

*Universidad de Matanzas
Sede "Camilo Cienfuegos"
Departamento Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Técnicas*



CLIMATIZACIÓN DE EDIFICIOS ALTOS

Ejercicio Culminación de Estudio en Ingeniería Mecánica

Autor: Roberto Romero Díaz.

Tutor: M.Sc. Ing. Jorge Luis Lamas Acevedo.

Matanzas, 2020

DEDICATORIA

A mis Padres y Familia: Hoy se cierra una etapa muy importante en mi vida que después de muchos gratos momentos queda sellada con esta tesis. No existen palabras que puedan expresar todo el agradecimiento a mi madre, abuela, hermanos, tíos, primos que con su inmenso amor me apoyaron en todo este largo camino. En especial a mi abuelo y mi padre que, aunque no están conmigo los llevo siempre en mi corazón. Gracias ...

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas aquellas personas, que de una u otra forma ayudaron a la realización de esta tesis. En especial, quiero agradecer al Profesor Jorge Luis Lamas Acevedo, quien me dio la oportunidad de realizar esta tesis, y me brindó su colaboración y apoyo cuando fue necesario, así como su confianza y amistad.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

En este ejercicio de culminación de estudio se abordan varias ideas conceptuales en la climatización de edificios altos de viviendas multifamiliar de once pisos, para fines de confort, en fase de proyecto el cual tiene concebido la instalación de sistemas partidos (*split system*). Para ellos se analiza la situación actual para este tipo de edificación a través de la revisión del estado del arte actual para proponer un sistema de aire acondicionado central que cumpla con las exigencias del entorno donde está enclavada dicha edificación, así como los requisitos tecnológicos. Se obtuvo como resultado que el sistema propuesto debe ser reemplazado por un sistema de climatización central de volumen de refrigerante variable por las ventajas que trae al instalarse en este tipo de edificio.

Palabras claves: aire acondicionado; edificios altos; sistemas centralizados; ahorro de energía, volumen de refrigerante variable.

ABSTRACT

In this exercise of study culmination several conceptual ideas are addressed in the air conditioning of tall buildings of eleven-story multifamily dwellings, for comfort purposes, in the project phase which has conceived the installation of split systems. For them, the current situation for this type of building is analyzed through a review of the current state of the art to propose a central air conditioning system that meets the demands of the environment where said buildings are located, as well as technological requirements. It was obtained as a result that the proposed system should be replaced by a central air conditioning system of variable refrigerant volume due to the advantages that it brings when installed in this type of building.

Key words: Air conditioner, high rise building, centralized systems, energy save, variable refrigerant volume.

ÍNDICE

Introducción	8
Capítulo 1 Revisión Bibliográfica	11
1.1 Eficiencia energética y bioclimática en edificios.....	11
1.1.1 Certificación energética	11
1.2 Estimación de la carga térmica en edificios.....	18
1.3 Proceso de enfriamiento y deshumidificación	21
1.4 Sistemas centralizados de aire acondicionado para climatización.....	23
1.5 Métodos de ahorro energético en instalaciones centralizadas de aire.....	26
Capítulo 2 Materiales y métodos	30
2.1 Características y emplazamiento de la instalación.....	30
2.2 Parámetros considerados para realizar la comparación de los sistemas de aire acondicionado.	33
2.3 Análisis de los sistemas de aire acondicionado propuestos.	33
2.3.1 Sistema de aire acondicionado central por agua helada.....	33
2.3.2 Sistema de aire acondicionado por VRF.....	36
2.4 Análisis de ubicación de los sistemas propuestos.....	38
2.5 Valoración económica de la propuesta	39
2.5.1 Costo de Adquisición, Instalación y Puesto en Marcha.....	39
2.5.2 Expresión general del Costo del Ciclo de Vida de un sistema de climatización.	42
2.5.3 Factores Económicos Asociados al CCV	43
Conclusiones	45
Recomendaciones	46
Referencias Bibliográficas	47
Bibliografía	47
Anexos	49
Anexo 1	49

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de confort climático es una necesidad que se ha procurado desde siempre. La tecnología y las investigaciones han conducido a desarrollar equipos que funcionen de manera diversa para conseguir estos objetivos, pero también aprovechando lo que la naturaleza ofrece.

Desde el descubrimiento en la década de los años 70 del pasado siglo del daño que causaban los refrigerantes fluoroclorados a la capa de ozono y posteriormente el calentamiento global provocado por el desprendimiento de dióxido de carbono (CO₂), principalmente, por la quema de combustibles fósiles ha sido de gran preocupación para la comunidad científica y ambientalista mundial para tratar de mantener una especie en peligro de extinción, la especie humana.

Como símbolo de modernidad y desarrollo las edificaciones están presente en todas las ciudades, sean grandes metrópolis o pequeños asentamientos, variando su altura desde pocos hasta cientos de metros de altura.

En el mundo, el sector de las edificaciones es el mayor contribuidor con un tercio de las emisiones globales de contaminantes. En la actualidad, y de acuerdo con los datos de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), el sector de edificios contabiliza del 25% al 40% del consumo final de energía de los países miembros de esta organización, y se espera que consuman más a medida que la población crezca y se desarrolle económicamente. En la región del Caribe y Centro América (Hidalgo & Pérez Guerra, 2016), un edificio destina más del 60% de su demanda energética a satisfacer los requerimientos del consumo de los sistemas de aire acondicionado, ventilación y calefacción, por sus siglas en inglés *HVAC*, que preservan el entorno confortable y saludable de los edificios. La más mínima ineficacia en los equipos de refrigeración y calefacción crea unas pérdidas de energía enormes, con un impacto económico significativo.

Por tal motivo, se hace necesario el uso eficiente y racional de la energía con el propósito de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, en el caso de este trabajo se

analiza el sistema de climatización en un edificio residencial ubicado en la Ciudad de la Habana, de forma tal que su implementación permita trazar estrategias de mantenimiento y operacionales que permitan obtener un funcionamiento con los menores gastos energéticos posibles sin afectar el servicio brindado por el inmueble.

La tendencia actual en la construcción y manejo de estas instalaciones está guiada por una serie de certificaciones que permiten clasificarlos como amigables con el medio ambiente, incluso desde su fase de proyecto y un reto para los edificios ya en funcionamiento, entre ellas están las certificaciones:

- Verde.
- LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*): Líder en energía y diseño ambiental.
- BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*): Método de evaluación y certificación de la sostenibilidad de la edificación técnicamente.

El sistema de acondicionamiento de aire propuesto, por la empresa responsable del proyecto, para lograr las condiciones termohigrométricas en cada una de las habitaciones y locales es mediante la instalación de sistemas partidos (*split system*), los cuales como es conocido necesitan de cortas distancias de interconexión entre las unidades que lo conforman, esto en ocasiones trae problemas asociados al ruido de la unidad exterior y problemas de mantenimiento al quedar a una altura considerable dicha unidad, por otro lado, estos sistemas están diseñado para el funcionamiento y operación de forma independiente por lo que imposibilita la toma de decisión y trazar estrategias en aras de lograr una eficiencia energética sostenible en la edificación, además de no permitir el aprovechamiento del calor rechazado en el proceso de condensación para la producción de agua caliente sanitaria y es justamente lo planteado anteriormente el **problema científico** de este trabajo de diploma.

La **hipótesis** descansa sobre la base que es posible modificar o cambiar el sistema propuesto para el acondicionamiento de aire de los locales por otro que dé respuesta al problema científico formulado.

Para cumplimentar de forma acertada el problema e hipótesis planteada fue trazado el **objetivo general** del trabajo que consiste en la propuesta de un sistema de aire en la edificación que dé cumplimiento a lo expuesto previamente.

Los **objetivos específicos** del trabajo son:

1. Analizar las tendencias actuales en la climatización de edificios residenciales.
2. Revisión detallada del proyecto de arquitectura para saber la disponibilidad de área para la instalación de equipos y tuberías.
3. Realizar comparación entre los sistemas de climatización de edificaciones.
4. Realizar un análisis económico de la propuesta.

CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para dar cumplimiento del marco teórico de este trabajo se realiza una extensa búsqueda bibliográfica que permitirá abordar el estado del arte en la climatización de edificios y los sistemas centralizados más usados en la actualidad, así como los aspectos fundamentales para la determinación de la carga térmica y el proceso psicrométrico que permite obtener las condiciones de confort requerida para este tipo de instalación.

1.1 Eficiencia energética y bioclimática en edificios

Una edificación desde el período de concepción hasta la utilización para la que fue concebido debe prever, desde un punto de vista energético y de confort térmico, los efectos climáticos sobre la evolución termodinámica del sistema. Un edificio representa un sistema termodinámico abierto, de paredes adiabáticas y en situación permanente de inestabilidad; su estado termodinámico en cada instante se define como la respuesta a las variaciones externas e internas de esta construcción. El diseño energéticamente eficiente y consiente pasa por el aprovechamiento de los recursos naturales del lugar donde se irgue la construcción. Para ello es preciso que existan las condiciones adecuadas para que estos recursos puedan ser empleados (Bravo, 2015).

1.1.1 Certificación energética

El Certificado Energético de un Edificio es un documento oficial redactado por un técnico competente que incluye información objetiva sobre las características energéticas de un inmueble, de tal modo que, la certificación energética califica energéticamente un inmueble en relación con el consumo anual de energía necesario para satisfacer la demanda energética de un edificio en condiciones normales de ocupación y funcionamiento. (incluye la producción de agua caliente, calefacción, iluminación, refrigeración y ventilación). La escala de calificación energética es de siete letras y varía entre las letras A (edificio más eficiente energéticamente) y G (edificio menos eficiente energéticamente). (autores, 2018)

Todo Certificado de Eficiencia Energética tendrá como mínimo:

1. Identificación del edificio o, si es el caso, de la parte del mismo que se certifica
2. Identificación del procedimiento escogido para la obtención de la calificación energética de un edificio (opción general, programa informático u opción simplificada) indicando la siguiente información:
 - Descripción de las características energéticas del edificio, envolvente térmica, condiciones normales de funcionamiento y ocupación, instalaciones y otros datos utilizado para obtener la calificación energética del edificio
 - Identificación de la normativa sobre el ahorro y eficiencia energética que le era de aplicación en el momento de construcción (si existiera).
 - Descripción de las comprobaciones, pruebas e inspecciones llevadas a cabo por el técnico certificador, durante la fase de calificación energética con la finalidad de establecer la conformidad de la información contenida en el certificado energético
3. Calificación de la eficiencia energética del edificio expresada mediante la etiqueta energética
4. Documento que recoja las medidas recomendadas por el técnico certificador, clasificadas según su viabilidad técnica, funcional y económica, así como por su repercusión energética, que permitan, en el caso de que el propietario del edificio decida acometer voluntariamente esas medidas, que la calificación energética mejore como mínimo un nivel en la escala de calificación energética.

Existen en el mercado internacional empresas que otorgan sellos de sostenibilidad, a aquellos edificios que cumplen una serie de criterios. Cada sello, tiene su particularidad, y pone el acento en una cuestión, pero en el fondo todos tienen la misma filosofía: que el

edificio sea lo más respetuoso posible con el medio ambiente, y, por tanto, energéticamente eficientes.

Estos certificados tienen en cuenta además elementos como entorno, recursos naturales, uso, tipo de suministros de energía, componentes y materiales para su fabricación, reciclaje de los recursos naturales, etc.

Certificación Verde

Este es un edificio que, en su diseño, construcción u operación, reduce o elimina los impactos negativos y puede crear impactos positivos en nuestro clima y entorno natural.

Un edificio verde debe cumplir estas características:

- Uso eficiente de energía, agua y otros recursos
- Uso de energía renovable, como la energía solar
- Medidas de reducción de contaminación y desperdicio, y la habilitación de reutilización y reciclaje
- Buena calidad del aire ambiental en interiores
- Uso de materiales no tóxicos, éticos y sostenibles
- Consideración del medio ambiente en el diseño, construcción y operación
- Consideración de la calidad de vida de los ocupantes en el diseño, construcción y operación
- Un diseño que permite la adaptación a un entorno cambiante

Estas características tienen alguna variedad dependiendo del país o región, como condiciones climáticas distintas, culturas y tradiciones únicas, diversos tipos de edificios y edades, o prioridades ambientales, económicas y sociales.

Cualquier edificio puede ser ecológico, ya sea un hogar, una oficina, una escuela, un hospital, un centro comunitario o cualquier otro tipo de estructura, siempre que incluya las características enumeradas anteriormente.

Certificación *LEED*

LEED proporciona una aproximación a la sostenibilidad del edificio mediante el reconocimiento de su rendimiento en cinco áreas clave de la salud humana y el medio ambiente: emplazamiento sostenible, ahorro de agua, eficiencia energética, selección de materiales y calidad medioambiental.

La Metodología *LEED* establece una lista de créditos que recogen una serie de medidas de reducción de impacto, y, posteriormente, crea una matriz que relaciona el peso de las categorías de impacto situadas en un eje y los créditos evaluados en *LEED* en el otro eje. Esta matriz se utiliza para asignar que créditos están relacionados con qué impactos, y en qué grado.

Esta certificación está disponible para todos los tipos de construcción incluyendo: las construcciones nuevas y las remodelaciones de gran magnitud, edificios existentes, los interiores comerciales, estructura y fachada, escuelas, centros de salud, establecimientos comerciales y el desarrollo de vecindades.

Certificación *BREEAM*

Es el método de certificación y evaluación más avanzado de la sostenibilidad de la edificación. Favorece una construcción más sostenible que se traduce en una mayor rentabilidad para quien construye, opera y/o mantiene el edificio; la reducción de su impacto en el medio ambiente; y un mayor confort y salud para quien vive, trabaja o utiliza el edificio.

La certificación *BREEAM* evalúa impactos en 10 categorías: Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso ecológico del suelo, Contaminación e Innovación.

Luego otorga una puntuación final tras aplicar un factor de ponderación ambiental que tiene en cuenta la importancia relativa de cada área de impacto. Comprende las distintas fases de diseño, construcción y uso de los edificios y dispone de esquemas de evaluación y certificación en función de la tipología y uso del edificio.

La Arquitectura Bioclimática

Es el diseño y construcción de edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas y medioambientales: El Sol, la vegetación, la lluvia, los vientos, la altitud, el terreno... Si conocemos bien esas condiciones y construimos de acuerdo con ellas, podemos aprovechar sus beneficios y adaptarnos mejor al terreno que ocupamos, y así disminuir los impactos ambientales, intentando reducir los consumos de energía (Rufat, 2020).

Una vivienda bioclimática puede conseguir un gran ahorro e incluso llegar a ser sostenible en su totalidad. Aunque el costo de construcción puede ser mayor, puede ser rentable, ya que el incremento en el costo inicial puede llegar a amortizarse en el tiempo al disminuirse los costos de operación.

Elementos a tener en cuenta en la arquitectura bioclimática

A la hora de diseñar un edificio, este tipo de arquitectura se basa en las condiciones climáticas del entorno con el fin de aprovechar los recursos disponibles con el menor impacto ambiental y con el objetivo de obtener el menor consumo energético posible para la vivienda.

Las condiciones del suelo

La elevada inercia térmica del suelo produce un efecto climático que puede ser aprovechado en este tipo de arquitectura ya que amortigua y retarda la variación de temperatura que se produce entre el día y la noche. El semienterramiento de edificios o de alguna de sus fachadas puede contribuir a aprovechar la capacidad de acumulación calorífica del suelo y, además, hay que tener en cuenta que una capa de tierra puede actuar como aislante adicional.

La orientación

La orientación de las envolventes transparentes hacia el sur, dejando que la radiación solar pueda penetrar a través del vidrio calentando los elementos del interior, permitirá aprovechar esa energía en los meses de invierno. En cambio, la orientación de las fachadas opacas hacia el norte contribuirá a evitar pérdidas de calor. Esto siempre teniendo en cuenta las coordenadas de nuestro país.

La utilización de sistemas de captación orientados adecuadamente y otros sistemas de aislamiento como persianas, toldos, contraventanas e incluso la ubicación de cierta vegetación y árboles en el entorno, también permitirán controlar de forma más precisa la climatización de la vivienda optimizando la eficiencia de los sistemas y reduciendo, por tanto, el consumo energético de la misma.

El aislamiento y los materiales empleados en la construcción

La utilización de un adecuado aislamiento tanto térmico como acústico es uno de los factores más importantes en cualquier construcción, pero, además, en la arquitectura bioclimática, tanto el aislamiento como los materiales contemplados en el diseño deben ser sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

Con respecto al aislamiento térmico, en viviendas de uso habitual será conveniente colocarlo hacia el exterior. Esto contribuirá a mantener la temperatura interior. Disponer de una envolvente con gran masa térmica situada dentro del aislamiento sirve, a su vez, para conseguir almacenar la energía.

En cuanto a los materiales idóneos, debemos tener en cuenta que las viviendas con elevada masa térmica se comportan manteniendo una temperatura sin variaciones bruscas, relativamente estable frente a las condiciones externas. Así, materiales de construcción pesados como el hormigón, la piedra natural o el ladrillo pueden actuar como una eficaz masa térmica. Además, son apropiados para este tipo de construcciones.

Sistema de ventilación

El sistema tradicional de tiro térmico con control de caudal y temperatura cobra sentido en este tipo de viviendas, pero es de difícil diseño y limitante a la hora de la construcción.

En cambio, la ventilación mecánica controlada puede aportar a la vivienda bioclimática las condiciones óptimas para los usuarios en términos de renovación y calidad del aire con el objetivo conseguir elevados niveles de salubridad.

Además, también puede aportar la climatización necesaria para un óptimo confort térmico si la construcción ha seguido fielmente el resto de los parámetros anteriores, en cuanto a orientación, aislamiento, etc. El uso de estos sistemas de ventilación previene además de los problemas de humedad, moho y proliferación de ácaros y otros elementos contaminantes del ambiente interior.

Sistemas de enfriamiento evaporativo

En aquellos casos en los que la vivienda esté ubicada en un lugar con un clima cálido y seco podría ser necesaria la utilización de algún sistema para refrescar el ambiente. Los sistemas de enfriamiento evaporativo son idóneos para enfriar el aire en las viviendas bioclimáticas ya que utilizan el agua como refrigerante, y son sistemas que proporcionan un mayor ahorro energético que los sistemas de enfriamiento tradicionales con un menor impacto medioambiental.

En esencia, la arquitectura bioclimática intenta armonizar la construcción con el medio ambiente optimizando los recursos naturales con el fin de cubrir nuestras necesidades de confort con el mínimo consumo energético. Algo tan sencillo como realizar un consumo racional de los recursos naturales y de la energía reduciendo nuestro impacto en el medio ambiente. (Fernández, 2018)

Recomendaciones para disminuir las ganancias térmicas en edificaciones y viviendas:

- 1- Controlar la entrada de radiación solar con toldos, persianas o contraventanas
- 2- En las noches de invierno, cerrar por completo las persianas o contraventanas.
- 3- Crear una ventilación cruzada en verano

- 4- Durante el día en verano cerrar las ventanas totalmente y abrirlas por completo en la noche.
- 5- Pintar el exterior de las construcciones de blanco
- 6- Plantar árboles de hoja caduca en la fachada sur
- 7- Añadir una envoltura vegetal en la fachada sur
- 8- Colocar películas reflectoras en los vidrios de las ventanas.
- 9- Sellar los puntos débiles de puertas, ventanas y persianas.

1.2 Estimación de la carga térmica en edificios

La carga térmica también nombrada como carga de enfriamiento, es la cantidad de energía que se requiere vencer en un área para mantener determinadas condiciones de temperatura y humedad para una aplicación específica (confort humano). Es la cantidad de calor que se retira de un espacio definido, se expresa en kW, kcal/h, BTU/h o TR. (Martínez, 2017)

Para lograr un acondicionamiento de aire dentro de un espacio determinado, así como la conservación de un producto o un proceso de fabricación, debe instalarse un equipo acondicionador de capacidad adecuada y mantener su control durante todo el año. Cuya potencia se determina de acuerdo con las exigencias instantáneas de la máxima carga real o efectiva. Generalmente es imposible medir las cargas reales máximas o parciales en el espacio dado, por lo que es preciso hacer un cálculo estimativo de dichas cargas. (Carrier, 2009)

Para realizar el estimado de la carga térmica requerida con la mayor precisión posible en espacios y edificios, las siguientes condiciones son de las más importantes para evaluar:

- Datos atmosféricos del sitio
- Característica de la edificación, dimensiones físicas
- Orientación del edificio, la dirección de las paredes del espacio a acondicionar

- Momento del día en que la carga llega a su pico
- Espesor y características de los aislamientos
- Cantidad de sombra en los vidrios
- Concentración de personal en el local
- Las fuentes de calor internas
- La cantidad de ventilación requerida

La magnitud de la carga térmica y su composición en sensible y latente, dan a conocer las características de la instalación de climatización, capacidad en baterías de enfriamiento, baterías de recalentamiento (si fueran necesarias), ventiladores, temperaturas de trabajo del ciclo refrigerante y otros muchos aspectos.

Se pueden clasificar las ganancias de calor de un local en externas e internas, denominando externas a aquellas que atraviesan las fronteras del local, e internas a las que se generan en el interior del mismo. Tanto las fuentes externas como las internas pueden ocasionar ganancias de calor sensible y (o) latente, entendiendo por cargas térmicas sensibles aquellas que ocasionan un incremento de la temperatura seca del aire en el local y latentes las que provocan el aumento de su contenido de humedad.

Entre las fuentes de calor externas al local se encuentran:

- La radiación solar a través de superficies acristaladas (carga sensible)
- El calor transmitido a través de las estructuras del local a causa de la diferencia de temperaturas entre el aire en el exterior e interior del local, estas son las denominadas ganancias por transmisión (carga sensible).
- La radiación solar a través de las estructuras (materiales no cristalinos) (carga sensible)
- Las ganancias térmicas originadas por el aire exterior infiltrado a través de grietas o aperturas del local (carga sensible y latente)

Las fuentes de calor internas en el local pueden ser:

- Los ocupantes (carga sensible y latente)
- La iluminación eléctrica (carga sensible)
- Los equipos instalados dentro del local (carga sensible y latente)
- Los motores eléctricos (carga sensible)
- Los procesos de trabajo tecnológico (carga sensible y latente)

Cargas variables

El sol es casi la única fuente de energía externa a la Tierra, de ahí que en el campo de la climatización es de interés el estudio de la radiación solar como fuente de la ganancia térmica en un local a acondicionar, por lo que en este cálculo se incluyen las ganancias de calor, producto de la radiación solar a través de vidrio y las ganancias producto de la transmisión por estructuras constructivas.

La carga variable depende de la ganancia por radiación solar a través del vidrio corregida y de la ganancia solar a través de paredes y techos.

Para determinar la ganancia de insolación a través de vidrios es necesario tener en cuenta ciertos factores:

- La niebla o contaminación atmosférica
- El tipo de marco de ventana
- La altura sobre el nivel del mar
- La variación del punto de rocío
- El hemisferio terrestre

Para paredes y techos:

- Flujo de calor producto de la diferencia de temperaturas entre el aire exterior e interior de la pared.
- Flujo de calor producto de la intensidad de la radiación solar incidente sobre la pared o techo, (Rodríguez G).

Cargas constantes

Se encuentran:

- 1- Ganancia de calor a través de tabiques
- 2- Ganancia de calor por cristales
- 3- Ganancia de calor por infiltraciones a través de puertas y ventanas
- 4- Ganancia de calor por ocupantes
- 5- Ganancia de calor por iluminación eléctrica
- 6- Calor aportado por los motores
- 7- Calor aportado por procesos y equipos
- 8- Calor aportado por vapor
- 9- Ganancia de calor por ventilación exterior

1.3 Proceso de enfriamiento y deshumidificación

El procedimiento consiste en enfriar el aire hasta una temperatura inferior a la del punto de rocío, para ello se hace pasar por una batería de refrigeración, la cual está constituido por un conjunto de tubos, provisto de aletas, por el interior de los cuales circula un refrigerante; el aire se hace pasar por fuera de los tubos y, al entrar en contacto este y las aletas se enfría.

En un proceso ideal, el aire de salida estaría en el punto 2 situado sobre la curva de saturación ($\phi_2 = 100\%$). En principio para llegar del punto 1 al 2' podemos ir por diferentes caminos, por ejemplo, enfriando el aire a presión constante y luego bajando por la curva de saturación (1-1'-2') o mediante un proceso lineal (1-2'). (Ver figura 1)

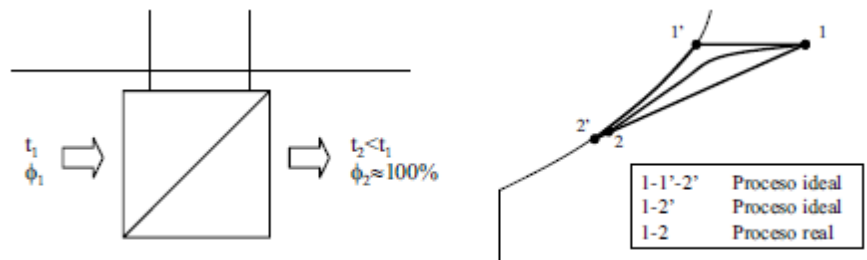


Figura 1. Proceso de enfriamiento y deshumidificación

Aunque en realidad, el proceso describe una curva situada entre las dos anteriores y el aire sale en las condiciones definidas por el punto que está muy cerca de la curva de saturación. Esto es debido a que una proporción del aire que atraviesa la batería no se ve afectado y mantiene intacta sus propiedades psicométricas. Esta proporción se especifica por un parámetro característico de cada batería denominado factor by-pass. Este factor es una forma de indicar la eficiencia de la batería, un factor bajo indica buena eficiencia, (Carrier, 2009), (Miranda, 2000).

1.3.1 Condiciones de confort en locales habitacionales

El término confort puede ser descrito como el estar a gusto en un determinado recinto, pero este término puede tener varios significados desde el punto de vista de quien lo considere.

Existen varias variables a tener en cuenta para la zona de confort:

- ❖ Variables objetivas: temperaturas de bulbo húmedo y seco, radiación, velocidad del aire, humedad, pureza del aire, presión de vapor, calidad del aire, sexo, edad, complexión, arropamiento.
- ❖ Variables subjetivas: Actividad desarrollada por los ocupantes, aclimatación, cultura, estado de salud, color de piel, costumbres alimenticias, percepción del medio. (Olivares R., Romero Paredes, & Ambriz G.)

Para las condiciones de confort se toma en cuenta el mes de julio para verano, y enero para invierno.

Para verano, estas condiciones se toman como temperatura comprendida entre los 23 y 25°C, una humedad relativa entre 45 y 60% y una velocidad del aire que sean menor que:

- a) Con difusión del aire por mezcla: $c = 0,01t - 0,07$
- b) Con difusión del aire por desplazamiento: $c = 0,01 - 0,10$

Siendo:

c = la velocidad del aire en m/s

t = la temperatura en °C

Para invierno la temperatura comprendida está entre 21 y 23°C, la humedad relativa entre 40 y 50%, mientras que la velocidad del aire tiene las mismas condiciones que para verano (Carrier, 2009)

1.4 Sistemas centralizados de aire acondicionado para climatización

El sistema VRV, cuyas iniciales significan "Volumen de Refrigerante Variable", aunque el término más preciso sería "Caudal de Refrigerante Variable", tiene la capacidad de poder variar el caudal de refrigerante aportado a las baterías de evaporación-condensación, controlando así más eficazmente las condiciones de temperaturas de los locales a climatizar. Son sistemas de bomba térmica reversible que permiten conectar varias unidades interiores con una sola unidad exterior a través de dos tuberías de cobre por donde circula el fluido refrigerante.

Este sistema basa su funcionamiento en el motor de compresor, el cual alberga un sistema de variación de frecuencia (entre 20 y 100Hz). Así el compresor trabajará a menor o mayor rendimiento dependiendo de la información recibida del sistema de control del local (termostatos y sondas). Cuando el compresor trabaja a menor potencia se suministra un caudal de refrigerante menor hacia el evaporador-condensador, disminuyendo la cantidad de calor absorbido/cedido a la sala. Así el control de temperatura del local es mucho más preciso. Este control frecuencial del compresor disminuye los paros y puestas en funcionamiento que son motivos de desgaste del mismo.

Con este sistema se consigue se consigue gozar de una independencia climática en cada sala de climatizada. Cada unidad interior trabajará de forma independiente de las demás, solicitando la cantidad de refrigerante que necesite. Una válvula de expansión electrónica dejará pasar la cantidad justa de fluido refrigerante que deberá entrar en la batería.

Con el sistema VRV se dispone de un control climático más preciso. Los compresores de los sistemas de acondicionamiento de aire convencionales son regulados por una acción de todo-nada, es decir el compresor se pone en funcionamiento cuando el termostato perciba una temperatura inferior a la de su punto de consigna y se para cuando detecta una temperatura superior. En cambio, el sistema VRV la regulación de la temperatura es

proporcional. La cantidad de fluido refrigerante bombeado a las baterías aumenta o disminuye proporcionalmente a la proximidad de la temperatura del local respecto del punto de consigna.

En edificios muy altos, conocidos también como rascacielos, los sistemas centralizados son los más usados y adecuados para este tipo de instalación, (sin descartar los sistemas de expansión directa que se ubicarán por pisos) (Ross, 2004), aunque con la particularidad de que la distribución de agua se hace de forma escalonada, estos rascacielos se dividen en porción baja y porción alta, es decir el agua fría se envía hasta una cierta altura donde se ubican intercambiadores de calor, preferiblemente de placas. Allí, el agua procedente de las enfriadoras, absorbe el calor de las partes más elevadas del edificio en dicho intercambiador, esto se hace con el objetivo de evitar que la gran columna de agua, propia de altura de la instalación, pueda dañar los sellos de las bombas debido a la presión que es sometida si se usara un solo bombeo y por otra parte, aseguran la fiabilidad del sistema de tuberías en sus accesorios (autores, Colectivo de, 2011) (Siyang, 2013)

En el polo turístico de Varadero existen varias instalaciones hoteleras cuya altura iguala o supera la altura del edificio objeto de estudio en este trabajo, cuya altura máxima de los 10 niveles es de 35 metros, ejemplo ellos son los hoteles Paradiso, Puntarena, Blau Varadero e Internacional, entre otros. Todas estas instalaciones poseen un sistema de bombeo único, ya sea con un solo circuito de agua en los dos primeros y circuito primario-secundario en los restantes, por lo que se desecha la necesidad de rebombear el agua helada, disminuyendo así los costos en equipamiento e instalación y energía consumida por ellos.

Sistema de aire centralizados

Denominamos un sistema de aire acondicionado central cuando ya no tenemos equipos individuales para determinados ambientes exclusivamente, sino todo un sistema conformado por una o varias unidades manejadoras de aire, un equipo de enfriamiento, un sistema de ductos de aire, etc. Tiene como función acondicionar la mayor cantidad de ambientes localizados dentro de algún lugar como por ejemplo un edificio.

Un sistema central de enfriamiento directo es cuando el sistema está conformado por un equipo enfriador (unidad condensadora), una o varias manejadoras de aire, las que están compuestas por un evaporador (serpentín) donde se expande el gas refrigerante y por encima pasa el aire al cual se le absorbe calor, el aire viaja por ductos hasta los diferentes ambientes a acondicionar.

Un sistema central de enfriamiento indirecto es cuando el sistema está conformado por un equipo de enfriamiento en forma de paquete, dentro de este paquete tenemos uno o varios compresores, un condensador enfriado por agua o aire, un evaporador que generalmente es de tipo expansión seca de tubos y carcasa (acorazado), un control de flujo de refrigerante que usualmente es una válvula de expansión termostática y por supuesto algún refrigerante, en aire acondicionado se ha usado mucho el refrigerante R22 cuando se emplean compresores reciprocantes, a este equipo paquete se le llama *chiller*.

En el sistema central con *chiller* se enfría agua, el agua es bombeada a una gran cantidad de manejadoras dispuestas por todo el edificio y en éstas se enfría el aire que llega hasta los diferentes ambientes.

El uso del sistema directo o indirecto dependerá del tamaño de la instalación ya que para pequeños sistemas de aire acondicionado central hasta unas 20 toneladas, será práctico utilizar un sistema de enfriamiento directo, el uso de *chiller* puede arrancar con instalaciones con capacidades de 20 toneladas aproximadamente.

Tipos de chiller para aire acondicionado

Por el tipo de funcionamiento hay básicamente dos tipos de *chillers*, el tipo absorción y el tipo compresión de vapor que utiliza un compresor para producir una diferencia de presión entre el lado de alta y baja presión.

Los *chillers* por compresión se clasifican por el tipo de compresor que utilizan, mientras el *chiller* por absorción trabaja conforme al ciclo de refrigeración por absorción, y por la naturaleza de este ciclo estos sistemas de refrigeración no utilizan compresor.

Chiller por compresión de vapor

Estos *chillers* están equipados con los cuatro componentes del ciclo de refrigeración:

A- Compresor

B- Evaporador

C- Condensador

D- Elemento de expansión

Las enfriadoras de agua, comúnmente conocidas como *chillers*, están compuestas por los cuatros mencionados anteriormente. Su funcionamiento se basa en la compresión de vapor, el refrigerante procedente del evaporador en estado de vapor es aspirado y comprimido por el compresor, aumentando así su presión y temperatura, para posteriormente ser licuado en el condensador y es aquí donde cede el calor absorbido en el proceso de evaporación y compresión. A la salida de este el mismo se subenfía para garantizar un proceso de expansión adecuado, el cual ocurre a entalpía constante en una restricción que puede ser una válvula de expansión manual o electrónica, aquí el refrigerante disminuye presión y temperatura produciéndose así el efecto frigorífico. A continuación, el refrigerante, siendo una mezcla de vapor y líquido entra al evaporador donde absorbe el calor del local para lograr las condiciones de confort. Seguidamente estos vapores son aspirados por el compresor completándose así el ciclo de refrigeración por compresión de vapor (Escobar, 2006).

1.5 Métodos de ahorro energético en instalaciones centralizadas de aire

Un sistema de aire acondicionado bien proyectado y ejecutado, orientado hacia el ahorro de energía, debe contar con equipos eficientes, uso de combustibles económicos o fuentes de energía alternativas y a esto debe agregarse una correcta operación, mediante temperaturas, velocidad de distribución de fluidos, tiempos de utilización y sistemas de control óptimo. Por otra parte, la aplicación de un adecuado aislamiento térmico y la

mejora en la hermeticidad de los edificios es fundamental, dado que ello implica equipos más pequeños con menor consumo energético durante toda la vida útil.

Los proyectos deben realizarse en función de la característica de la instalación y estructurados de manera coherente, debiéndose efectuar un balance energético con un análisis económico para definir la solución más conveniente. Deben fraccionarse la capacidad de los equipamientos a fin de adaptar la producción de aire acondicionado a la demanda de calor del sistema en la magnitud y momento que se produce, con objeto de conseguir en cada instante, el régimen de potencia más cercano al de máximo rendimiento. (Rondón, 2013)

Se realizaron un estudio integral de un hotel en Cuba que incluyó la valoración de 3 proyectos de mejora basados en estas técnicas de reducción del consumo energético de chillers. Refieren ahorros significativos mediante la aplicación de estrategias de operación y ocupación de la instalación y el ajuste de la temperatura del agua helada en dependencia de la carga de refrigeración estimada para cada día, mientras que el cambio a caudal variable de los sistemas de bombeo de los distintos circuitos que componen el sistema de climatización resulta económicamente desfavorable.

En (Aníbal , y otros, 2002) se hace un análisis de los sistemas de climatización que permite disminuir la carga térmica, entre ellos se mencionan:

- 1- Mantener la temperatura en las cámaras al máximo admitido por los procesos y productos
- 2- Introducir los productos en las cámaras a la menor temperatura posible.
- 3- Aprovechamiento máximo de la capacidad de las cámaras y reducción del número de cámaras en operación.
- 4- Maximizar la superficie común entre cámaras en operación.
- 5- Seccionalización de cámaras subutilizadas.

- 6- Mantener el aislamiento térmico y el sellaje de las cámaras en buen estado y evaluar si en las condiciones actuales su espesor resulta el económico.
- 7- Reducir las entradas de aire exterior mediante adecuada hermeticidad de las puertas, empleo de puertas automáticas, cortinas, y antecámaras, y reducir el tiempo de apertura de las puertas mediante medidas organizativas.
- 8- Reducir la potencia de los equipos interiores. Apagado de luces en cámaras cerradas, uso de iluminación y equipos eficientes.
- 9- Reducción de empaques y soportes innecesarios en el almacenamiento de productos.

Dándole cumplimiento a las recomendaciones planteadas anteriormente podemos lograr un aumento de la eficiencia de los sistemas de climatización. Dentro de las principales medidas están las siguientes:

- 1- Reducción de la presión (temperatura) de condensación.
- 2- Operar con la mayor presión (temperatura) en el evaporador admitida por el proceso o los productos a conservar.
- 3- Operación económica de sistemas con múltiples compresores.
- 4- Recuperación del calor de condensación

Dentro de las acciones del sistema de condensación para ahorrar energía están:

- 1- Correcta ubicación de los condensadores enfriados por aire.
- 2- Tratamiento adecuado del agua de enfriamiento para evitar incrustaciones en las superficies de transferencia de calor de los condensadores y sus efectos en la presión de condensación y eficiencia del ciclo. En el caso de los condensadores evaporativos al igual que en las torres de enfriamiento, el vaciado periódico de la balsa, constituye otra posibilidad de control del fenómeno del ensuciamiento.

- 3- Limpieza periódica de las superficies de transferencia.
- 4- Purga de los gases incondensables del sistema. Purgar o revisar el funcionamiento de las purgas de gases incondensables del sistema.
- 5- Ampliación de la capacidad de los condensadores.
- 6- Lograr un correcto funcionamiento de las torres de enfriamiento.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se exponen la metodología para analizar los sistemas centralizados de agua helada y volumen de refrigerante variable teniendo en consideración los elementos que integrantes en cada uno de ellos, así como el ciclo de vida de ambas instalaciones para poder obtener un análisis económico a largo plazo.

2.1 Características y emplazamiento de la instalación.

El objetivo principal de este trabajo es la búsqueda de una solución para un edificio multifamiliar de diez niveles, a insertar en el área que actualmente se conoce como “El Hueco”, ubicada en Calle 25 entre J y L, en el Reparto Vedado, municipio Plaza de la Revolución.

La parcela objeto de estudio se ubica en una zona actualmente ocupada por instalaciones del MINFAR. Posee un área aproximada de 2 325 m² y se visualiza como un vacío urbano en un área altamente comprometida como lo es el Reparto Vedado, declarado Zona de Protección en marzo de 1999, por los valores histórico – culturales que atesora.

Atendiendo a la protección y preservación patrimonial, el área de estudio se enmarca en la Zona de regulación de Intensidad Urbana III, definida como “... la zona cuyos valores urbanísticos y arquitectónicos preexistentes la definen como de alta intensidad urbana.”

Según el Certificado de Micro localización de fecha 8 de mayo del 2018, se prevé su frente por la Calle 25, con linderos por el fondo, con edificio de viviendas por Calle 23, lateral izquierdo hacia Calle J y lateral derecho entrando hacia la parcela comprometida para la construcción del Hotel K y 23.

Tomando como referente la arquitectura moderna de los edificios tipo torre construidos en El Vedado en los años 50 del pasado siglo, así como un estudio de la arquitectura de las edificaciones existentes en el entorno, la propuesta concibe un edificio alto, compacto, de 10 niveles habitacionales, desarrollado alrededor de un patio interior como aspecto que reinterpreta la arquitectura de la vivienda cubana.

En la inserción del inmueble se cumplen a cabalidad las regulaciones emitidas en la micro localización respecto al mantenimiento de las áreas de acera, parterre, jardín, portal y pasillos laterales y de fondo. De igual forma se cumple con las proporciones reguladas para el primer nivel (4.50 m) y la altura total propuesta para los diez niveles (35 m).

La carpintería prevista para la edificación es de aluminio y vidrio traslúcido, previendo ventanas con tablillas de aluminio tipo *miami*, que faciliten el control de la iluminación y ventilación naturales, combinadas con paños de vidrio fijo traslúcido. En las áreas de balcones y terrazas, la propuesta se permite el uso de balconeras tipo corredera y vidrios fijos combinados con hojas de tipo tropical, que permitan una agradable vinculación exterior-interior, fundamentalmente en los niveles superiores que permiten una agradable vista de la ciudad.

Se propone la ubicación de áreas de fenestración en paredes alternas de los locales, permitiendo una ventilación cruzada en el interior de las mismas. Las ventanas de los dormitorios que dan a las galerías de circulación, deberán tener una altura superior a los 1.80 m, para evitar las visuales al interior de los locales.

La cubierta será considerada como transitable, atendiendo a que es visible desde los niveles superiores del hotel de la parcela aledaña. En ella se tiene en cuenta la ubicación de dos áreas de tanques para el depósito del agua de consumo del edificio, así como exteriorización de los patinejos de ventilación e instalaciones, permitiendo su protección.

Dadas las características topográficas del lugar y las condiciones ingeniero geológicas de la zona la solución de cimentación tendrá que ser ejecutada con pilotes in situ con vigas cabezales y losa fondo estructural no apoyada en el terreno. De igual forma se construirá un muro de contención perimetral cuyo objetivo es proteger el talud existente, permitiendo la ejecución de los dos niveles de sótanos.

La superestructura estará formada por una combinación de columnas, vigas y losa con muros verticales de hormigón armado que tienen la función de tímpanos, cuyo objetivo fundamental será la de tomar gran parte de la carga horizontal producida por el viento.

Para conformar la planta arquitectónica existirán muros y tabiquerías no estructurales que no aportarán al comportamiento estructural de la edificación y que solo serán tomadas como carga.

En cuanto al sistema de acondicionamiento de aire de la instalación, se plantea (EMPI, 2019) que: para la climatización de los dormitorios de las viviendas se recomienda la utilización de un sistema de expansión directa que incluye acondicionadores de aire tipo *Split*. Para garantizar que las unidades exteriores de los sistemas *Split* no sean colocadas en la fachada de la edificación, se dejará un espacio reservado en el patinejo para la colocación de las mismas. En los dormitorios alejados del patinejo se podrá valorar la colocación de la unidad exterior mediante soportes colocados en el muro del pasillo de circulación interior de la edificación. El drenaje de los *Split* se conectará al drenaje pluvial diseñado por la especialidad de hidrosanitaria. En el proyecto técnico ejecutivo se definirá cuantas unidades exteriores de climatización se podrán ubicar en el patinejo según el nivel de ventilación que se garantice en el mismo.

Los patinejos no son más que un espacio anular o hueco dentro del propio edificio con el objetivo de usarlo para el tendido de los sistema tecnológicos, en estos la ventilación se logra de forma natural de manera que, la unidad exterior ubicada en la parte más baja logrará un proceso de condensación adecuado que permita el funcionamiento del *split*, sin embargo, cualquier unidad ubicada por encima de la unidad más baja, aspirará el calor de condensación rechazado por ésta, trayendo consigo altas presiones de condensación que a la postre influirá en el rendimiento del equipo. Por otro lado, y como apreciación personal del autor del trabajo, las unidades exteriores que se ubiquen en los pasillos interiores del edificio crearán un caldeo en dichos pasillos que puede causar molestias a los moradores que transiten por ellos, aunque sea de forma momentánea, además la condensación que se genera en las tomas de servicio de estas unidades exteriores caerá sobre el pasillo a menos que se provean de una bandeja para su recogida.

En (Hernández, 2008) (Ruíz-Ramírez, 2013), se plantea las altas temperatura y la recirculación del aire en el proceso de condensación en nuestro país es la causa de, al menos, 50 % de las roturas en compresores y de forma general coincide este

planteamiento con lo expuesto (McDowall, 2006) en respecto al proceso de condensación del refrigerante.

2.2 Parámetros considerados para realizar la comparación de los sistemas de aire acondicionado.

La selección de un determinado sistema de acondicionamiento de aire para aplicación a ciertos locales o edificación con fines de confort es una decisión importante, de ellos depende la satisfacción del cliente y de los ocupantes, así como de la conveniencia o adaptación del sistema al edificio que sirve.

Las consideraciones más importantes son el aspecto económico, energético y los deseos del que realiza la inversión, esto se traduce en la complejidad del proyecto a realizar. (Carrier, 2009)

Los sistemas que se proponen en este trabajo como ya se ha planteado será un sistema centralizado por agua helada o un sistema central por variación de flujo refrigerante.

Cada uno de ellos tiene características muy diferentes, aunque con el mismo fin, en cuanto a funcionamiento y elementos componentes que se detallarán en el siguiente capítulo

2.3 Análisis de los sistemas de aire acondicionado propuestos.

Para realizar una comparación de los sistemas estudiados es necesario conocer los elementos que contendrán ambos.

2.3.1 Sistema de aire acondicionado central por agua helada.

Cuando nos referimos a un sistema centralizado por agua helada (SCAH), siempre se piensa en las unidades enfriadoras por ser estas las que mayor consumo energético presenta y las de mayor volumen y espacio que ocupan dentro de una edificación.

No obstante, un sistema completo de este tipo está conformado por otros equipos que también consume gran cantidad de energía, aunque no comparables con las de la

enfriadoras y materiales que son imprescindible para el correcto funcionamiento como el sistema de canalización de agua helada y controles de temperatura que garanticen la fiabilidad del sistema.

Dentro de los sistemas por agua existe una gran variedad de aplicaciones en aras de lograr una mayor eficiencia energética y reducción de los gastos de operación y mantenimiento, así como un sistema de zonificación que permita trazar estrategias cuando la ocupación de la instalación sea baja, esto se conoce como distribución por área o seccionamiento de la instalación, de forma general estos pueden ser:

- Sistema de agua helada a caudal constante.
- Sistemas de agua a caudal variable.

Con el objetivo de lograr una mayor eficiencia energética y por ende menos consumo podemos encontrar:

- Sistemas de acumulación térmica mediante calor latente o sensible.
- Sistemas de aprovechamiento de aguas de mar profunda.
- Sistemas de absorción con energía solar térmica o fotovoltaica, entre otros.

Aunque estos sistemas quedan fuera del alcance de este trabajo merecen ser mencionados como una fuente de conocimiento por los ahorros que representan para una institución determinada.

Un sistema centralizado está compuesto: las unidades enfriadoras bombas primarias y secundarias, en caso de tener circuitos primarios y secundarios de agua helada, red de tuberías, aislamiento térmico para evitar condensación de la humedad ambiente y ganancias de calor, unidades terminales y sistema de control de temperatura ambiente en locales.

En los sistemas de agua a caudal constante las unidades terminales están provistas de válvulas de tres vías las cuales desvían el flujo de esta cuando el local alcanza las

condiciones de confort. En estos sistemas los equipos de bombeo trabajan siempre a velocidad constante las 24 horas del día, los 365 días del año por lo que el consumo energético por concepto de bombeo es alto, según (Laurencio, Reiniers Montero, 2010 a) consumen 12 % de la energía demanda por estos sistemas, independientemente de la carga térmica impuesta a este. En este mismo trabajo se afirma que el 92 % de los sistemas centralizados funcionan bajo este régimen de caudal constante lo que presupone un gran consumo de energía. Son de fácil operación y los costos de mantenimiento también se reducen, pero a costa del recurso energético.

Por otro lado, los sistemas de caudal variable difieren del anterior en que se introducen los variadores de velocidad en el circuito secundario de agua fría, los demás elementos anteriormente son comunes para ambos. En los últimos años la variante con mayor impacto energético asociada al trabajo de los SCAH resulta el empleo de variadores de velocidad. Muchos programas de estimación de ahorros mediante el uso de esta técnica, suministrados por los fabricantes de sistemas de climatización, indican las posibilidades de ahorro de electricidad entre un 20 y 50%. Este porcentaje está en dependencia de las características de ocupación de la carga térmica y la relación existente entre las condiciones de diseño interior y la exterior. (Laurencio, 2010 b)

Los sistemas con variadores de velocidad introducen un dispositivo adecuado para que varíe la frecuencia de trabajo y de presión diferencial en la red de tubería del ramal que se ubican o en la propia bomba o en la unidad terminal más alejada del circuito con el objetivo de mandar una señal cuando dicha presión aumente o disminuya, de esta forma se logra un control óptimo de trabajo en la bomba que puede llegar a ahorros entre un 12 y 32 % (Zhenjun Ma, 2008).

El material del sistema de canalización o red de tuberías y sus accesorios, por donde circulará el agua helada hasta las unidades terminales es de acero negro o plástico, aunque en raras ocasiones son de cobre, por lo que el peso de estas llenas de agua y fluyendo será mucho mayor e influirá en la resistencia del edificio.

2.3.2 Sistema de aire acondicionado por VRF.

El sistema VRF apareció a finales de los años 80 del pasado siglo de la mano de un fabricante asiático, por lo que se puede considerar una tecnología joven aún.

Estos sistemas cumplen a la perfección con lo que se demanda hoy en día a un sistema de climatización: facilidad de diseño, flexibilidad, eficiencia energética, fiabilidad, facilidad de instalación, reducido mantenimiento, silencioso, facilidad de uso y respetuoso al medio ambiente.

El parámetro o variable que se modifica en estos sistemas es el caudal o flujo del refrigerante, que se regula gracias a diversas tecnologías en los compresores (*Inverter*) y a las válvulas de expansión electrónicas (*EXV–Electronic Expansion Valve*) o válvulas de modulación de impulsos (*PMV– Pulse Motor Valve*), incorporadas en unidades interiores y exteriores, con el fin de ajustar la capacidad a la demanda. La idea no es otra que entregar a cada unidad interior el refrigerante (potencia frigorífica) que demanda la zona que climatiza. De esta manera se consigue que el consumo no es total del sistema, sino que es función de la potencia que se entrega.

Debido a que se pueden conectar numerosas unidades interiores en el mismo circuito de tuberías de cobre por donde circula el refrigerante, permite disponer de una importante independencia climática, para obtener una amplia zonificación del sistema de climatización.

La novedosa tecnología *Inverter* incorpora uno o varios compresores *Inverter* que funcionan con variadores de frecuencia (*VFD, Variable Frequency Drive*) que le permiten variar su velocidad de rotación para ajustar el flujo de refrigerante. Algunas pruebas de campo han demostrado que esta tecnología puede reducir el consumo de energía en un rango de 30 % a 40 % por año en comparación con compresores convencionales de tipo reciprocante o rotativos. El ahorro energético que se puede lograr con un sistema VRF en comparación con un sistema de agua helada es dependiente del proyecto en cuestión. Las simulaciones aún están limitadas en ciertos aspectos y no logran representar en su totalidad las distintas posibilidades que pueden presentarse en la

realidad. Además, el consumo de un sistema de aire acondicionado depende del clima de la zona, así que el ahorro logrado con VRF dependerá de dónde se haga el estudio comparativo al igual que del sistema que se tome como referencia para hacer la comparación.

El hecho de que los sistemas VRF tengan la capacidad de adaptarse a cambios sutiles en la demanda del ambiente genera una alta eficiencia a carga parcial. Esto resulta en una alta eficiencia energética ya que los sistemas de aire acondicionado operan la mayoría del tiempo en un rango de 40 % a 80 % de su capacidad máxima. Por esta misma razón, los sistemas de agua helada operan en ciclos, arrancan y se paran, acorde a la demanda de enfriamiento, lo que provoca picos de demanda de corriente, lo que aumenta el consumo energético. Por su parte, los sistemas VRF operan continuamente y adaptan su capacidad efectiva a la demanda en tiempo real, sin necesidad de apagarse y conectarse constantemente.

Estos sistemas son de expansión directa por lo que se no existen válvulas reguladoras de presión ni es necesario el equilibrado del sistema para lograr una distribución de la sustancia refrigerante como en el caso de los sistemas por agua.

Están conformados por tuberías y accesorios de cobre aisladas térmicamente de menor diámetro y muchos más ligeras que las tuberías de acero o plásticas que se utilizan en los sistemas de agua.

Algunas fuentes estiman que un sistema VRF es entre 5 % y 20 % más costoso que un sistema de agua helada, enfriado por agua o por aire, o que un sistema compacto de expansión directa con una capacidad de enfriamiento equivalente. Esto se debe a las tuberías de refrigerante hechas de cobre y a las múltiples unidades evaporadoras con un sistema de control asociado.

Estos sistemas son ideales para aplicaciones de carga variable, ya que el régimen del compresor Inverter se adapta a la variabilidad de la carga térmica del edificio. Las principales aplicaciones comerciales y residenciales son en oficinas, hoteles, comercio, viviendas unifamiliares, remodelaciones de edificios, etc.

2.4 Análisis de ubicación de los sistemas propuestos

Para la ubicación del sistema de aire acondicionado centralizado del edificio multifamiliar se tuvo en consideración el área ocupada por las enfriadoras, sabiendo que su capacidad frigorífica será de 316 kW. En el caso del sistema centralizado por agua helada se debe considerar el área que abarca la (s) bomba (s) de tener circuito primario-secundario, no obstante, se estima el área que ocupa la bomba que trabajará con la enfriadora a partir de caudal necesario que garantice una diferencia de temperatura de 5°C, siendo de 63,2 m³/h. En el proyecto de la edificación no está concebida un espacio, por pequeña que sea, para una sala de maquina donde ubicar el o los equipos de bombeo.

Actualmente, en las instalaciones hoteleras de nuestro país la marca de enfriadoras más comercializada es *Climaveneta*, una compañía italiana de prestigio internacional, por lo que basaremos las dimensiones de dichas enfriadoras (*Climaveneta*), a modo referencial, en los modelos de esta marca, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla #1: Dimensiones de las enfriadoras de agua. Fuentes: Climaveneta.

Capacidad 316 kW	Largo (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)
Una sola unidad	4000	2260	2430	3790
Dos unidades de 158 kW (c/u)	3110	2222	2150	1710

Por otra parte, las unidades del sistema VRF no incluyen bombas centrífugas y sus dimensiones según son mucho menor que la del sistema por agua helada.

Según plano de la edificación, (anexo 1), los linderos del hotel son de 2 metros por la parte norte y este y por la oeste y sur es de 5 metros, este último será aprovechado para prestar el servicio de aparcamiento de los vehículos a los residentes del edificio

multifamiliar, por lo que se hace necesario disponer del techo de dicha edificación para la ubicación del sistema de aire acondicionado. Por otro lado, el peso de equipamiento de las enfriadoras de agua es un factor importante a tener en cuenta por la carga que este representa para la estructura del inmueble.

2.5 Valoración económica de la propuesta

El análisis del Costo del Ciclo de Vida (CCV) es una herramienta de gestión que puede ayudar a las empresas a minimizar las pérdidas y a maximizar el rendimiento energético de muchos tipos de sistemas, incluyendo los de climatización.

En el método para el cálculo del CCV depende de varios factores que intervienen en el costo de adquisición y de propiedad de la instalación. Los cuales se detallan en esta continuación y fue usado con éxito en (León, 2018):

Expresión básica asociada con el Costo de Ciclo de Vida:

$$CCV = C_{Adq} + C_{Prop} \quad (2.1)$$

donde:

C_{Adq} = Costo de adquisición

C_{Prop} = Costo de propiedad

2.5.1 Costo de Adquisición, Instalación y Puesto en Marcha.

El diseñador e inversionista debe decidir el desarrollo final del sistema de climatización. Otras opciones importantes son la calidad del equipo seleccionado las cuales pueden incrementar los costos iniciales pero que reducirán el costo del ciclo de vida. Los sistemas de climatización pueden ser instalados por un suministrador de equipos, un contratista o personal propio, esta decisión depende de varios factores, incluyendo los métodos, herramientas y equipos necesarios para realizar la instalación; requerimientos del proceso contractual, normas reguladoras de la construcción, y la disponibilidad de personal instalador competente.

Estas y otras opciones deben afectar en incrementar los costos iniciales pero que reducirán el costo de ciclo de vida. El costo de Adquisición, Instalación y puesto en marcha:

- Estudio técnico (diseños y planos, especificaciones iniciales).
- Pruebas e inspecciones.
- Inventario de piezas de repuesto.
- Colocación y anclaje del equipo en la solera.
- Conexión de los tubos
- Conexión de los componentes eléctricos y la Instrumentación.
- Conexión de los sistemas auxiliares y otros.
- Accesorios.
- Puesta a punto y arranque.
- Costo de entrenamiento.

$$C_{Adq} = C_{Inv} + C_{Inst} \quad (2.2)$$

donde:

C_{Inv} = Costo de inversión

C_{Inst} = Costo de instalación

Costo de Propiedad

Los costos de propiedad, que con frecuencia son el componente mayor del CCV, tienen incluido los siguientes costos:

- Costo de Operación
- Costo de Mantenimiento (Mantenimiento preventivo y correctivo)
 - ❖ Costo de unidades de repuesto
 - ❖ Costo de Agua

❖ Costo de Tratamiento de agua

- Costo de Energía

$$C_{Prop} = C_{Oper} + C_{Mant} + C_{En} \quad (2.3)$$

donde:

C_{Oper} = costo Operaciones

C_{Mant} = Costo de Mantenimiento

C_{En} = Costo de Energía

Costo de Operación

Los gastos de operación son costos de mano de obra relacionados con la operación del sistema de climatización. Éstos varían extensamente dependiendo de la complejidad y el deber del sistema. Un sistema automatizado podría requerir la supervisión limitada, pero, por otro lado, la observación habitual del sistema en operación puede alertar a los operadores las potenciales pérdidas en el rendimiento del sistema que pueden ser, temperatura, el consumo de energía, y la presión.

Costo de Mantenimiento (Mantenimiento preventivo y correctivo)

Para obtener una vida óptima de trabajo de un sistema de climatización centralizada, se requiere un servicio regular y eficiente. El fabricante avisará al usuario sobre la frecuencia y la carencia del proceso de mantenimiento (estamos hablando de mantenimiento preventivo).

El rendimiento de los *chillers* no depende solamente sobre su operación correcta, pero también en el mantenimiento que consiste de un amplio alcance de las tareas. Los ejemplos incluyen la inspección de su estado físico; lubricación de piezas móviles; la limpieza de depósitos; rellenos de refrigerante; la prueba de componentes críticos; la calibración de dispositivos medición; la reparación de piezas dañadas (mantenimiento correctivo); la sustitución de componentes defectuosos (mantenimiento correctivo).

Aunque los fallos inesperados no pueden ser precisamente pronosticados, pueden ser calculados estadísticamente calculando tiempo medio entre fallos para que puedan aplicar un mantenimiento preventivo al sistema.

Costo de Energía

El consumo energético es muy a menudo el mayor elemento de costo que va a presidir el ciclo del costo de vida, principalmente en sistemas de climatización que trabajan el año completo. El consumo energético se calcula primero recopilando los datos del modelo de funcionamiento del sistema o del fabricante. Si la salida es continua, el cálculo es simple.

Si la salida varía con el tiempo, entonces es necesario establecer un seguimiento histórico, basándose en los ejemplos de uso establecidos. Este ejemplo puede ser complementado por un gráfico de producción de salida, frente al tiempo sobre el ciclo de vida, el cual puede ser en horas, días, semanas, meses o años. (Fernández, 2003). El uso es entonces analizado para determinar el tiempo perdido en la entrega de las relaciones de salida. Para finalizar este apartado, la energía y los costos de consumo de material para servicios auxiliares necesitan ser incluidos. Estos costos pueden provenir de circuitos de calefacción de apoyo.

2.5.2 Expresión general del Costo del Ciclo de Vida de un sistema de climatización.

$$CCV = C_{Adq} + C_{Prop} \quad (2.4)$$

donde:

C_{Adq} =Costo de adquisición

C_{Prop} =Costo de Propiedad

$$CCV = C_{Inv} + C_{Inst} + C_{Oper} + C_{Mant} + C_{En} \quad (2.5)$$

donde:

C_{Inv} =Costo de Inversión

C_{Inst} =Costo de Instalación

C_{Oper} =Costo de Operaciones

C_{Mant} =Costo de Mantenimiento

C_{En} =Costo de Energía

2.5.3 Factores Económicos Asociados al CCV

El análisis de costo total, operación y comparaciones de alternativas requiere un conocimiento de los costos de oportunidades perdidas, inflación y valor de dinero en el tiempo. El análisis económico de las alternativas cae en dos categorías generales:

- Análisis simple de Amortizaciones
- Análisis del Costo del ciclo de vida

El análisis económico debe que considerar detalles de todos los costos durante el período de estudio, como variación de inflación, costo de capital e interés, deducciones de interés, depreciación e impuestos. Cada análisis económico detallado, debe utilizar el método de valor presente neto (VPN) para analizar el valor de dinero en el tiempo. El valor presente neto total se determina por la suma de todos los valores presentes de todos los artículos individuales.

$$VPN = F_x * PFW(i, n)_{ser} \quad (2.6)$$

donde:

F = Valor futuro de una cantidad de dinero

$$F = P(1 + i)^n$$

$PFW(i, n)$ = pagos de serie iguales

$$PFW(i, n)_{sgl} = 1/(1 + i)^n \quad (2.7)$$

donde:

i = Interés real (inflación)

n = Años

Tasa de Interés Real (Inflación)

Es el interés que tiene en cuenta los efectos de la inflación. La inflación o devaluación del dinero, reflejada por aumento de los precios en el mercado, puede incluirse en los análisis de inversiones calculando una tasa de interés real (tasa en moneda constante):

$$i' = \left(\frac{1+r}{1+f} \right) - 1 = \frac{i-j}{1+j} \quad (2.8)$$

j = Tasa de inflación

VPN con la tasa de Interés Real

$$VPN = F_x * PFW(i', n)_{ser} \quad (2.9)$$

$$PFW(i, n)_{sgl} = \frac{1}{(1+i')^n} \quad (2.10)$$

donde:

i = Interés real (inflación)

n = Años

CONCLUSIONES

1. El sistema de aire acondicionado propuesto en la concepción inicial del proyecto, de sistema partido, es inadecuado debido a que no cumple con los requisitos de edificación sustentable.
2. La ubicación de las unidades exteriores en los patinejos no garantizarán el funcionamiento eficiente de los *Split*.
3. Desde el punto de vista técnico, el empleo de un sistema centralizado de agua helada con bombeo primario-secundario o el sistema VRF permite trazar estrategias de zonificación con el aumento de la eficiencia energética de la edificación, haciéndola más amigable con el medio ambiente y permiten recuperar calor.
4. Los sistemas propuestos están acorde a la tendencia mundial de climatización en edificios multifamiliares.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis económico, basado en el ciclo de vida, de las variantes propuestas en base a ofertas comerciales de proveedores establecidos en el país.
2. Implementar los cambios propuestos en este trabajo para aumentar la eficiencia energética en el edificio.
3. Realizar las nuevas inversiones teniendo como base los conceptos de edificación sustentable.

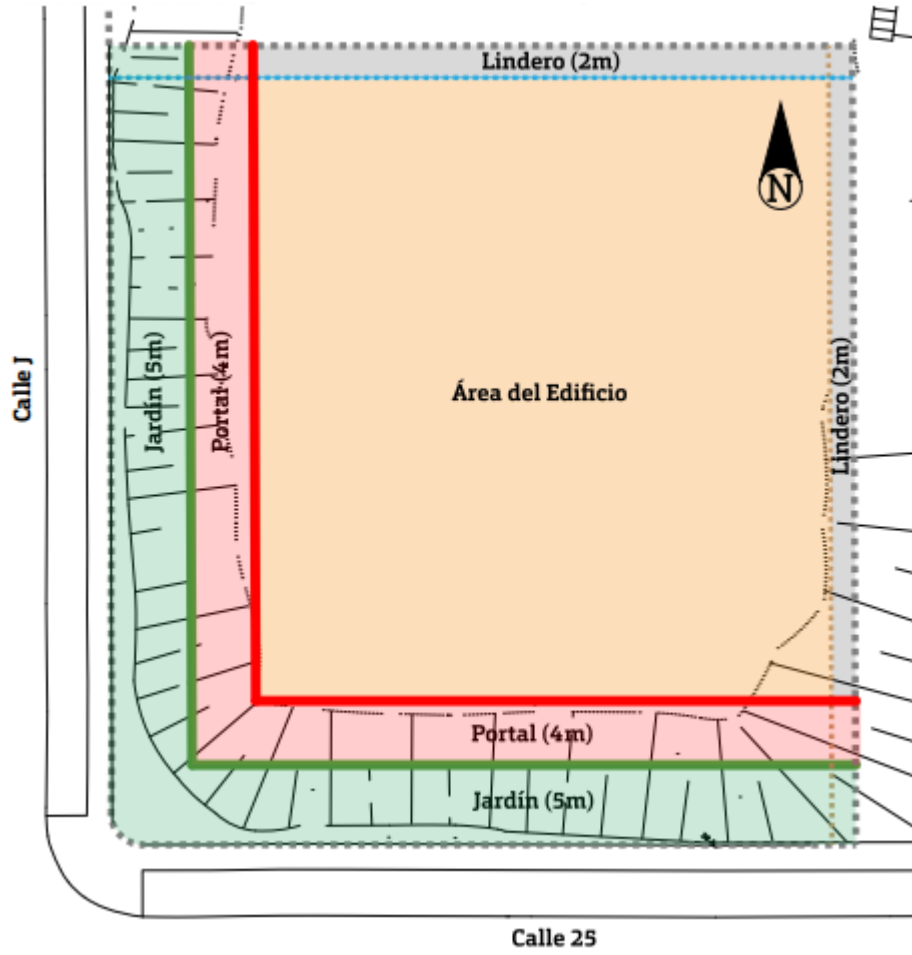
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aníbal , B., Marcos de Armas, T., José , P., José , M., Milagros , M., & Sergio , M. (2002). AHORRO DE ENERGIA EN SISTEMAS TERMODINAMICOS. Cienfuegos: Universidad de cienfuegos.
- autores, C. d. (2018). *Estrategias de Edificios de Energía Casi Nula*. Valladolid: AEICE.
- autores, Colectivo de. (2011, Noviembre). *HEATING AND COOLING IN HIGH-RISE BUILDINGS USING FAÇADEINTEGRATED TRANSPARENT SOLAR THERMAL COLLECTOR SYSTEMS*. Sidney, Australia.
- Bravo, D. (2015). Climatización solar de edificaciones. Centro Azúcar. 42(2).
- Carrier. (2009). Manual de aire acondicionado. Barcelona.
- Climaveneta. (n.d.). Catálogo Comercial. From www.climavenida.com
- EMPI. (2019). Memoria descriptiva. La Habana.
- Escobar, J. F. (2006). CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS MECÁNICOS. Guatemala.
- Fernández, I. (2018). *Arquitectura sostenible*. From <https://arquitectura-sostenible.es/la-arquitectura-bioclimatica-disenar-edificios-en-funcion-de-las-condiciones-del-entorno/>
- Hernández, S. M. (2008). Reducción del Consumo de Energía en Instalaciones con sistemas de climatización centralizados todo-agua a flujo constante. Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
- Hidalgo, D. B., & Pérez Guerra, Y. (2016). Eficiencia energética en la climatización de edificaciones. Quito- Ecuador.
- Laurencio, R. M. (2010 b).
- Laurencio, Reiniers Montero. (2010 a). Caudal variable en la climatización centralizada de hoteles (Parte 1). *Retos Turístico, Volumen 9*(Número 3).
- León, J. M. (2018). USO DE LA ENERGÍA SOLAR EN SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO CENTRAL POR ABSORCIÓN. Matanzas.
- Martínez, M. Á. (2017). Comportamiento energético de la recuperación de calor y balance dinámico en las instalaciones de climatización en el Hotel Packard. *Trabajo de Diploma*.

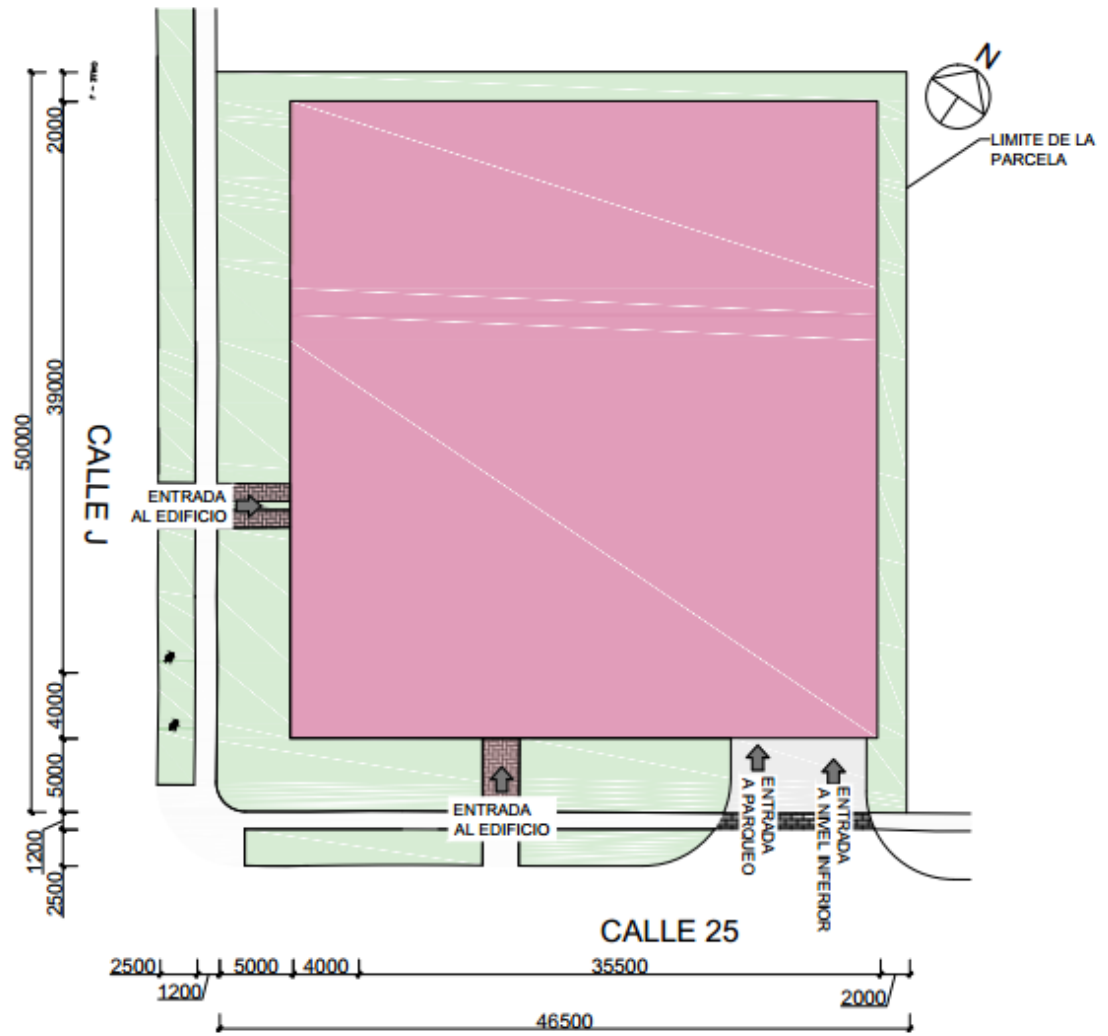
- McDowall, R. (2006). *FUNDAMENTALS OF HVAC SYSTEMS*. Estados Unidos: Elsevier.
- Miranda, A. L. (2000). Nueva enciclopedia de la climatización: Aire Acondicionado. España: CEAC.
- Olivares R., F., Romero Paredes, H., & Ambriz G., J. J. (n.d.). BASES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LOS NIVELES DE CONFORT EN LOS DIFERENTES CLIMAS PRESENTES EN LA REPUBLICA MEXICANA. México.
- Rodríguez G, H. (n.d.). Guía para el Cálculo de las Cargas Térmicas en los Edificios.
- Rondón, R. (2013). EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y EXERGÉTICA DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADA POR AGUA HELADA EN EL EDIFICIO PRINCIPAL DE LA UNIVERSIDAD BOLIVARIANA DE VENEZUELA. Caracas.
- Ross, D. E. (2004). Design Guide for Tall Commercial Buildings . (2003117180).
- Rufat, C. E. (2020). *Arquitectura y salud*. Retrieved Julio 6, 2020 from <https://www.arquitecturaysalud.com/bioclimatica/que-es-la-bioclimatica>
- Ruíz-Ramírez. (2013). Análisi de Costos de Operación Exergoeconómicos a un Ciclo Teórico de Refrigeración por Compresión de Vapor usando HFC-134a. *Revista Mexicana de Ingeniería Química, Volumen 12*(Número 2).
- Siyang, S. I. (2013). HVAC System Energy-Saving Design fot One Super-high Office Building. *International Journal of High-Rise Buildings Volume 2 Numer 4, 2(4)*.
- Zhenjun Ma, S. W. (2008). Energy efficient control of variabl e speed pumps in complex building. Kowloon, Hong Kong.

ANEXOS

Anexo 1



Linderos de la edificación



Vista en planta



Vista frontal del edificio multinacional