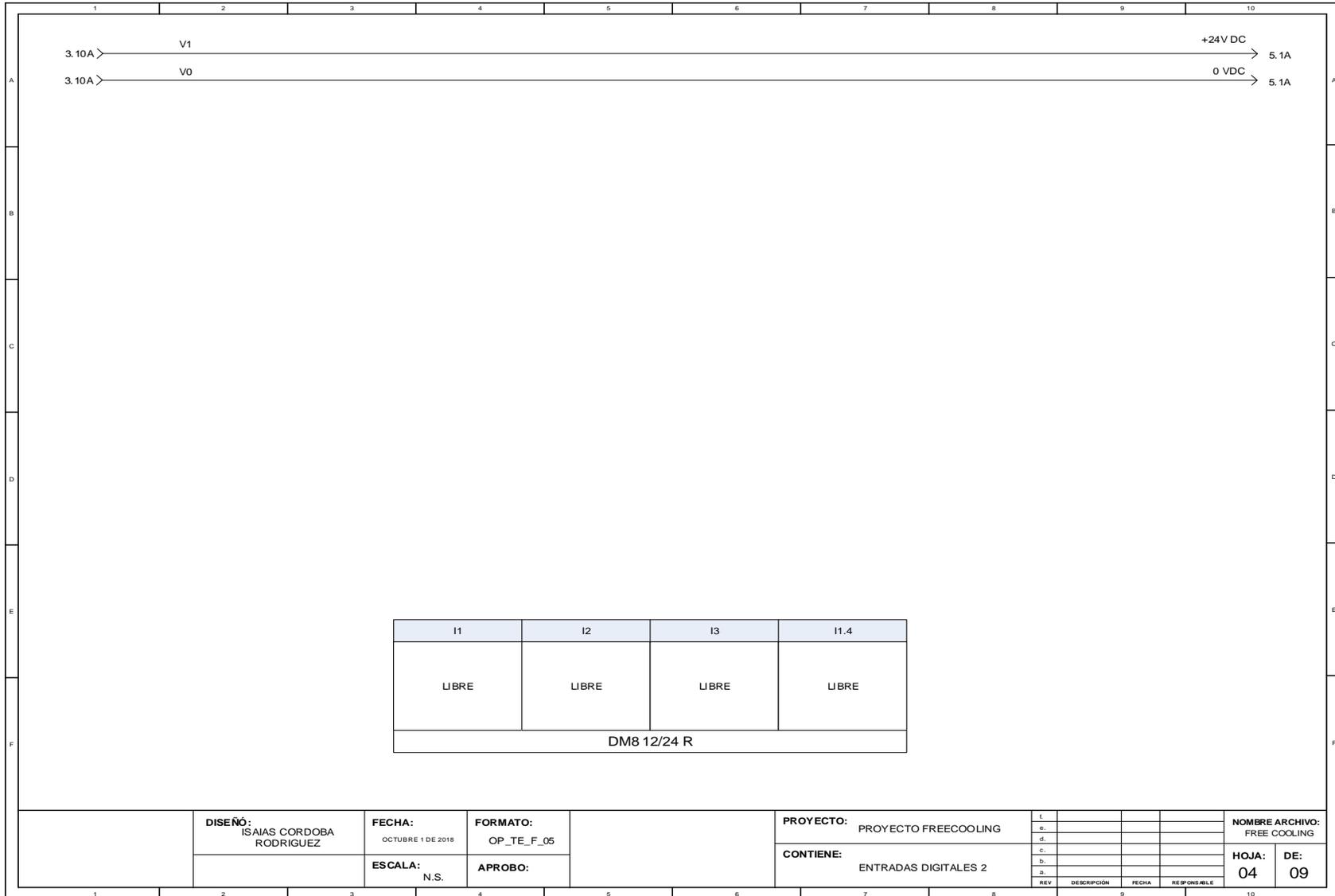
HOJA: 02 DE: 09

| e. | | | |
|-----|-------------|-------|-------------|
| d. | | | |
| c. | | | |
| b. | | | |
| a. | | | |
| REV | DESCRIPCIÓN | FECHA | RESPONSABLE |

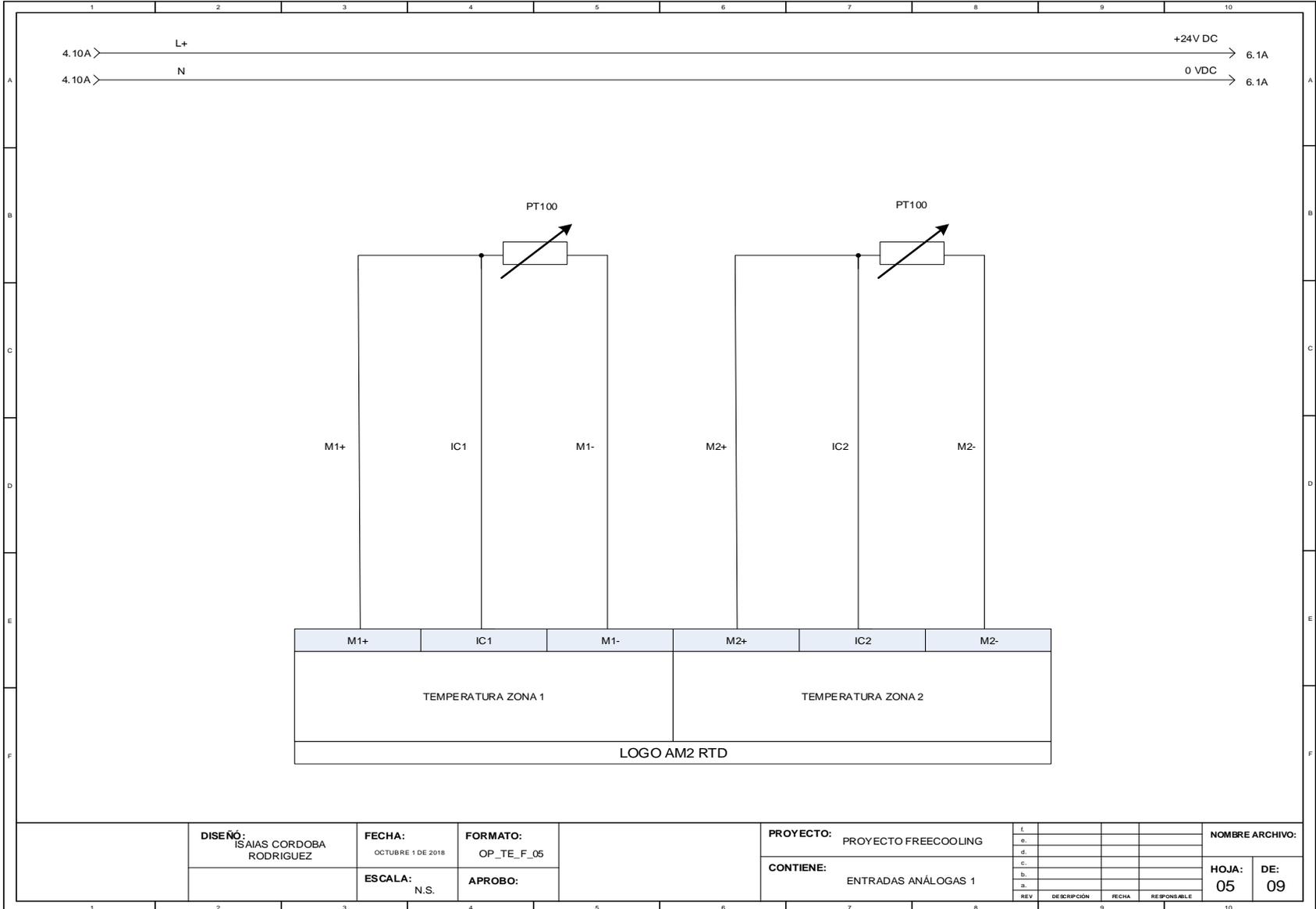
| | |
|---------|------------|
| Código | FDE 089 |
| Versión | 03 |
| Fecha | 2015-01-27 |



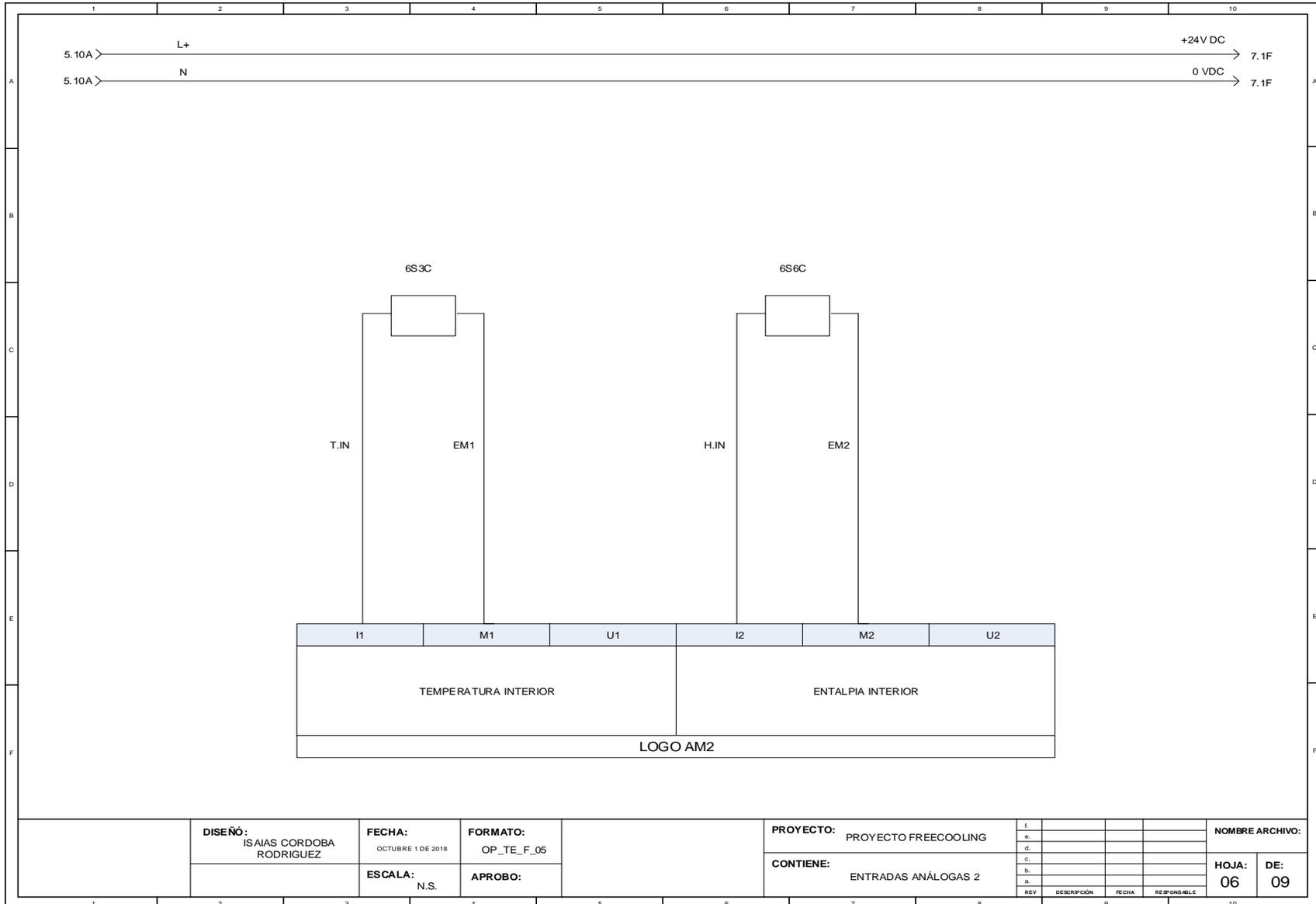
| | |
|---------|------------|
| Código | FDE 089 |
| Versión | 03 |
| Fecha | 2015-01-27 |



| | |
|---------|------------|
| Código | FDE 089 |
| Versión | 03 |
| Fecha | 2015-01-27 |



| | |
|---------|------------|
| Código | FDE 089 |
| Versión | 03 |
| Fecha | 2015-01-27 |



DISEÑO:
ISAIAS CORDOBA
RODRIGUEZ

FECHA:
OCTUBRE 1 DE 2018

FORMATO:
OP_TE_F_05

ESCALA:
N.S.

APROBO:

PROYECTO: PROYECTO FREECOOLING

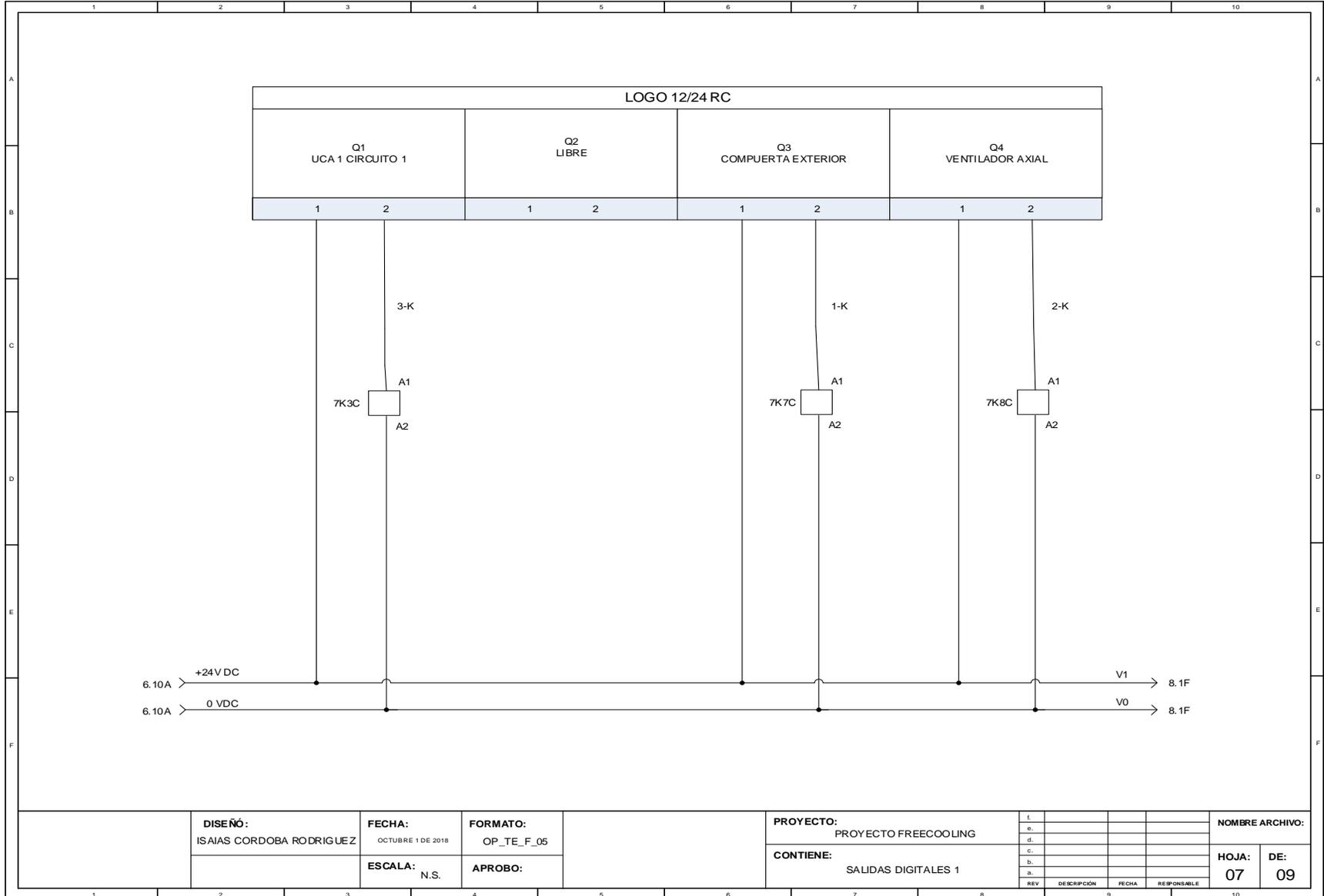
CONTIENE: ENTRADAS ANÁLOGAS 2

| l. | | | |
|-----|-------------|-------|-------------|
| e. | | | |
| d. | | | |
| c. | | | |
| b. | | | |
| a. | | | |
| REV | DESCRIPCIÓN | FECHA | RESPONSABLE |

NOMBRE ARCHIVO:

HOJA: 06 DE: 09

| | |
|---------|------------|
| Código | FDE 089 |
| Versión | 03 |
| Fecha | 2015-01-27 |



| | | | |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
|  Institución Universitaria | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

Apéndice C: tabla Excel de cálculos carga térmica

tabla 1 U PARA MUROS DE TRANSFERENCIA VERTICALES

| 1/h _i | 1/h _e | l | γ | U/1 | U |
|------------------|------------------|-----|-----|-------------|------------|
| 0,13 | 0,07 | 0,2 | 1,1 | 0,381818182 | 2,61904762 |
| 0,13 | 0,07 | 0,2 | 0,6 | 0,533333333 | 1,875 |
| | | | | | 5 |
| | | | | | 5 |

para paredes exteriores
 para paredes interiores
 para ventanas de vidrio
 para puerta metálica

tabla 2 PARED EXTERIOR PUERTA

| área puerta | área ventana | área pared | área pared total |
|-------------|--------------|------------|------------------|
| 2,05 | 4 | 27 | 20,95 |
| | | | |

tabla 3 PARED EXTERIOR CALLE ACCESO

| área ventanas | área pared | área pared total |
|---------------|------------|------------------|
| 10,5 | 27 | 16,5 |

áreas paredes

| Área pared puerta exterior | Área pared exterior calle acceso | Área pared interior Frontal | Área pared interior trasera | Área piso | Área Techo |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|------------|
| 20,95 | 16,5 | 27 | 27 | 81 | 81 |

temperaturas

| temperatura exterior | temperatura interior frontal | temperatura interior trasera | temperatura interior techo | temperatura set poin |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 27,5 | 24 | 22 | 22 | 22 |

| | | | |
|--|--------------------------------------|---------|------------|
|  Institución Universitaria | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

| tabla 4 Qt | | | | | |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| PARED EXTERIOR PUERTA | PARED EXTERIOR CALLE ACCESO | PARED INTERIOR FONTAL | PARED INTERIOR TRASERA | PISO | TECHO |
| 301,7797619 | 237,678571 | 101,25 | 0 | 835,3125 | 0 |
| VENTANA EXTERIOR PUERTA | VENTANA EXTERIOR CALLE ACCESO | PUERTA | | | Qt total |
| 110 | 288,75 | 56,375 | | | 1931,14583 |

| tabla 5 Qv | | | | |
|--------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------|
| G | área filtración | velocidad del aire | densidad del aire | Ce |
| 0,16 | 0,02 | 8 | 1,2 | 0,24 |
| Qv total | | | | |
| 912,384 | | | | |

| tabla 6 QRH | | |
|---------------------------|--|--|
|---------------------------|--|--|

| tabla 6.1 | | |
|------------------|---------------|----------------------|
| # de lámparas | watts lámpara | factor de conversión |
| 16 | 108 | 0,86 |
| Qil | | |
| 1486,08 | | |

tabla 6.2

| | | | |
|---|--------------------------------------|---------|------------|
|  Institución Universitaria | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

| descripción | # de equipos | watts por equipo | factor de conversión | ineficiencia | total kcal/h |
|-----------------------|--------------|------------------|----------------------|--------------|--------------|
| pc escritorio | 10 | 350 | 0,86 | 0,09 | 270,9 |
| tv 55" | 1 | 135 | 0,86 | 0,15 | 17,415 |
| z600 | 2 | 650 | 0,86 | 0,15 | 167,7 |
| dell t7600 | 3 | 1100 | 0,86 | 0,182 | 516,516 |
| Q_{eq} | | | | | |
| | | | | | 972,531 |

tabla 6.3

| # de personas | perdida por persona circulante | factor de conversión |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 6 | 126 | 0,86 |
| Q_{ps} | | |
| | | Q_{RH total} |
| | | 3108,77 |

tabla 7 **Q_{HL}**

| total Q_{HL} | factor de conversión a btu | total btu |
|-----------------------------|----------------------------|------------------|
| 5952,30 | 3,96567 | 23605 |

| | | | |
|--|--|---------|------------|
|  | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

Apéndice D: tabla Excel de cálculos costo energético

| hora | amperaje | voltaje | vattios | Kw |
|-------------|----------|---------|----------|----------|
| 8:00am | 13,92 | 127 | 3005,328 | 3,005328 |
| 8:30am | 14,2 | 127 | 3065,78 | 3,06578 |
| 9:00am | 14,5 | 127 | 3130,55 | 3,13055 |
| 9:30am | 15,05 | 127 | 3249,295 | 3,249295 |
| 10:00am | 16,6 | 127 | 3583,94 | 3,58394 |
| 10:30am | 15,35 | 127 | 3314,065 | 3,314065 |
| 11:00am | 16,2 | 127 | 3497,58 | 3,49758 |
| 11:30am | 15,95 | 127 | 3443,605 | 3,443605 |
| 12:00 p. m. | 16,05 | 127 | 3465,195 | 3,465195 |
| 12:30 p. m. | 16,45 | 127 | 3551,555 | 3,551555 |
| 1:00pm | 16,51 | 127 | 3562,35 | 3,56235 |
| 1:30pm | 16,72 | 127 | 3562,35 | 3,56235 |
| 2:01pm | 15,85 | 127 | 3422,015 | 3,422015 |
| 2:35pm | 15,9 | 127 | 3432,81 | 3,43281 |
| 2:59pm | 15,9 | 127 | 3432,81 | 3,43281 |
| 3:32pm | 16,45 | 127 | 3551,555 | 3,551555 |
| 4:00pm | 16,64 | 127 | 3592,576 | 3,592576 |
| 4:29pm | 16,2 | 127 | 3497,58 | 3,49758 |
| 4:59pm | 15,74 | 127 | 3398,266 | 3,398266 |

promedio
hora
3,39982528

| | | | |
|----|------------|------------------|------------------|
| Kw | \$/((Kw/h) | costo día COP | costo mes COP |
|----|------------|------------------|------------------|

| | | | |
|--|--|---------|------------|
|  Institución Universitaria | INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO | Código | FDE 089 |
| | | Versión | 03 |
| | | Fecha | 2015-01-27 |

3,39982528 440,8 22479,6447 674389,342

Kw/h

50,9973792

costo hora

operación

COP

1498,64298

ahorro diario en COP

22479,6447