



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
FACULTAD DE ARQUITECTURA, FES ARAGON E INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS

Metodología para la sustentabilidad energética en la climatización de
edificios con sistemas pasivos, activos e híbridos

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

AGUSTÍN TORRES RODRÍGUEZ

Director de Tesis:

Dr. David Morillón Gálvez
Instituto de Ingeniería

Comité tutor:

Dr. Daniel Aldama Ávalos
FES Aragón

Dr. José Diego Morales Ramírez
Posgrado de Arquitectura

Dr. Víctor Hugo Hernández Gómez
FES Cuautitlán

Mtro. En Arq. Francisco Reyna Gómez
Posgrado de Arquitectura

Ciudad Universitaria, CD. MX.

noviembre 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tutor:

DR. MORILLÓN GÁLVEZ DAVID

Instituto de Ingeniería, UNAM

Cotutores:

DR. ALDAMA ÁVALOS DANIEL

Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

DR. MORALES RAMÍREZ JOSÉ DIEGO

Posgrado de Arquitectura, UNAM

Sinodales:

DR. HERNÁNDEZ GÓMEZ VICTOR HUGO

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM

MAESTRO EN ARQ. REYNA GÓMEZ FRANCISCO

Posgrado de Arquitectura, UNAM

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todos los beneficios recibidos al pertenecer a la máxima casa de estudios de México.

Al Dr. David Morillón Gálvez por su enorme apoyo, guía, dirección, confianza y por creer en mi.

Al Dr. Daniel Áldama por su amistad, apoyo y confianza.

Al Dr. José Diego Morales Ramírez por su amistad, apoyo y confianza.

Al Dr. Víctor Hugo Hernández Gómez por su apoyo, confianza y por sus valiosos comentarios y sugerencias al presente trabajo.

Al maestro Francisco Reyna Gómez por su apoyo, confianza y por sus valiosos comentarios y sugerencias al presente trabajo.

A mis padres Agustín Torres López y María Inés Rodríguez Centeno por darme su apoyo siempre.

A mis hermanos Javier, Armando y Mauricio por ser un motor de motivación diario.

Al Ing. Hector Palomino Salinas por sus valiosas palabras de apoyo.

RESUMEN

Los sistemas de climatización para edificios demandan gas y electricidad y consumen energía por encima de la iluminación artificial en los edificios. La OCDE y IEA (2016a) indicaron que en los 20 países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) la calefacción y el enfriamiento representaban el 55 % y el 5 % del consumo residencial final de energía en 2011 y afirmaron también que en el sector Comercio y Servicios Públicos en países como Francia, Italia, Japón, Corea del Sur y Nueva Zelanda los edificios consumían el 45 % de la energía por calefacción (34 %) y enfriamiento (11 %) en mismo año (OCDE y IEA, 2016a). Como solución a lo anterior, se propone una metodología en climatización para alcanzar la sustentabilidad energética sin afectar el confort. Esta metodología esta integrada por tres etapas que son las siguientes: la primera etapa que considera a los sistemas pasivos y cuyo potencial depende de las condiciones del clima y su diseño, la segunda etapa que toma en cuenta el equipamiento con sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés) de alta eficiencia energética y la tercera etapa que considera a los sistemas híbridos que utilizan energías renovables.

Con la primera etapa de la metodología se busca climatizar un edificio residencial alto sin utilizar electricidad y gas. Cuando el clima o el diseño de los sistemas pasivos de la primera etapa no permitan el confort dentro del edificio se procede al uso de la primera y segunda etapas, que toman en cuenta a los sistemas pasivos y HVAC de alta eficiencia energética. Pero como estos últimos consumen electricidad o gas se puede pasar al uso de la primera y tercera etapas que consideran la utilización de sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables), respectivamente. Estos sistemas híbridos pueden ser sostenidos con energías renovables como son los sistemas fotovoltaicos de tipo aislado y la energía geotérmica de baja temperatura.

Se estimó el consumo energético para un edificio residencial ubicado en la ciudad de México, en la zona mas fría, la cual fue de 485,394.36 kWh cuando utiliza sistemas activos de climatización, convencionales, en el periodo de invierno. Cuando se aplicó la metodología propuesta en el estudio, a un caso en los meses de enero, febrero, parte de marzo y parte de diciembre, se tuvieron los siguientes resultados: con uso de sistemas pasivos, en un horario de entre las 13:00 h y las 17:00 h en el mes de diciembre, no se presentan horas de confort, y entre las 0:00 h y las 13:00 h en el mes de enero el consumo energético del edificio disminuyó a 443,392.40 kWh/estacionales, es decir, se alcanzó un porcentaje de disminución del consumo de electricidad del 8.65 %. Cuando se aplicó la primera y segunda etapas, que es con sistemas pasivos y convencionales, pero eficientes para el ahorro de energía eléctrica, durante el mismo periodo del año, este consumo

RESUMEN

estimado paso a ser solo de 152,017.32 kWh/estacionales, por lo que el porcentaje de disminución acumulativo en el consumo de energía del edificio del caso de estudio se incrementó hasta el 68.69 % (primera etapa más la segunda etapa). Para alcanzar la sustentabilidad energética, se aplicó la primera y tercera etapas, que toma en cuenta a los sistemas pasivos y a los sistemas híbridos de tipo bomba de calor y fuente la arena alimentados eléctricamente con un sistema fotovoltaico de tipo aislado y bancos de baterías, esto para no usar energías no renovables. El periodo de climatización estudiado fue también el invierno.

Cuando se compara esta metodología con otros seis métodos que proponen la disminución del consumo energético con diferentes sistemas pasivos, HVAC de alta eficiencia energética y sistemas HVAC convencionales se encontró que con la metodología propuesta se puede disminuir el consumo de energía del edificio hasta 0 %. Por ejemplo, en el método propuesto por Wang et al. (2009a) el consumo energético anual de una casa de dos pisos en Cardiff, Reino Unido modelada energéticamente con el programa TRNSYS versión 16 disminuía un 16 %. El sistema de climatización considerado en esta simulación era una bomba de calor y fuente el aire conectada a un serpentín de plástico instalado en el piso. Cuando la casa era aislada térmicamente también disminuía el consumo de electricidad otro 31 % haciendo un porcentaje de consumo de electricidad anual del 53 % (935.20 kWh/ anual).

Para evaluar la disminución energética en el edificio del caso de estudio primero se estimó el consumo de energía cuando este es climatizado en el periodo de invierno con sistemas activos (HVAC convencionales), el cual ascendió a 485,394.36 kWh/estacionales. Para esta estimación se tomó en cuenta el número de sistemas activos de climatización (44 sistemas), la demanda eléctrica total por sistema (11,031.69 kWh/estacionales), el tiempo de operación de 8 horas diarias, durante 91 días, con cinco controles de temperatura, cinco actuadores y una bomba de agua por sistema.

En la primera etapa, que es con sistemas pasivos se consideró un sistema pasivo compuesto por un aislamiento térmico transparente y un muro Trombe. En el estudio se encontró que no se requería ningún sistema convencional de climatización entre las 12:00 h y las 17:00 h en la época de invierno. Con los sistemas pasivos se climatiza la hora de ocupación del edificio, entre las 15:00 h y las 16:00 h. Por lo que para evaluar el consumo de energía que los sistemas pasivos evitarían por el uso de sistemas activos convencionales se propuso multiplicar 15.74 kW/sistema por 44 sistemas por 0.67 horas por 91 días, lo que dio por resultado 42,225.38 kWh/estacionales.

RESUMEN

Con el uso de la primera y segunda etapas y la simulación del uso de sistemas de bomba de calor y alta eficiencia energética en un horario entre las 20:00 h a las 7:00 h del día siguiente se estimó un consumo de electricidad de 152.02 MWh/estacionales para la época de invierno que se obtuvo de multiplicar 417.63 kW de los 11 sistemas de alta eficiencia energética por 4 horas diarias de funcionamiento por 91 días. Como segunda opción de estas dos etapas y para conocer el consumo energético con sistemas pasivos y activos que demandan gas L.P y electricidad se simuló el edificio con sistemas centrales de calentamiento, con lo cual se estimó un consumo de electricidad por 8,952.94 kWh/estacionales que resultó de multiplicar la demanda de electricidad de cada sistema (0.559 kW) por 44 sistemas por 4 horas diarias de funcionamiento por 91 días. El consumo de 33,233.20 kg de gas L.P/estacionales se obtuvieron de multiplicar el consumo de gas propano (2.075 kg/h) por 44 sistemas por 4 horas diarias de funcionamiento por 91 días.

Para lograr la sustentabilidad energética en la climatización del edificio y no utilizar combustibles fósiles se emplearon los sistemas pasivos con los sistemas híbridos. Para ello se estimaron 44 sistemas con bomba de calor y fuente la arena que consumirán 97.46 kWh. Este valor se obtuvo de multiplicar 44 sistemas que demandan 6,085.17 kW por sistema por 4 horas por 91 días. Los cuales podrían ser alimentados con 1,102 módulos fotovoltaicos capaces de generar 126.05 MWh/estacionales. Para que los sistemas puedan trabajar de noche se estimó un banco de 4,180 baterías conectadas en serie-paralelo.

Cuando se aplicó la primera etapa el edificio solo necesitaría consumir 443,168.98 kWh/estacionales de 485,394.36 kWh/estacionales, lo que representó una disminución del 8.65 %. Con el uso de la primera y segunda etapas solo se consumirían 152,020 kWh/estacionales, es decir se tendría una disminución del 68.69 % acumulativa y con el uso de la primera y terceras etapas se tendría una disminución en el consumo del 100 %.

ABSTRACT

HVAC systems require gas and electricity and consume energy above artificial lighting in buildings. The OECD and IEA (2016a) indicated that heating and cooling in the 20 member countries of the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) accounted for 55% and 5% of final residential energy consumption in 2011, also in the Commerce and Public Services sector in countries such as France, Italy, Japan, South Korea and New Zealand, buildings consumed 45% of energy by heating (34%) and cooling (11%) in the same year (OECD and IEA, 2016a). As a solution to the above, we propose a methodology in air conditioning to achieve energy sustainability without affecting comfort. This methodology consists of three stages: the first stage that considers passive systems and whose potential depends on the climate conditions and their design, the second stage that takes into account the equipment with heating, ventilation and High-efficiency air conditioning (HVAC) and the third stage considering hybrid systems using renewable energy.

The first stage of the methodology seeks to air-conditioning a high residential building without using electricity and gas. When the climate or the design of passive systems of the first stage does not allow the comfort inside the building, the first and second stages are used, which take into account the passive systems and HVAC of high energy efficiency. But since the latter consume electricity or gas, it is possible to use the first and third stages, which consider the use of passive and hybrid systems (HVACs sustained by renewable energies), respectively. These hybrid systems can be sustained with renewable energies such as isolated type photovoltaic systems and low temperature geothermal energy.

The energy consumption was estimated for a residential building located in Mexico City, in the coldest area, which was 485,394.36 kWh when using active conventional air conditioning systems during the winter period. When the methodology proposed in the study was applied to a case in the months of January, February, part of March and part of December, the following results were obtained: using passive systems, in a time between 13:00 h and 5:00 h in December, there are no comfort hours, and between 0:00 h and 13:00 h. In January the energy consumption of the building decreased to 443,392.40 kWh / seasonal, that is to say, percentage reduction in electricity consumption of 8.65% was achieved. When the first and second stages, which are passive and conventional but efficient systems for the saving of electric energy, were applied during the same period of the year, this estimated consumption happened to be only 152,017.32 kWh / seasonal, reason why the percentage of cumulative decrease in the energy consumption of the building of the study case increased to 68.69% (first stage plus the second stage). In order to achieve energy sustainability, the first and third stages, which take into account the passive systems and the hybrid systems of the heat pump and source type, were electrically powered

ABSTRACT

with an insulated photovoltaic system and storage batteries do not to use non-renewable energies. The climatization period studied was also the winter.

When comparing this methodology with other six methods that propose the reduction of energy consumption with different passive systems, HVAC of high energy efficiency and conventional HVAC systems, it was found that with the proposed methodology the energy consumption of the building can be reduced to 0%. For example, in the method proposed by Wang et al. (2009a) the annual energy consumption of a two-story house in Cardiff, UK modeled energetically with the TRNSYS version 16 program decreased by 16%. The air conditioning system considered in this simulation was a heat pump and fired the air connected to a plastic coil installed in the floor. When the house was insulated thermally, it also decreased electricity consumption by another 31%, resulting in 53% (935.20 kWh / year) of annual electricity consumption.

In order to evaluate the energy decrease in the case study building, it was first estimated the energy consumption when it is heated in the winter period with active systems (HVAC conventional), which amounted to 485,394.36 kWh / seasonal. For this estimate, the number of active air conditioning systems (44 systems), the total electrical demand per system (11,031.69 kWh / seasonal), the operating time of 8 hours per day, for 91 days, were taken into account with five temperature controls, five actuators and one water pump per system.

In the first stage, which is with passive systems, it was considered a passive system composed of a transparent thermal insulation and a Trombe wall. In the study it was found that no conventional air conditioning system was required between 12:00 h and 17:00 h in the winter season. With the passive systems the time of occupation of the building is climatized, between 15:00 h and 16:00 h. Therefore, in order to evaluate the energy consumption that passive systems would avoid using conventional active systems, it was proposed to multiply 15.74 kW / system by 44 systems for 0.67 hours for 91 days, resulting in 42,225.38 kWh / seasonal.

With the use of the first and second stages and the simulation of the use of heat pump systems and high energy efficiency in a time between 20:00 h and 7:00 h of the following day was estimated electricity consumption of 152.02 MWh / seasonal for the winter season which was obtained by multiplying 417.63 kW of the 11 high energy efficiency systems for 4 hours of operation per day for 91 days. As a second option of these two stages and to know the energy consumption with passive and active systems that demand LP gas and electricity, the building was simulated with central heating systems, with which an electricity consumption of 8,952.94 kWh / seasonal was estimated of multiplying the electricity demand of each system (0.559 kW) by 44 systems per 4 hours of operation per day for 91 days. The consumption

ABSTRACT

of 33,233.20 kg of L.P / seasonal gas was obtained by multiplying the propane gas consumption (2,075 kg / h) by 44 systems per 4 hours of operation per day for 91 days.

In order to achieve energy sustainability in the air conditioning of the building and not to use fossil fuels the passive systems with the hybrid systems were used. For this, 44 systems were estimated with heat pump and source the sand that will consume 97.46 kWh. This value was obtained by multiplying 44 systems that demand 6,085.17 kW per system for 4 hours for 91 days. Which could be powered with 1,102 photovoltaic modules capable of generating 126.05 MWh / seasonal. For systems to work at night, a bank of 4,180 batteries connected in series-parallel was estimated.

When the first stage was applied the building would only need to consume 443,168.98 kWh / seasonal of 485,394.36 kWh / seasonal, representing a decrease of 8.65%. With the use of the first and second stages only 152,020 kWh / seasonal would be consumed, that is to say, there would be a cumulative reduction of 68.69% and with the use of the first and third stages there would be a decrease in consumption of 100%.

ÍNDICE

Resumen	iv
Abstract	vii
Índice	x
Nomenclatura	xiv
Introducción	1
Capítulo I. Antecedentes	8
1.1 De los sistemas de climatización	8
1.2 Climatización, confort y energía	15
1.3 Métodos para definir los requerimientos de climatización que consideran el clima	22
1.4 Evaluación de sistemas de climatización	23
1.5 Metodos de climatización para edificios revisados en la literatura	30
Capítulo II. Climatización y energía en edificios	34
2.1 Definición de climatización	34
2.2 Necesidades de la climatización: energía y confort	34
2.2.1 Confort	36
2.3 Forma de determinar los requerimientos de climatización	37
2.4 Clasificación y eficiencia energética de los sistemas de climatización	38
2.5 Sistemas pasivos	43
2.6 Sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética)	45

2.7 Sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables)	45
Capítulo III. Metodología	55
3.1 Etapas	55
3.2 Sistemas pasivos de climatización	57
3.2.1 Información general del clima	57
3.2.2 Síntesis y diagnóstico	58
3.2.3 Estrategias generales de climatización	62
3.2.4 Definición del sistema pasivo de climatización	62
3.2.5 Evaluación térmica	63
3.2.6 Modelación energética	65
3.3 Sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética)	65
3.3.1 Selección del sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética)	66
3.4 Sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables)	73
3.4.1 Determinar las ganancias o pérdidas de calor del edificio	74
3.4.2 Seleccionar la eficiencia energética y COP del sistema	74
3.4.3 Seleccionar la capacidad de calentamiento y enfriamiento del sistema	74
3.4.4 Seleccionar el sistema por tecnología	74
3.4.5 Calcular la capacidad de generación de electricidad	76
3.4.6 Evaluar energéticamente las etapas	76
Capítulo IV. Caso de estudio: Clima semifrío-Ciudad de México	78
4.1 Climatización con sistemas pasivos	78

4.1.1 Información general	78
4.1.2 Síntesis y diagnóstico	81
4.1.3 Análisis de los requerimientos de climatización	87
4.1.4 Estrategias de climatización	88
4.1.5 Definición del sistema pasivo de climatización	89
4.1.6 Evaluación térmica	96
4.1.7 Modelación energética	102
4.2 Climatización con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética)	103
4.3 Climatización con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables)	110
4.3.1 Pérdidas de calor del edificio	110
4.3.2 Selección del SEER y COP	110
4.3.3 Selección de la capacidad de enfriamiento y calentamiento	110
4.3.4 Selección del sistema por tecnología	110
4.3.5 Cálculo de la capacidad de generación de electricidad	123
4.3.6 Evaluación energética de las etapas	128
Capítulo V. Resultados	130
5.1 Comparativo entre beneficios energéticos por la aplicación la metodología y los sistemas activos (HVAC convencionales)	130
5.1.1 Estimación del consumo energético de los sistemas activos (HVAC convencionales) que solo demandan electricidad	135
5.1.2 Estimación del consumo energético de los sistemas activos HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas	

L.P	135
5.1.3 Logro de la sustentabilidad energética en la climatización del edificio del caso de estudio.	136
5.2 Comparativo entre la metodología desarrollada y otras utilizadas para la climatización de edificios.	149
Capítulo VI. Conclusiones	155
6.1 Conclusiones	155
6.2 Recomendaciones	161
Bibliografía	165
Anexo A.- Estudio analítico y experimental de la arena. Ecuaciones para diseñar el serpentín enterrado. Simulaciones de un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) con un programa comercial.	183

NOMENCLATURA

Dimensiones

A	Área del muro que recibe la radiación solar, m ²
A _{ATT}	Área del Aislante Térmico Transparente, m ²
A _c	Área de la sección transversal del tubo, m ²
A _s	Diferencia entre la temperatura más alta menos la temperatura mínima del suelo, °C
A _{sg}	Superficie de grano, m ²
A _{sp}	Área de la superficie del panel fotovoltaico, m ²
A _s	Área de la superficie de arena húmeda expuesta a la radiación solar, m ²
A _{swh, Sur}	área total de pared con orientación Sur expuesta a la radiación solar, m ²
A _o	Amplitud de temperatura anual
A(z)	Amplitud en la profundidad z
CE _{arena húmeda}	Calor Específico de la arena húmeda
D	Profundidad húmeda
d _G	Diámetro de grano
D _i	Diámetro interior del serpentín, m
D _o	Diámetro exterior del serpentín, m
e	Espesor de la placa de arena, m
L _c	Longitud característica, m
Volumen _{arena}	Volumen de la arena húmeda, m ³

Energía y eficiencia energética

AFUE	Eficiencia de uso de combustible anual
------	--

NOMENCLATURA

$C_{\text{Batería}}$	Capacidad total del banco de baterías, Ah
C_{Nominal}	Capacidad nominal de una batería, Ah
CEO	Consumo Energético Óptimo, KWh/año
CETD	Consumo Eléctrico Total Diario, Wh/día
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CO ₂	Emisiones de bióxido de carbono, Kg de CO ₂
Combustible _j	Tipo de combustible j, MJ
D_{aut}	Días autónomos, d
EER	Energy Efficiency Ratio, British Thermal Unit (BTU)/h/ W
EIA	Administration of Information of Energy
$E_{\text{inst_max}}$	Energía instalada máxima, Ahd
E_{max}	Energía máxima, Ahd
$E_{\text{max_diaria}}$	Energía máxima diaria, Ahd
$E_{\text{pot_max_diaria}}$	Energía de potencia máxima diaria, Ahd
F_C	Factor de reducción debido a las partes de sombreado, adimensional
FCS	Factor de Corrección Solar, adimensional
F_C	Factor de corrección debido a los elementos de sombreado adimensional
F_F	Factor de reducción debida al área el marco, adimensional
F_S	Factor de reducción debido al sombreado natural, adimensional
F_z	Factor de corrección por orientación, adimensional
HSPF	Factor de Operación Estacional en Calentamiento, BTU/(Wh)

NOMENCLATURA

ICEO	Índice de Consumo Energético Óptimo, en KWh/m ² año
IEA	International Energy Agency
K _T	Pérdidas totales en la batería
Número _{Batería_paralelo}	Número de baterías conectadas en paralelo
Número _{Batería_serie}	Número de baterías conectadas en serie
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
P	Potencia del panel, W
P _d	Profundidad de descarga, %
P _{Nominal_equipo}	Potencia nominal de equipo, W
Q´	Velocidad de las ganancias de calor por conducción del serpentín, W
Q	Velocidad de ganancias de calor, W
q _{solar}	Velocidad de ganancias de calor del Aislante Térmico Transparente-Trombe por radiación solar incidente, W/m ²
RMD	Radiación Máxima Directa, W/m ²
RMD _i	Radiación Máxima Difusa, W/m ²
RMT	Radiación Máxima Total, W/m ²
REE	Relación de Eficiencia Energética, W térmicos/W eléctricos
REEE	Relación de Eficiencia Energética Estacional, W térmicos en un año/W eléctricos en el mismo lapso de tiempo
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio, British Thermal Unit BTU/(Wh)
V _{SFS}	Voltaje de los módulos conectados en serie, V
V _{Nominal_batería}	Voltaje nominal de una batería, V

NOMENCLATURA

VAV	Volumen de Agua Variable
VAiV	Volumen de Aire Variable
VRV	Volumen de Refrigerante Variable
Z_f	Factor de corrección por orientación, adimensional
Coeficientes	
a	Coeficiente para calcular el valor g del aislamiento térmico transparente
CDF_{AA}	Coeficiente de funcionamiento del equipo de aire acondicionado, adimensional
CDF_{BC}	Coeficiente de funcionamiento de la bomba de calor, adimensional
CDF_{solar}	Coeficiente de funcionamiento del sistema híbrido con colector solar, adimensional
COP	Coeficiente de Operación, adimensional
$G(z)$	Flujo de calor en el suelo, W/m
g	Transmitancia de energía solar total
h_{agua}	Coeficiente convectivo de transferencia de calor del agua, en $W/m^2 K$ ó $W/m^2 ^\circ C$
h_{arena}	Coeficiente convectivo de transferencia de calor de la arena húmeda, en $W/m^2 K$ ó $W/m^2 ^\circ C$
$h_{exterior}$	Coeficiente convectivo de transferencia de calor, $W/m^2 K$
$h_{interior}$	Coeficiente convectivo de transferencia de calor, $W/m^2 K$
k_{aire}	Coeficiente de conductividad térmica del aire a temperatura promedio, $W/m ^\circ C$ ó $W/m K$
k_{agua}	Coeficiente de conductividad térmica del agua, $W/m ^\circ C$ ó $W/m K$

NOMENCLATURA

$k_{\text{arena húmeda}}$ Coeficiente de conductividad térmica de la arena húmeda, W/m °C ó W/m K

k_{Concreto} Coeficiente de conductividad térmica del concreto, W/m °C

k_{ef} Conductividad térmica efectiva, W/mK

σ Coeficiente de Stefan-Boltzmann, W/m² K⁴

U Coeficiente global de transferencia de calor del material, W/m² K

Constantes

λ Constante de proporcionalidad, adimensional

Números adimensionales

λ_1 función del número de Biot, adimensional

Nu Número de Nusselt, adimensional

Pr Número de Prantl, adimensional

Re Número de Reynolds, adimensional

Propiedades

α_{arena} Difusividad térmica, m²/s

β Factor para calcular la velocidad de ganancias de calor por conducción en el Aislante Térmico Transparente-Muro Trombe, 1/K

$C_{p_{\text{mezcla}}}$ Calor específico de la mezcla arena y agua, J/kg K

ϕ Cambio de profundidad, m

ρ_{concreto} Densidad del concreto, kg/m³

m_{agua} Masa del agua, kg

m_{aire} Masa del aire, kg

m_{arena} Masa de la arena sin agua, kg

NOMENCLATURA

$M_{\text{arena húmeda}}$	Masa de la mezcla de la arena húmeda, kg
R	Resistencia térmica, $\text{m}^2\text{K/W}$
s	Condición límite
τ	Periodo
V	Velocidad de flujo del agua dentro del serpentín, m/s
VCA	Voltaje en Circuito Abierto, volts
W_1	Masa del vaso de precipitado y la masa de la arena húmeda, g
W_2	Masa del vaso precipitado con arena seca, g
W_3	Masa del vaso de precipitado, g
w	Separación entre centros de cada tubo de plástico del serpentín, m
ω	Velocidad angular, rad/s
z	Profundidad a la cual se enterrara el serpentín captador de calor cerrado tipo horizontal, m
z_1	Profundidad 1, m
z_2	Profundidad 2, m
Temperaturas	
T	Temperatura de la arena a la profundidad z, °C
$dT(z,t)$	Es el cambio de temperatura de la arena húmeda, °C
T_{Alta}	Temperatura más alta en la curva de decaimiento por enfriamiento de la arena húmeda, °C
$T_{\text{Alta de la arena húmeda}}$	Es la temperatura más alta registrada durante el día, °C
T_{amb}	Temperatura ambiente, K ó °C
T_b	Temperatura de la pared de la perforación, °C

NOMENCLATURA

$T_{\text{Baja de la arena húmeda}}$	Temperatura más baja registrada en la noche, °C
$T_{\text{Base arena}}$	Temperatura de la base de la arena, °C
t_e	Temperatura en la condición límite, °C
T_{f_old}	Temperatura del agua promedio para un tiempo previo, °C
T_i	Temperatura interior, K
T_m	Temperatura media del periodo del suelo, °C
T_{max}	Temperatura máxima diaria, °C
T_{min}	Temperatura mínima o temperatura en la base de la curva de enfriamiento de la arena húmeda o mínima diaria, °C
T_n	Temperatura neutral o de confort, °C
T_o	Temperatura exterior, K
$T_{\text{Suelo mínima}}$	Temperatura del suelo mínima del periodo de invierno, °C
$T_{\text{Suelo maxima}}$	Temperatura del suelo máxima del periodo de invierno, °C
$T_{\text{Superficial arena}}$	Temperaturas de la superficie de la arena, °C
T_{sup}	Temperatura de la superficie, K ó °C
$T_{\text{Superficial arena}}$	Temperaturas de la superficie de la arena, °C
$T(z,t)$	Temperatura en la base de la arena, °C
T_1	Temperatura en la superficie exterior del muro Trombe, °C
T_2	Temperatura en la superficie de la placa absorbadora, °C
TRV	Temperatura de Refrigerante Variable

Otros conceptos

$a_{\text{Ene,Sur}}$	coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico Transparente en la fachada Sur para el mes de enero
$a_{\text{Feb,Sur}}$	Coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico

NOMENCLATURA

$a_{Mar, Sur}$	Transparente en la fachada Sur para el mes de febrero Coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico
$a_{Dic, Sur}$	Transparente en la fachada Sur para el mes de marzo Coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico
$a_{hp, Enero, Sur}$	Transparente en la fachada Sur para el mes de diciembre Coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico
$a_{hp, Feb, Sur}$	Transparente en el periodo de calentamiento, en el mes de enero en la fachada Sur Coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico
$a_{hp, Mar, Sur}$	Transparente en el periodo de calentamiento, en el mes de febrero en la fachada Sur Coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico
$a_{hp, Dic, Sur}$	Transparente en el periodo de calentamiento, en el mes de marzo en la fachada Sur Coeficiente para calcular el valor g del Aislante Térmico
$a_{hp, promedio, Sur}$	Transparente en el periodo de calentamiento, en el mes de diciembre en la fachada Sur Coeficiente para calcular el valor g promedio del Aislante Térmico Transparente en el periodo de calentamiento en la fachada Sur
CFD	Dinámica de fluidos computacionales
C	Caudal de agua fría o caliente que fluye dentro del serpentín enterrado, m^3/s
$g_{ATT, h}$	Transmitancia de energía solar total por irradiación

NOMENCLATURA

	en el Aislante Térmico Transparente en la fachada Sur en el periodo de calentamiento
$g_{ATT, hpZ, Sur}$	Transmitancia de energía solar total por irradiación en el Aislante Térmico Transparente en la fachada Sur en el periodo de calentamiento corregido por el factor de orientación Sur.
$g_{ATT, n}$	Transmitancia de energía solar total por irradiación normal en el Aislante Térmico Transparente
$g_{ATT, hp, S}$	Transmitancia de energía solar total por irradiación en el Aislante Térmico Transparente en el periodo de calentamiento en la fachada Sur
$g_{h, B}$	Transmitancia de energía solar total por irradiación hemisférica en el periodo de calentamiento
$g_{n, B}$	Transmitancia de energía solar total por irradiación normal en el periodo de calentamiento
$g_{swh, hp, S}$	Transmitancia de energía solar total por irradiación en una pared con calentamiento solar, en el periodo de calentamiento en la fachada Sur
HVAC	Sistema de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado
I_p	Irradiación solar directa, W/m^2
I_s	Irradiación solar, J/m^2
$I_{s, M, l}$	Irradiación solar mensual, W/m^2
\dot{m}	Flujo másico del agua, kg/s
RB	Resistencia térmica a la radiación hemisférica, m^2K/W

NOMENCLATURA

RSE	Resistencia térmica del muro exterior, m ² K/W
RS	Resistencia térmica de la corriente de aire entre el Muro Trombe y el Aislante Térmico Transparente, m ² K/W
S	Factor de forma, m
t	Tiempo, segundos
t ₀	Tiempo inicial, segundos
t ₁	Tiempo 1, segundos
Δt	Incremento de tiempo, s
\dot{V}	Flujo volumétrico del aire o agua, m ³ /s

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo el hombre siempre ha buscado calentarse en climas fríos, extremadamente fríos o estar en confort en climas cálidos. Para el caso del calentamiento, primero lo hizo a través del descubrimiento y uso del fuego y después con el uso de vestimentas de pieles de animales o de telas hechas de diferentes materiales como el algodón, la seda, etc. y para el caso del enfriamiento, primero fue con el uso del hielo y la ventilación natural y después con la invención y uso del aire acondicionado por Willis Carrier en 1902. Las viviendas en el caso de estos climas extremadamente fríos no han quedado de lado, ejemplo de ello son las de los esquimales que sirven como aislantes térmicos que evitan que el calor interno de la vivienda se pierda. Para el caso del enfriamiento, se tiene como ejemplo el enfriamiento evaporativo New Gourná en Egipto y las torres de viento o el muro Trombe. Con el paso del tiempo y con el avance de la tecnología nuevos y mejores materiales han aparecido fomentando por desgracia la utilización de sistemas artificiales que climatizan las viviendas y los edificios pero que utilizan combustibles fósiles.

En 2009, la Administración para la Información de la Energía (2010) (EIA, por sus siglas en inglés) reportó que en los Estados Unidos se fabricaron 87,717 unidades de bomba de calor geotérmicas para el calentamiento y enfriamiento de casas y edificios norteamericanos. La EIA (2010) también mostró que en 2009 el Estado de Ohio en los Estados Unidos fue el estado que más instaló sistemas de climatización con fuente de calor la tierra con una capacidad total de 81.2 MW.

EIA (2010) también reportó que Canadá recibió 197.72 MW por concepto de la exportación de bombas de calor geotérmicas de Estados Unidos de América en 2009. Esto indica que ambos países están utilizando los sistemas activos de climatización como fuente de calor la tierra desde hace tiempo con la finalidad de ahorrar energía.

Afortunadamente, también se han hecho avances en la utilización de las energías renovables en los sistemas activos de climatización y en la arquitectura bioclimática. Que han contribuido de manera importante a la climatización de viviendas y edificios sin utilizar combustibles fósiles y reduciendo la dependencia de la población por la utilización de sistemas convencionales de climatización que demandan gas o electricidad.

Planteamiento del problema

Los principales problemas que presentan los edificios que usan sistemas activos de climatización son los siguientes:

1. Utilizan sistemas convencionales de climatización que demandan electricidad, gas L.P o gas natural. Estos sistemas presentan altas demandas

de energía eléctrica por elementos mecánicos como son los ventiladores interiores y exteriores y altas demandas de gas por la utilización de cámaras de combustión y quemadores. Según NCCS et al. (2013) mas del 50 % de la energía total consumida en un edificio se debía a los sistemas activos (HVAC convencionales) y a los sistemas de ventilacion mecánica y de este total 55 % se debía a los enfriadores de líquido, 35 % a los ventiladores mecánicos, 5 % a las torres de enfriamiento, y 5 % a las bombas centrífugas. Jugdoyal (2013) indicó que el consumo de energía anual de un calefactor eléctrico con capacidad de calentamiento de 200,000 kW y 100 % de eficiencia energética es de 200,000 kWh mientras que un sistema de calefacción con la misma capacidad de calentamiento, 90% de eficiencia energética y que utiliza gas natural es de 222,222 kWh. Para la EIA (2009) en los Estados Unidos de América se tenía un consumo promedio de 1,992.89 kWh en un hogar estadounidense por concepto del uso de los sistemas convencionales de enfriamiento, mientras que por el uso de sistemas de calefacción este consumo ascendió a 11,341.90 kWh de un total de 26,259.27 kWh en 2009.

2. Los sistemas activos HVAC convencionales no aprovechan el clima del lugar en donde se sitúa el edificio ni utilizan energías renovables, ya que dependen exclusivamente del uso de los combustibles fósiles.
3. La eficiencia energética de estos sistemas activos depende del avance tecnológico de sus componentes electromecánicos y no del clima o del uso de energías renovables.
4. La edad del sistema activo de climatización convencional influye en su consumo energético, es decir a mayor edad mayor consumo de electricidad o gas natural. Esto no se presenta en los sistemas pasivos de climatización.
5. En la actualidad no se dispone de una metodología que proponga climatizar un edificio con sistemas pasivos, activos de alta eficiencia energética e híbridos.

Basándose en todo lo anterior se establecen los siguientes objetivos:

Objetivos

Objetivos generales

Desarrollar una metodología para climatizar edificios nuevos o algunos existentes que tenga como objetivo la sustentabilidad energética, y que tome en cuenta primero el uso de sistemas pasivos, y después sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) esto es, usar sistemas que tengan una mínima dependencia del gas y la electricidad, y por ultimo usar sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

INTRODUCCIÓN

Estimar los beneficios energéticos que resultarán de aplicar la metodología a un caso de estudio y compararlos con los obtenidos con otros métodos existentes.

Objetivos específicos

Elaborar una metodología para climatizar edificios nuevos o algunos existentes que tenga como finalidad la sustentabilidad energética.

Demostrar que se puede climatizar un edificio partiendo de los sistemas pasivos y de forma complementaria con sistemas de alta eficiencia energética, pero la sustentabilidad se lograra con los sistemas pasivos y convencionales eficientes que funcionen con energías renovables.

Hipótesis

Es posible elaborar un proceso metodológico para que la climatización de un edificio nuevo o en algunos casos para edificios existentes sea sustentable energéticamente y con garantía de confort térmico. Con sistemas pasivos y activos HVAC de alta eficiencia energética deberá ir disminuyendo el consumo y con sistemas pasivos e híbridos se deberá alcanzar la sustentabilidad energética. Cada etapa será metodológica, ya que estará integrada por una serie de procedimientos sistemáticos que permitirán climatizar el edificio con el mínimo o nulo uso de combustibles fósiles.

Justificación

A partir de los años ochentas los grandes edificios en la zona poniente de la ciudad de México se han ido incrementando, edificios con más de 20 pisos se pueden encontrar en zonas como Santa Fe. Delegaciones como Cuajimalpa y Álvaro Obregón son ejemplos claros de ello.

Esta zona de la ciudad de México representa una de las más demandantes de energía eléctrica, gas natural y butano por el uso de calefactores eléctricos, sistemas de enfriamiento y calentamiento tipo paquete y calefacciones de gas natural e incluso de diesel, ya obsoletas y contaminantes. El INEGI (1999) reporto que en 1998 se fabricaron y vendieron 62 calefactores de uso doméstico, 65 de uso industrial y 12 sistemas de calefacción central en todo el país, de manufactura nacional.

Incluso en algunas delegaciones ubicadas en la zona oriente de la ciudad de México como son Iztacalco y Venustiano Carranza los habitantes de las viviendas y los edificios de 2 pisos y hasta 5 pisos utilizan desde los pequeños calefactores eléctricos empotrados en muros de 500 W hasta los grandes sistemas de activos con ventilador exterior de 5 kW, esto para climatizar sus habitaciones en los meses

INTRODUCCIÓN

de diciembre y enero. Esta demanda y la de los sistemas activos de tipo mini dividido se han ido incrementando desde el año 2000 hasta nuestros días. Esto debido a que estos aparatos son fáciles de adquirir en tiendas departamentales y centros comerciales por lo que ante las condiciones del clima frío los usuarios de estos edificios optan por su adquisición. Otra razón para su compra es que si no es así, los ocupantes son susceptibles de adquirir enfermedades bronco-respiratorias y alérgicas.

Para 2006, Rosas (2011) reportó que en México se tenían 3 803,1081 equipos de aire acondicionado en hogares urbanos y 402,361 en hogares rurales. Rosas (2011) también indicó que se tenían 328,789 sistemas de calefacción en hogares urbanos y 45,255 en hogares rurales.

El CCA (2008) en su informe de 2008 indicaba que las edificaciones son responsables del 33 % del consumo de la energía en Canadá, 40 % en los Estados Unidos y 17 % en México. Además emitían 35 % de los gases de efecto invernadero en Canadá, 38 % en los Estados Unidos y 20 % en México. Finalmente, este informe estableció una serie de tendencias para el año 2030 en las que Canadá incrementará en un 28% su consumo de energía en el sector habitacional y 39% en el sector comercial, mientras que los Estados Unidos será del 23 % en el sector habitacional y del 36 % en el comercial y México alcanzará un 152 % en el habitacional y 144 % en el comercial (CCA, 2008). También se incrementarán sus emisiones de CO₂, siendo 46 megatoneladas para Canadá, 680 megatoneladas para los Estados Unidos y 119 megatoneladas para México (CCA, 2008).

Según el INEGI (2011) las viviendas urbanas equipadas con calefacción pasaron del 1 % en 2005 al 2 % en 2008. En 2015, el INEGI (2015) reportó que en enero del 2015 las ventas en México por concepto de fabricación de equipo de aire acondicionado, calefacción, y refrigeración industrial y comercial ascendieron a \$ 1 654 360,000.00.

Según la SENER (2016a) reportó por sus condiciones geográficas y climáticas la zona noroeste comprendida por los estados de Baja California Sur, Sinaloa, Baja California y Sonora consumió 28,180.20 GWh electricidad en 2014, debido principalmente al uso de sistemas de aire acondicionado, ventiladores o sistemas de refrigeración. SENER (2016b) indicó que durante el 2014 la mayor demanda de gas L.P del mundo se concentró en la región Asia-Pacífico y en específico en países como China, Indonesia y la India con 34 %. Esto se debió principalmente al uso del gas en la cocción de alimentos y la calefacción de edificios y viviendas.

Según Visa et al. (2014) con el crecimiento de la población mundial (más de 10 billones de personas para el 2050) y con edificios que demanden de 60-80

INTRODUCCIÓN

kWhm²/año en vez de los 150-400 kWhm²/año para los edificios residenciales o los 250-550 kWhm²/año para los edificios de oficinas se tendrían mayores beneficios energéticos y una mitigación importante en las emisiones de CO₂ ambientales. Para Visa et al. (2014) diseñar edificios que consideren las condiciones del clima, el comportamiento de los ocupantes y los materiales de construcción implica necesariamente un diseño integral. También afirman que esto es fundamental para reducir en un 90 % el uso de la energía en edificios nuevos y más de un 50 % en los edificios que sean remodelados (página 78, 2° párrafo).

En su informe de marzo del 2016 la SENER y la CONUEE (2016) reportaron como escenario base y con las condiciones actuales prevaescentes que para el año 2035 el número de viviendas de interés social en México con sistemas activos de climatización se incrementará en 43 % mientras que para el 2050 alcanzará el 71%.

Por todo lo anterior, se propuso una nueva metodología de climatización, que permitirá disminuir la demanda de energía en los edificios nuevos y algunos existentes.

Contenido de la tesis

El punto de partida del trabajo inicia con una revisión bibliográfica de los métodos para definir los sistemas pasivos de climatización desde los hermanos Olgay en 1963 hasta De Garrido en 2014, la evolución desde 1881 hasta 2014 de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética), los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) propuestos por Morillón en 1993 y el mencionado en 2009 por Aksamija que combina la ventilación mecánica y el sistema pasivo de doble pared acristalada. Se presentan diversos estudios que relacionan la utilización de los sistemas pasivos y activos, con el confort del edificio y la disminución o incremento del consumo energético. Se incluyen diversas clasificaciones de los edificios por tipo de uso, propiedad, y género. También se presentan diversos trabajos de investigación enfocados a la evaluación energética de los edificios que utilizan sistemas pasivos y activos de climatización. Se incluyen trabajos que reportan los beneficios energéticos alcanzados por el uso de diversos sistemas híbridos (HVAC que usan energías renovables) en los edificios. Al final del capítulo se presentan diferentes métodos propuestos por varios autores para disminuir el consumo de energía en la climatización de edificios.

En el capítulo 2, se define el concepto de climatización y describen las necesidades de la climatización tomando en cuenta la energía y el confort en el edificio. Se describe una forma de determinar los requerimientos de climatización propuesta por Morillón et al. (2014). Se presentan las clasificaciones realizadas por diversos autores de los sistemas de climatización y se definen los conceptos coeficiente de

INTRODUCCIÓN

eficiencia energética, coeficiente de eficiencia energética estacional, coeficiente de operación y factor de eficiencia estacional en el modo de calentamiento tanto para sistemas de alta eficiencia como para sistemas de climatización híbridos sostenidos por energías renovables, esto porque a mayor coeficiente de eficiencia energética menor consumo de energía eléctrica. Es decir, a mayor captación del calor en el serpentín evaporador o rechazo de calor en el condensador, menor demanda eléctrica del compresor o compresores y menor consumo de energía eléctrica en el sistema de alta eficiencia. Al final del capítulo se describen las principales características de los sistemas pasivos, de activos (HVAC de alta eficiencia energética) e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

Para el capítulo 3 se establece una metodología que esta constituida por 3 etapas. Estas etapas se combinan entre si. La primera etapa tiene como base los sistemas pasivos, la segunda etapa toma en cuenta a los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y finalmente la tercera etapa considera a los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables). Los sistemas pasivos permitirán climatizar el edificio con las condiciones del clima y su diseño. Posteriormente con la disminución del consumo energético del edificio alcanzado con estos sistemas de climatización se empleará la segunda etapa en donde se utilizarán sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética), esto para climatizar el edificio en horarios en que el clima o el diseño del sistema pasivo no permita alcanzar el confort.

Finalmente, para lograr la sustentabilidad energética en la climatización del edificio y no consumir electricidad o gas L.P. se procede con la primera y tercera etapas, esto es con el uso de sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables). La selección del sistema para el estudio de caso tomó en cuenta a los sistemas pasivos a base de muro Trombe y aislamiento térmico transparente y el sistema híbrido de bomba de calor y fuente la arena, esto porque este tipo de sistemas híbridos pueden climatizar el edificio durante todo el año, aprovechar el calor que se puede obtener del suelo y utilizar sistemas fotovoltaicos. Además y a diferencia de las bombas de calor y serpentín abierto no se requiere realizar estudios sobre las propiedades hidrogeológicas e hidrodinámicas de los mantos acuíferos, ni diseñar grandes sistemas de bombeo hidráulico. Para el caso de los sistemas que usan colectores solares de tubos al vacío y chillers por absorción de bromuro de litio y agua, aunque se pueden preferir sobre los demás enfriadores por absorción ya que pueden enfriar los edificios en capacidades de hasta 20,000 kW para el enfriamiento y 4,400 kW para el calentamiento según lo reportado por Riffat y Qiu (2004) no se consideraron en el caso de estudio por su gran peso.

En el capítulo 4 se aplicó la metodología a un caso de estudio, en clima semifrío, se realizó un estudio del bioclima, y a partir del diagrama de isorrequerimientos se establecieron las estrategias de climatización y se definieron los sistemas pasivos

INTRODUCCIÓN

para cada época del año. Se estimó mediante una hoja de cálculo de elaboración propia cuanto disminuyen las pérdidas de calor y pasar a la segunda etapa, que es la utilización de sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética). En esta etapa se estimó la capacidad de suministrar ganancias de calor de los sistemas activos HVAC altamente eficientes y su consumo de electricidad. Por último, si el edificio fuera climatizado con sistemas pasivos y sistemas de bomba de calor de alta eficiencia energética. Por otra parte, y como segunda opción en esta etapa se simuló climatizar el edificio con sistemas pasivos y sistemas activos centrales que demandan electricidad y gas L.P. que tienen un porcentaje de eficiencia de uso de combustible anual del 96 %.

Para alcanzar la sustentabilidad energética, no utilizar combustibles fósiles, y debido a que el precio inicial por la adquisición de los sistemas de climatización híbridos que usan energías renovables es más elevado que los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) se pasó al uso de la primera y tercera etapas. En la tercera etapa es importante utilizar energías renovables como la energía solar o la energía geotérmica de baja temperatura para sostener a los sistemas híbridos.

En el capítulo 5 se emiten conclusiones y recomendaciones. El objetivo principal del estudio es mostrar que se puede lograr la sustentabilidad energética en la climatización de un edificio sin consumir combustibles fósiles.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Se realizó una investigación bibliográfica tomando en cuenta todos aquellos trabajos tanto nacionales como extranjeros que aportan antecedentes a la investigación. Primero se tratan todos aquellos métodos y metodologías desarrollados para climatizar los edificios con sistemas pasivos de climatización. Posteriormente se realizó una revisión del avance tecnológico que han tenido los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética). Se presentan una serie de autores que han propuesto climatizar los edificios con sistemas activos (HVAC sostenidos con energías renovables) desde 1959. Se presentan todos aquellos trabajos que clasifican a los edificios por género y uso de la energía, y que relacionan a la climatización, el confort y la energía. También se muestran los métodos para definir los requerimientos de climatización que consideran el clima y se da una descripción de como han sido evaluados los sistemas de climatización por diferentes autores. Finalmente se analizan los métodos y metodologías utilizadas para climatizar edificios y los sistemas que fueron utilizados.

1.1 De los sistemas de climatización

Pasivos

Olgay (2013) evaluó y analizó a inicios de la década de los 60's el efecto de la protección solar sobre las superficies acristaladas por dentro y fuera y la eficacia de los diferentes sistemas para proporcionar sombra, los efectos del viento dentro y fuera de un edificio y elaboró un método para el cálculo del retardo por inercia térmica de los materiales de construcción de un edificio.

En este tiempo los estudios del arquitecto Victor Olgay muestran la importancia que tiene tomar o no lo que se necesite del clima y mediante los sistemas pasivos climatizar los edificios.

Szokolay (1980) citado por Salazar (2001) en la década de los 80's propuso un método que estaba dividido en 4 etapas para climatizar un edificio. En la etapa inicial se realizan estudios preliminares que toman en cuenta los datos climatológicos del lugar en donde se localiza el edificio. Szokolay realiza estudios de geometría solar, efectos de la forma en el comportamiento térmico del edificio y sus materiales. Al final de esta etapa se deberá contar con una propuesta de diseño. Además en las etapas medias del método se toman decisiones de diseño, penetración solar, sombras, materiales, envolvente, ventilación e iluminación natural, etc. En la etapa final se evaluaba de manera definitiva una propuesta energética. Para ello se debía hacer un análisis térmico, de ventilación, lumínicos y estimación del uso de la energía para todos los objetivos planteados, auxiliándose con diversas herramientas. Estas herramientas eran programas sofisticados de análisis de energía y respuesta térmica, de iluminación y ventilación en el edificio.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Con Szokolay se muestra la necesidad de que todo método debe ser evaluado mediante análisis del comportamiento térmico del edificio y con programas que analicen el uso de la energía en los sistemas de climatización.

Yeang (2001) proponía en 1999 que para utilizar al máximo los sistemas pasivos se debían examinar toda la gama de opciones de diseño pasivo en función de las condiciones climáticas del lugar, realizar el diseño del sistema pasivo mediante la forma del edificio en una vista en planta, su posición en el terreno y su orientación con respecto al recorrido del Sol y la dirección de los vientos dominantes y diseñar sistemas pasivos de enfriamiento. Estos sistemas pasivos de enfriamiento serán: la ventilación natural, la ventilación nocturna, el enfriamiento radiante, el enfriamiento por evaporación directa, el enfriamiento por evaporación indirecta y el enfriamiento de los espacios exteriores.

Yeang también propone que un edificio debe ser climatizado con sistemas pasivos antes de utilizar los sistemas HVAC convencionales. Y para aprovechar al máximo a los sistemas pasivos se debe considerar su diseño (página 84, 3er. párrafo).

En 2006, Morillón (2007) presentó una metodología para el diseño térmico de edificios con sistemas pasivos. La propuesta metodológica de Morillón (2007) partía de la información general del clima, los datos geográficos del sitio en donde se localizará el edificio, los datos de las temperaturas y humedades horarias el uso de las cartas bioclimáticas de Olgay y Givonni para indicar gráficamente el confort térmico, la construcción y uso del diagrama de isorequerimientos de climatización en donde se pone especial atención en que las condiciones de confort coincidan con el horario de ocupación del edificio. Con el diagrama de isorequerimientos, y la información general del edificio, se podían establecer estrategias de diseño térmico, en las cuales se pueden seleccionar cualitativamente los dispositivos o componentes de los sistemas pasivos a emplear, tomando en consideración su forma, los materiales y ubicación en el edificio (Morillón, 2007). Además Morillón (2007) sugería que los sistemas pasivos pueden tomar o no del clima lo que se necesite; o bien solo climatizar con base en su diseño.

Con su metodología Morillón finca las bases para una climatización sustentable energéticamente del edificio siempre sustentada en la información del clima, en el estudio del bioclima, en la identificación de las estrategias de climatización y en los principios para definir los sistemas pasivos de climatización.

En 2009, Fuentes (2009) desarrolla un modelo de análisis climático que permitía definir las estrategias de diseño. En este modelo las estrategias de diseño bioclimático se definían a partir de determinar la zona de confort con criterios de clasificación y regionalización climática, agrupación bioclimática y mapas de confort.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Fuentes (2009) también definió las estrategias de climatización para dos periodos básicos: el período de frío y el periodo de calor.

Aunque Fuentes dividió las estrategias de climatización en estrategias para el periodo frío y estrategias para el periodo caliente no indica como se deben de definir los sistemas pasivos para cada una de estos periodos.

En el mismo año, Aksamija (2009) propone un método para climatizar los edificios que están en un clima frío o cálido seco con estación de verano cálido mediante la utilización de fachadas con doble pared de vidrio.

En los estudios realizados por Aksamija se resalta la importancia del uso de los sistemas pasivos de climatización que utilizan paredes vidriadas como sistemas que pueden calentar o enfriar los edificios y que en la década de 1970 Felix Trombe empezó a utilizar de manera extensa en sus diseños en Francia.

De Garrido (2014) estableció en 2014 un método dividido en 4 pasos para lograr una arquitectura autosuficiente en energía. Dentro de su método considera integrar en los edificios dispositivos generadores de energía eléctrica a partir de energías renovables. Además indica que debe seguirse una cuidadosa y compleja metodología proyectual que de origen a la utilización de diversas estrategias bioclimáticas y sugiere que se debe elegir de manera cuidadosa la disposición de los sistemas pasivos.

La importancia de los estudios realizados por De Garrido radica en que dentro del diseño de los sistemas pasivos se debe considerar la disposición y colocación que brinde y proporcione la máxima cantidad de pérdidas o ganancias de calor en el edificio.

Sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética)

Ramgopal, M. (2009) describió que John Perkins, un norteamericano que vivía en Londres desarrolló en 1834 el primer sistema de refrigeración mecánica por compresión de vapor utilizando el éter como fluido de trabajo. Esta máquina ya consideraba los cuatro elementos principales que se encuentran en los sistemas de refrigeración actuales (compresor, evaporador, condensador y válvula de expansión).

Se inventa el primer sistema de refrigeración mecánica, base tecnológica de lo que más adelante serían los sistemas activos (HVAC convencionales y de alta eficiencia energética).

Nagengast (2002) indica que Willis Haviland Carrier diseña un sistema para controlar la temperatura y humedad en forma de aerosol para la planta de impresión

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

y publicidad Sackett-Wilhelms en Brooklyn, Nueva York el 17 de julio de 1902. Este sistema fue considerado como el primer sistema de aire acondicionado de la historia y fue patentado en 1905. Básicamente consistía en un ventilador que impulsaba aire sobre un generador de vapor de hierro fundido. El sistema tenía instalado serpentines de tubería galvanizada antes del ventilador con capacidad de 211 kW de refrigeración, el cuál era alimentado por el agua fría proveniente de un pozo y con refrigeración mecánica. El flujo de aire era balanceado por medio de compuertas mecánicas. El aire también podía ser deshumidificado por medio de una tela impregnada con salmuera de cloruro de calcio.

Con Willis Carrier se inicia el desarrollo tecnológico de los sistemas activos (HVAC convencionales).

TRANE (2015a) indica que en 1926 la compañía patenta el concepto de superficie de transferencia de calor de aleta y tubo utilizado dentro de un serpentín convector, que se convierte en el calefactor eléctrico más ampliamente utilizado en la industria de la climatización de ese tiempo. Con base en esto en 1932, TRANE (2015a) amplía su gama de calefactores e inventa un serpentín calefactor por donde circula aceite hirviendo.

Empieza el desarrollo tecnológico de los sistemas activos (HVAC convencionales) de calentamiento. Pero también se inicia la dependencia de estos sistemas con el uso de los combustibles fósiles como la electricidad.

Brachmann (2015) describió que en septiembre de 1929, el ingeniero David Crosthwait, patentó un aparato de calefacción de vapor que podía proporcionar calor a varias habitaciones de un solo edificio a través de un sistema de ventilación mecánico. Crosthwait también inventa el termostato para controlar el encendido y paro del sistema HVAC convencional.

Se inicia el desarrollo tecnológico de los sensores de cuarto para controlar el paro y arranque de los sistemas activos (HVAC convencionales) pero estos controles también inician su dependencia por el uso de la electricidad. A diferencia de los sistemas pasivos que no utilizan ningún control electromecánico, digital o vía internet.

TRANE (2015a) en 1951, inventa un sistema para climatizar grandes edificios, que utilizaba compresores herméticos de tipo reciprocante, condensador, y evaporador para enfriar agua. El sistema es presentado en la décima exposición de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción y Ventilación (ASHVE, por sus siglas en inglés) en Filadelfia, Estados Unidos.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Aunque se inicia la climatización de los grandes edificios con los sistemas activos (HVAC convencionales) y se presenta en las exposiciones de la asociación que antecede a la ASHRAE en los Estados Unidos de América todavía no se utiliza el concepto de sustentabilidad energética dentro de los métodos utilizados para climatizar.

En 1958, Daikin (2015) desarrolla la bomba de calor con fuente el aire, tipo paquete para el mercado japonés.

Dentro de los sistemas activos (HVAC convencionales), la bomba de calor representó un avance tecnológico ya que puede suministrar enfriamiento y calentamiento al edificio; aunque en este desarrollo tecnológico no se tomó en cuenta la mejor estabilidad que presentan el perfil de temperaturas del suelo en comparación con el aire.

TRANE (2015a) desarrolla en 1971 un sistema activo HVAC con Volumen de Aire Variable (VAiV) para ahorrar energía dentro del sistema de distribución de aire. El sistema permitía enfriar y calentar pequeños y grandes edificios comerciales. Estos sistemas se colocaban por encima del plafón de los cuartos y eran controlados por termostatos que podían aumentar o disminuir el volumen de aire caliente o frío a través de actuadores electromecánicos que abrían parcial o totalmente compuertas en los ductos.

Con la invención de los sistemas activos HVAC de VAV se dan pasos para disminuir el consumo de energía y también se fincan las bases de los primeros sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

Mitsubishi (2015b) en 1965 inventa el sistema inversor, a través del cual la velocidad del compresor se adapta en cada momento a las necesidades de enfriamiento o calentamiento de la habitación, permitiendo consumir únicamente la energía necesaria. Gracias a un dispositivo electrónico de alimentación sensible a los cambios de temperatura, los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) pueden variar las revoluciones del motor eléctrico del compresor.

En 1969, Daikin (2015) inventa los sistemas activos HVAC que pueden climatizar varias habitaciones al mismo tiempo con una sola unidad exterior y les llama sistemas multidivididos. Y en 1982 Daikin inventa el primer sistema con flujo de refrigerante variable (VRF por sus siglas en inglés) en Japón. Dando así a los ocupantes la capacidad de controlar la temperatura en cada habitación y piso de un edificio (Daikin, 2015). En 1998, desarrolló los sistemas activos HVAC con el refrigerante 410 A, un refrigerante que no daña la capa de ozono. En ese mismo año, también desarrolla un sistema activo HVAC tipo paquete que utiliza el sistema inversor para ahorrar hasta un 60% de la energía eléctrica.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

En 2014, Daikin (2015) diseña dispositivos electrónicos para controlar la temperatura del refrigerante variable, y propiciar el calentamiento continuo del agua a base de un sistema bomba de calor de alta eficiencia energética en los sistemas de Volumen de Refrigerante Variable (VRF).

En ambos casos se resalta la importancia que tiene el desarrollo de nuevos avances tecnológicos dentro de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) para disminuir su consumo de energía eléctrica.

En septiembre de 1981, Toshiba (2015) inventa en Japón el primer aire acondicionado residencial con la tecnología del inversor, tecnología bajo la cual se puede controlar de forma continua la capacidad del compresor para reducir la pérdida de energía causada por encendido y paro del sistema, lo que permite regular la temperatura de la habitación.

Con este antecedente se muestra el claro interés por disminuir el consumo de la energía eléctrica dentro de los sistemas activos (HVAC convencionales) y se da impulso al desarrollo tecnológico de sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) con un enfoque en la sustentabilidad energética.

En 1993, TRANE (2015a) incorpora a los sistemas tipo techo los controles con microprocesador para lograr un control más preciso de la operación de un sistema activo (HVAC convencional). En el año 2009, TRANE (2015a) también desarrolló un panel de control inteligente que coordinaba cada sensor de temperatura del sistema activo HVAC con otros controles del edificio, esto para realizar un informe del sistema de climatización y su interacción con otros sistemas del edificio como la iluminación artificial. Un año más tarde también lanza un sistema que incorpora manejadoras de aire de alta eficiencia y enfriadores de agua con razones de flujo bajo.

A pesar de incorporar la electrónica dentro de los controles de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) esto incrementó el consumo de energía eléctrica de los sistemas.

Panasonic (2015) desarrolló en marzo del 2014 un sistema de sensores para la detección de la luz solar y la actividad humana reportando ahorros de energía de hasta el 38 %. El sistema modifica su comportamiento de forma automática y sin afectar al confort, en función de la intensidad de la luz, presencia, ubicación y nivel de actividad de las personas.

Con la incorporación de nuevos avances tecnológicos en los últimos 7 años los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) han ido disminuyendo su consumo de energía eléctrica hasta porcentajes por debajo del 50 % sin afectar el

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

confort tanto en el calentamiento como en el enfriamiento del edificio. Estos sistemas serán tomados en cuenta en una segunda opción para climatizar un edificio después de los sistemas pasivos de climatización que no demandan ni electricidad ni gas natural o L.P. La opción que representan los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) será una tercera selección ya que su inversión inicial es mayor que la de los sistemas pasivos y los de alta eficiencia energética.

Sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables)

TRANE (2015a) desarrolló en 1959 el primer enfriador de agua por absorción basándose en tres principios básicos: uso de un compresor recíprocante, un compresor centrífugo y un sistema de absorción.

Se empiezan a buscar otras opciones para impulsar el fluido de trabajo que no fuera mediante el uso de un compresor como sucede en el ciclo de refrigeración mecánica.

En 1993, Morillón (1993) incluye dentro de su clasificación de sistemas de climatización el término híbrido. Señala con este término que es posible combinar un sistema HVAC convencional con las energías renovables y así disminuir el consumo de electricidad o gas del edificio.

Yeang (2001) propuso en 1999 que una vez que sean utilizados los sistemas pasivos en la climatización de un edificio la siguiente fase será la investigación de los sistemas mixtos. Es decir, sistemas parcialmente asistidos por sistemas electromecánicos y que sirven para optimizar otras energías ambientales del lugar. Estos servirán de apoyo a los sistemas pasivos y estarán basados en criterios para decidir cual sistema ya sea pasivo o activo reporta más ventajas.

Yeang (2001) también sugirió que la siguiente fase sea coordinar los sistemas pasivos con lo que llama sistemas completos o especializados. Definiendo a estos últimos como todos aquellos sistemas que son de baja energía y que producen pocos impactos ambientales. Estos incluyen bombas centrífugas, ventiladores mecánicos e intercambiadores de calor por lo que se les puede considerar como sistemas híbridos.

Aunque Yeang sugiere el uso de sistemas mixtos y en coordinación con los sistemas activos (HVAC convencionales) no consideró que los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) pueden operar con la energía eléctrica que pueden suministrar las energías renovables como la energía solar a través de un sistema fotovoltaico de tipo aislado.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Szokolay (2004) dentro de su clasificación de sistemas de climatización de las casas y edificios incluye a los sistemas híbridos. Su clasificación estaba de acuerdo con el coeficiente de operación del sistema (COP por sus siglas en inglés) e indicó que los sistemas híbridos debían tener un COP mayor a 20 y menor de 50. Para el cálculo de su COP, Szokolay propuso que se debía dividir la energía de origen solar entregada al sistema entre la energía utilizada por bombas, ventiladores y controles.

Aunque Szokolay propone el uso de la energía solar y los sistemas fotovoltaicos para suministrar la energía eléctrica a los sistemas activos (HVAC convencionales), no propone el uso de otras energías renovables como la energía geotérmica de baja temperatura.

Barragán et al. (2011) indicaron que las bombas de calor geotérmicas podrían probarse en países como México y estimularían importantes ahorros energéticos anuales en comparación con los sistemas HVAC convencionales debido gran variedad de aplicaciones. Las bombas de calor con geotermia sugeridas por Barragán et al. (2011) pueden no utilizar combustibles fósiles cuando usan la electricidad generada por paneles fotovoltaicos y almacenada en bancos de baterías.

En los trabajos anteriores se observa que los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) se deben utilizar en la climatización de edificios. Por lo cual se deben considerar dentro de toda metodología para climatizarlos.

1.2 Climatización, confort y energía

Lam et al. (2004) realizaron un análisis del uso de la energía eléctrica en 6 edificios de oficinas de la administración pública localizados en la isla de Hong Kong, 9 en la península de Kowloon y 5 en el resto del territorio en el periodo de 1995 y hasta el año 2004. Es su estudio encontraron que los sistemas activos (HVAC convencionales) consumían hasta un 47.5 % de la electricidad de todos los edificios.

En este trabajo se muestra que los consumos por concepto del uso de sistemas activos (HVAC convencionales) se acercan a la mitad del consumo de la energía eléctrica total de los edificios en Hong Kong por lo que se hace necesario una metodología que permita disminuir estos consumos sin afectar el confort.

Yeang (2001) indicó que cuando se diseña un edificio se debe evitar la sobre ventilación debido a que el exceso de aire frío pudiera incrementar la carga de calentamiento y por consecuencia aumentar la factura energética si se climatiza con sistemas activos (HVAC convencionales).

En este trabajo se observa que dentro del diseño de los sistemas pasivos se debe estudiar el bioclima del lugar y con esto evitar el aumento de las cargas de

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

enfriamiento, calentamiento y demanda de energía eléctrica de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

En 2005, Myors et al. (2005) reportaron que los sistemas activos de climatización de tipo centralizado demandaban el 65 % (31,891 MJ/año) de la energía de los edificios más grandes de apartamentos en Sidney, Australia. Aquí se puede observar que no se aplicó alguna metodología que permitiera disminuir la demanda de energía eléctrica de estos edificios, ya que solo se recurrió a climatizarlos con activos (HVAC convencionales).

Tzikopoulos et al. (2005) estudiaron 77 edificios localizados en Grecia, y otras áreas mediterráneas y partes de Europa y encontraron que de acuerdo con el clima y la localización los edificios localizados en las zonas del Mediterráneo disminuían su consumo de energía en un 17 %. E indicaron que los edificios localizados en climas cálidos presentaban una disminución del consumo de energía eléctrica del 7 %.

Y Jenkins et al. (2008) reportaron en 2007 que el 8 % de la energía total que se utilizaba en Reino Unido era demandada por sistemas activos (HVAC convencionales) en los edificios de oficinas.

De acuerdo con los dos estudios anteriores se hace necesario que la metodología de climatización considere el estudio del bioclima.

Xiao y Wang (2009) afirmaban en 2008 que los sistemas de aire acondicionado, ventilación y calefacción consumían hasta un 50 % de la energía total utilizada en un edificio. Y que esto se debía principalmente a las fallas ocurridas durante el método de diseño y selección de los sistemas. Por lo que proponen que por medio de un proceso de detección, aislamiento y evaluación de la falla esta sea corregida a través del mantenimiento de los sistemas, con lo cual se pueden lograr una disminución de hasta un 15 % de la demanda energética en el edificio (página 1145, 5° párrafo).

Aunque el proceso de detección y corrección de las fallas en los sistemas activos (HVAC convencionales) reportan ahorro de energía, al contar con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) estas fallas pueden aparecer aun menos porque estos sistemas operan menos tiempo y por consecuencia están sujetos a un desgaste menor.

En el mismo año, Mustafa (2008a) indicaba que los edificios eran los mayores demandantes de energía del mundo, y que esta demanda se estaba incrementando día con día debido principalmente a que para mantener el confort era necesario utilizar de entre un 60-70 % del total de la energía de los edificios de uso no industrial. También indicaba que esto estaba incrementando la dependencia

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

energética y el uso de combustibles fósiles en los países industrializados (página 1562, 1.º párrafo).

McNeil y Letschert (2008) presentaron un modelo matemático que predecía que de un 20 % de los hogares mexicanos eran propietarios de algún tipo de sistema de aire acondicionado en 2005 y que pasarían a un 80 % en 2030.

En estos trabajos se observa que el método tradicionalmente utilizado para mantener el confort en muchos edificios en mundo es mediante el empleo de sistemas activos (HVAC convencionales) lo que lejos de promover la sustentabilidad energética incrementa la dependencia en el uso de electricidad y gas.

En 2009, Priyadarsini et al. (2009) mostraron un trabajo en donde afirmaban que el consumo de energía en un hotel localizado en Singapur (33 GWh/día) se correlacionaba más con el porcentaje de ocupación promedio anual (78 %) y con las fluctuaciones de la temperatura de bulbo seco del aire exterior, entre 27 °C y 29 °C que con el porcentaje de humedad relativa y la radiación solar global.

En este trabajo no se realizó un estudio del bioclima del lugar, por lo que este sí se debe realizar como una parte de la metodología que se propone en el capítulo 3.

Isaac y Vuuren (2009) estimaron con base en los porcentajes de penetración y disponibilidad de los sistemas activos (HVAC convencionales) de enfriamiento demandarán 49,000 PJ y los de calentamiento 30,000 PJ en el año 2100 en sector residencial. Y estimaron que el porcentaje de los países que más usarán los sistemas activos (HVAC convencionales) serán China con 103 %, el resto de Asia alcanzará el 100, Estados Unidos de América 18 %, Canadá 11 % para el periodo del 2050-2100. Estos autores también indicaron que el consumo de energía eléctrica por el uso de estos sistemas HVAC de enfriamiento convencionales pasará de 300 TWh en el año 2000 a 4,000 TWh en el año 2050 y a más de 10,000 TWh en el año 2,100, esto debido principalmente al desarrollo de los países.

Con este trabajo se resalta la importancia que tiene el contar con una metodología que se pueda aplicar en cualquier parte del mundo y que busque disminuir los consumos de energía anteriormente mencionados.

De enero de 2008 hasta septiembre del 2011 se diseñó y construyó un edificio en el campus de la Universidad de la Columbia Británica en la localidad de Vancouver, en Canadá (Cayuela y Pilon, 2015). Cayuela y Pilon (2015) afirmaron que la cantidad de energía eléctrica monitoreada y consumida en el edificio de abril del 2012 a marzo del 2013 fue de 754,791 kWh de 900 MWh. Además, 4,137 kWh fueron suministrados por el sistema fotovoltaico, 147 MWh fueron suministrados por el serpentín recuperador de calor del edificio vecino, 46.5 MWh fueron extraídos del

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

serpentín enterrado y 50.7 MWh corresponden con la cantidad de calor rechazado en el subsuelo.

En el caso anterior, se ve la importancia que tiene el uso de sistemas pasivos como la ventilación natural, el control solar, los muros y techos verdes en combinación con las bombas de calor geotérmicas, esto para disminuir el consumo energético de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

Salvador y Grieu (2012) indicaron en 2011 que en Francia cerca del 45 % del consumo de la energía se debía a los edificios y de este porcentaje el 35 % se debía al uso de los sistemas activos (HVAC convencionales). Y acentúan que estos consumos eran ocasionados principalmente por factores humanos, hábitos de los ocupantes, necesidades por el uso de la energía, así como la disponibilidad de los recursos energéticos. También afirmaban que con sistemas de climatización alimentados eléctricamente por sistemas fotovoltaicos, se reduciría el crecimiento de la red de energía eléctrica en cada país, y se promovería el autoconsumo, y el uso racional y eficiente de la energía eléctrica (página 659, 1.º párrafo).

En este trabajo se observa que el porcentaje del 35 % de consumo de la energía por el uso de sistemas activos (HVAC convencionales) representa un tercio de la energía utilizada en los edificios en Francia, por lo que con sistemas que consuman nada o poca energía eléctrica o gas se reducirá la demanda de combustibles fósiles.

Un año más tarde, Varela (2012) indicaba que la demanda de gas L.P en México se había incrementado y esto se debía al uso de sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan energía eléctrica y gas para el calentamiento de viviendas y edificios. En ese mismo año, la revista Arqhys (2012) clasificó a los edificios por su uso en residenciales, industriales, comerciales y deportivos y por su propiedad en públicos y privados.

Plazola (2012) también clasificó a los edificios por su género en: habitar, trabajar, circular y cultivo de la personalidad. Por la forma de habitar el edificio los subdividió en: habitación individual o colectiva (urbana, sub-urbana y rural). A su vez estos edificios los subdividió en habitación campesina, obrera, clase media, residencial, apartamento, casa en fila agrupada, multifamiliar bajo, multifamiliar alto, hoteles (de paso, veraneo, y de lujo), casa de cuna, asilo, dormitorio público, internado, mesón, hospicio, y cuartel. Para trabajar los subdividió en: comercio (pequeño, mercado y supermercado, almacén, bodega y silo), industria (agrícola, metalúrgica, manufacturera, extractiva, minera y cantera), recursos naturales renovables (planta avícola, planta agropecuaria, planta pasteurizada, y rastro), recursos naturales no renovables (refinerías), administración pública (federal, estatal, y municipal) que los subdividió en: poder ejecutivo (palacio de gobierno y secretaría de estado). Los

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

edificios de la secretaría de estado los subdividió en: a) agricultura y ganadería, b) comunicaciones y transportes c) defensa nacional, d) educación pública, e) gobernación, f) hacienda y crédito público, g) industria y comercio, h) marina nacional, i) obras públicas, j) patrimonio nacional, k) relaciones exteriores, l) recursos hidráulicos, m) salubridad y asistencia, n) trabajo y previsión social. Los edificios del poder legislativo los subdividió en: cámara de diputados cámara de senadores y los edificios del poder judicial los subdividió en: a) suprema corte de justicia, b) tribunales de circuito legislativo y unitario juzgados.

Los edificios de seguridad social, Plazola los subdividió en: a) tribunales, b) delegación de policía, c) delegación de bomberos, y d) delegación de tránsito. Para los edificios que se usan para trabajar y que son de dependencias semi-oficiales los subdividió en: a) oficinas privadas, b) despachos, c) compañía, d) compañías de Seguro, e) bolsa de valores, f) banco, g) periódico, h) agencias de viajes, i) agencias de turismo, y j) comercio en general. Por la forma de circular Plazola subdividió a los edificios en: comunicaciones y transporte (correo, telégrafo, radiodifusión, televisora, compañía telefónica, estaciones y puertos terrestres, fluviales y marítimos, ferrocarriles, aeropuertos, estación de autobuses, y lanchas.

Por el cultivo de la personalidad los subdividió en edificios para la enseñanza, institutos de experimentación, institutos de observación, ciencias descriptivas, ciencias aplicadas, normales, bellas artes, agronomía, curación física y mental, reclusión y regeneración, de aseo, juegos, deportes, y diversión.

Un año más tarde, la OECD y la IEA (2013) clasificaron a los edificios en residenciales y de servicios. E indicaron que en el sub-sector residencial se incluían todos aquellos edificios con actividades que utilizaban la energía dentro de apartamentos y viviendas. En el sub-sector comercial y de servicios se consideraban a todos aquellos edificios en donde se realizan actividades relacionadas con los servicios financieros como son los bancos e incluía también a la administración pública, los hospitales, los restaurantes, los hoteles, las escuelas y los centros comerciales. De estos dos sectores el sector residencial consumió un 74 % de la energía total entre 1971 y 2010 mientras que el sector de comercial consumió un 26 %. Reportando un crecimiento sostenido del 1.8 % anual en este periodo.

En 2014 la EIA (2014) también reportó que en los Estados Unidos de América se consumieron 250 GWh por concepto de la electricidad utilizada por los sistemas de enfriamiento de edificios y viviendas en el sector residencial y 162 GWh en el sector comercial, lo que representó el 7 % y 4 % de toda la energía eléctrica consumida en ese país respectivamente. Graves et al. (2014) estimaron en septiembre del 2013 que un edificio de oficinas en Baltimore, Estados Unidos usaba un 11.5 % de la

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

energía en los sistemas activos de enfriamiento, un 32.7 % en los sistemas activos de calentamiento y un 12.4 % en el sistema de ventilación mecánica, lo que representaba un 56.60 % de la energía total del edificio.

Aquí se destaca la importancia que tiene el contar con una metodología que considere a los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) para disminuir los altos consumos de energía eléctrica en países como los Estados Unidos de América. También es importante señalar que dentro de la clasificación de edificios proporcionada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico y la Agencia Internacional de la Energía el sector de edificios residenciales consumió casi 3 veces más energía que el sector comercial por lo que la metodología debe ser aplicada en este sector para disminuir estos consumos energéticos de forma importante.

Bojić et al. (2014) simularon la disminución de la energía eléctrica en una casa tipo “Mozart” en Lyon Francia en 2013 cuando era calentada por medio de dos muros Trombe diseñados y proyectados en la fachada sur de la casa y un sistema activo (HVAC convencional) de calentamiento. Este trabajo reportó una disminución anual de hasta el 20 % de la energía eléctrica utilizada para calentar la casa en la estación de invierno. En el estudio también se muestra que la incorporación de los sistemas pasivos de climatización como los Muro Trombe en los edificios y casas promueve la disminución del uso de la energía eléctrica y el gas.

Al mismo tiempo, García et al. (2014) presentaron un estudio en 2014 en donde analizaron el consumo energético de los sistemas activos de los edificios no residenciales en México dividiendo el país en tres regiones climáticas; la región con clima cálido seco, cálido húmedo y templado. Y reportaron que los edificios no residenciales que más usaban sistemas activos (HVAC convencionales) eran los hoteles, los hospitales y las oficinas, en donde predominaban unidades enfriadoras de líquido con condensador enfriado por agua. García et al. (2014) también indicaban que para clima templado los sistemas activos (HVAC convencionales) consumieron en los hoteles 83.6 kWh/m² año, seguido de los hospitales con 53.8 kWh/m² año, mientras que para los climas cálido húmedo y cálido seco los edificios que más consumieron energía eléctrica fueron los hospitales con 238.7 kWh/m² año y 327.2 kWh/m² año respectivamente. Utilizando un modelo de simulación para el cálculo del uso de la energía para enfriamiento en los edificios no residenciales en México, García et al. (2014) estimaron un 41.2 % en el clima cálido seco, un 40.6 % en el clima cálido húmedo y un 12.1 % en el clima templado. García et al. (2014) sugirieron que en los edificios no residenciales localizados en clima cálido seco existe un gran potencial en la implementación de sistemas que combinen sistemas activos (HVAC convencionales) y sistemas pasivos. Para los edificios que se encuentran en regiones con clima templado, García et al. (2014) sugirieron utilizar

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

la ventilación natural. Y para los edificios de las zonas con clima cálido húmedo proponen combinar sistemas pasivos con sistemas activos (HVAC convencionales) como las bombas de calor con fuente el aire, las enfriadoras de líquido por absorción y las redes de enfriamiento distrital. En este estudio García et al. (2014) también clasificaron a los edificios comerciales y de servicios en hoteles, edificios de oficinas, escuelas, hospitales, restaurantes, tiendas de compras y supermercados.

Aunque García et al. (2014) propusieron una combinación de sistemas pasivos y sistemas HVAC convencionales para reducir la demanda de energía eléctrica en los edificios no residenciales en tres tipos de clima, no consideraron utilizar los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia) ni los sistemas activos (HVAC sostenidos con energías renovables).

En 2014, Mena et al. (2014) sugirieron qué para disminuir la demanda de energía dentro de un edificio sin sacrificar el confort, se debía considerar la exaltación del comportamiento pasivo de la envolvente del edificio, usar sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y usar sistemas de climatización alimentados eléctricamente por fuentes provenientes de la energía geotérmica o por sistemas fotovoltaicos.

Aunque se sugieren algunas formas de climatizar los edificios mediante sistemas que disminuyan o eviten el uso de combustibles fósiles, los autores de este trabajo no sugieren una metodología de climatización estructurada por pasos ni se dicen las razones por la cuales se deben usar de esta manera y como pasar de un sistema a otro.

Cho et al. (2014) afirmaban en 2014 que la demanda de energía de un edificio de oficinas se puede reducir hasta en un 50 % si se tomaba en cuenta un diseño pasivo; hasta en un 20 % si se usaban sistemas activos (HVAC con alta eficiencia); y hasta un 15 % se utilizaban sistemas de control óptimos y se generaba electricidad mediante fuentes renovables y se alimentaba eléctricamente a los sistemas.

Aunque estos autores recomiendan el uso de dos sistemas de climatización para los edificios solo consideran el uso de las energías renovables con los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y no indican cual sistema se usará primero y cual después.

Ante el incremento en el uso del incremento en el uso de los combustibles fósiles en los sistemas activos (HVAC convencionales), se hace necesario un cambio significativo en las formas de climatizar los edificios que promueva la sustentabilidad energética. Para ello es importante proponer una metodología de climatización de los edificios que evite las fallas que Xiao y Wang (2009) reportan y que existen dentro de todo tipo de sistema activo.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

En el siguiente apartado se presentan los antecedentes revisados para los métodos de definición de los requerimientos de climatización y evaluación de sistemas.

1.3 Métodos para definir los requerimientos de climatización que consideran el clima

Palacios (2012) indica que en 1963 los hermanos Víctor y Aladar Olgay propusieron el término diseño bioclimático para resaltar la importancia que tenían las múltiples relaciones entre la vida y el clima. Palacios (2012) también explica que en ese tiempo los hermanos Olgay propusieron un método a través del cual el diseño arquitectónico se realiza respondiendo a los requerimientos climáticos específicos del lugar en donde se localiza la edificación. El método propuesto por Olgay tomaba en cuenta el análisis por año de los datos climáticos de una región. Además se elegía la orientación, la forma del edificio y los movimientos del aire interior y exterior.

Aquí se observa que de acuerdo con Olgay la base de toda metodología de climatización debe empezar por la información general del lugar y el estudio del bioclima. En este se muestran los requerimientos de climatización como parte de un método.

Para 2012, Schellen et al. (2012) realizaron un estudio del confort térmico que experimentaron 20 personas (10 hombres y 10 mujeres) entre 20 y 29 años de edad cuando era expuestos a enfriamiento convectivo y radiactivo de los sistemas activos (HVAC convencionales) en un edificio de Eindhoven, Holanda. Sus resultados reportaron que cuando los ocupantes del edificio estaban entre 16 °C y 20 °C se tenía una disminución en la demanda de energía eléctrica de los sistemas activos (HVAC convencionales) pero aumentaba el discomfort, principalmente en los ocupantes del sexo femenino que experimentaron malestar en la piel de brazos y piernas. Esto se debió principalmente a un enfriamiento no uniforme del aire del espacio interior.

Este estudio se observa que toda metodología para climatizar cualquier edificio debe tomar en cuenta como base fundamental el confort de sus ocupantes.

En 2013, Ge et. al. (2013) concluyeron que para los edificios ubicados en cinco zonas climáticas en China con clima cálido y húmedo, la temperatura y la humedad relativa del aire interior eran dos parámetros importantes que afectaban el confort y la eficiencia energética de los sistemas activos (HVAC convencionales) de enfriamiento. Sus resultados mostraron que el consumo de energía en los sistemas activos disminuía de un 5.20 % a un 6.20 % cuando la temperatura del aire interior del edificio aumentaba en 1 °C manteniendo constante la humedad relativa. Este consumo disminuía de un 10 % a un 20 % incrementando la humedad relativa del

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

40% hasta el 70 % para una misma temperatura interior. Estos autores sugirieron seleccionar una humedad relativa de diseño del 70 % para climas húmedos y una humedad de 55 % para clima secos para tener una disminución del consumo energético en los sistemas activos (HVAC convencionales) de enfriamiento.

En este trabajo se resalta la importancia que tiene el realizar un estudio del bioclima de la región donde se localiza el edificio.

En el estudio realizado en 2013 a un sistema híbrido (HVAC sostenido con energía solar) a un edificio de 2 pisos ubicado en la provincia de Almería, España, Mena et al. (2014) reportaron que los factores climáticos que más influían en la demanda de 60 kW del sistema híbrido eran la temperatura del aire exterior de 33 °C, la radiación solar incidente (800 W/m²), la velocidad del viento por encima de 1 m/s y su humedad relativa del 55 %, con lo cual se podía reducir a un intervalo de 50 kW y 58 kW.

En el trabajo anterior se resalta la importancia que tiene el estudiar el bioclima dentro de la metodología con el fin de sintetizar y diagnosticar todos aquellos factores que influyen en el confort de los ocupantes del edificio.

1.4 Evaluación de sistemas de climatización

Rincón et al. (2001) evaluaron en el año 2000 experimental y analíticamente el desempeño de un sistema pasivo de enfriamiento en un prototipo de casa ubicada en la ciudad de Maracaibo, Venezuela bajo un clima cálido húmedo. En su estudio concluyeron lo siguiente:

- Que es posible reducir la carga térmica de enfriamiento a través de fachadas exteriores en porcentajes del 41 % al 66 %.
- Que el potencial de enfriamiento del sistema estudiado es de 19.4 W/m² K para el mes de agosto y de 24 W/m² K para el mes de enero.
- Bajo condiciones de un cielo despejado, el 16 % de la capacidad de enfriamiento del sistema pasivo se reducía debido a la evaporación del agua y aun incremento en la velocidad del viento del lugar.

Este estudio resalta que la capacidad de enfriamiento de un sistema pasivo depende además de su diseño del bioclima.

Philappacopoulos y Berndt (2001) citado por Mustafa (2008b) afirmaban que las bombas de calor con geotermia tenían el potencial para disminuir la demanda de energía por enfriamiento de un edificio desde un 30 % hasta un 50 % y la demanda de energía por calentamiento de un 20% hasta un 40 %. Este sistema representa dentro del campo de los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

renovables) una buena opción para climatizar edificios siempre y cuando el factor financiero lo permita.

Pérez-Lombard et al. (2008) reportaron que en el sector residencial los sistemas de climatización consumieron en 2003 el 42 % de la energía final de España, 68 % en la Unión Europea; el 53 % en los Estados Unidos; y el 62 % en Reino Unido. Y agregaron que los sistemas de climatización en los edificios públicos alcanzaron un 32 % de la energía final en los Estados Unidos de América, 22 % en España, y 22 % en Reino Unido, porcentajes por encima de los alcanzados por los edificios usados para oficinas, hoteles y restaurantes. Concluyeron que el consumo de energía total utilizada en los países desarrollados comprendía de un 20-40 % y estaba por encima de la energía consumida en el sector industrial y de transporte.

En este estudio se observa que los edificios existentes de todo tipo tienen porcentajes superiores al 22 % dentro del consumo energético de diferentes países por lo que estos porcentajes se deben disminuir con metodologías que permitan la climatización de manera sustentable energéticamente.

Pan et al. (2007) evaluaron en 2004 el consumo de energía de un edificio de 88 pisos en Shanghai, China, y en sus resultados indicaron que lo más electricidad consumió fue el sistema de enfriamiento, con un 40 % (6 GWh) de la energía del edificio en los meses de julio y agosto y la calefacción y la humificación consumieron un 31 % del gas (340 ML) en el mes de enero. Este sistema estaba constituido por 8 enfriadoras de líquido de tipo centrífugo (6 de 4220 kW y 2 de 1,408 kW), unidades ventilador-serpentin de cuatro tubos, 6 torres de enfriamiento de 90 kW y una caldera.

En este trabajo no se tomaron en cuenta los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y solo se evaluó el consumo de los sistemas activos (HVAC convencionales).

En el mismo año, McNeil y Letschert (2008) evaluaron por medio de un modelo matemático predictivo, que el consumo de electricidad por el uso de aires acondicionados de tipo ventana y mini-divididos pasaría de 110 TWh en 2005 a 760 TWh en 2030 para el caso de los hogares mexicanos y de 80 TWh en 2005 a 650 TWh en 2030 para el caso de los hogares en el Medio Oriente. Este trabajo presenta predicciones que anuncian importantes incrementos en los consumos de energía eléctrica en países como México y los ubicados en Medio Oriente por lo que se hace visible el constante incremento en el uso de combustibles fósiles de por parte de los sistemas activos (HVAC convencionales).

Bakker et al. (2005) presentaron el arreglo de una bomba de calor y geotermia y 25 m² de paneles fotovoltaicos ensamblados con un colector solar térmico. Y

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

encontraron que el sistema podía cubrir 8.9 GJ/10 años para calentar 88 m² de un edificio con uso residencial en Alemania. Dentro de los resultados calculados con el programa de simulación de sistemas transitorios (TRNYS, por sus siglas en inglés), Bakker et al. (2005) encontraron que la máxima temperatura que puede alcanzar el suelo fue a la mitad del noveno año (15 °C). Finalmente simularon en su estudio un suelo con una conductividad térmica de 2.8 W/m K ocasionaba que el sistema bajara su demanda a 7.3 GJ/10 años mientras que un suelo con una conductividad térmica 1.5 W/m K demandaba 7.7 GJ/10 años, es decir reportaron un beneficio energético aproximado del 5 %. Aquí se observa que una de las variables físicas que se deben estudiar en los sistemas híbridos (HVAC asistidos por energía geotérmica) es la temperatura que puede alcanzar el suelo en donde se enterrara el serpentín en diferentes estaciones del año.

Según Alfonso (2006) un sistema activo (HVAC convencional) de enfriamiento de tipo dividido y enfriado por aire puede disminuir su demanda energética desde un 60 % y hasta un 75 % si utiliza energía eléctrica generada por paneles fotovoltaicos en comparación con un sistema activo (HVAC convencional) enfriado por agua y alimentado por electricidad de la red eléctrica. La utilización de las energías renovables en los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) promueve la disminución del consumo de electricidad porque no utilizan combustibles fósiles para su operación.

En ese mismo año, Torres y Morillón (2006a) presentaron un trabajo que estudiaba el funcionamiento termodinámico de una bomba de calor geotérmica con tuberías enterradas de cobre y de plástico. Se hace mención de las ventajas energéticas de utilizar este sistema en comparación con los sistemas activos (HVAC convencionales) de bombas de calor con fuente de calor el aire. Aquí se resalta la importancia que tiene tomar en cuenta a los sistemas asistidos por energía geotérmica para climatizar edificios de forma sustentable energéticamente.

También en ese mismo año, Torres y Morillón (2006b) presentaron un trabajo en donde analizaban la conductividad térmica del subsuelo en la delegación Cuajimalpa, esto para enterrar el serpentín de las bombas de calor con geotermia en la ciudad de México y reportaron que la conductividad oscilaba en un rango de entre 0.57 W/m K y 2.92 W/m K a una profundidad de 10 m. Además indicaron que los compuestos del subsuelo eran cuarzo, minerales de arcilla, material orgánico, agua y aire. En este trabajo se muestra que los silicatos compuestos como la arena de mar pueden ser un buen sumidero o fuente de calor de los sistemas HVAC asistidos por energías renovables.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

En 2007, Johnson Controls (2007) diseñó e instaló en un edificio de oficinas de 2,195 m² ubicado en San José California, Estados Unidos de América, un sistema de aire acondicionado a base de una bomba de calor geotérmica, un sistema de calefacción de piso radiante, una unidad manejadora de aire alimentados eléctricamente por una planta solar y que complementan la climatización con vidrios electrocrómicos, iluminación y ventilación natural. Aunque algunos de los sistemas activos que se instalaron ahorran energía otros no, como es el caso del sistema de calefacción de piso radiante, esto debido principalmente a que no se desarrolló un método que permita climatizar el edificio primero con sistemas que no demanden combustibles fósiles.

Un año más tarde, Henning (2007) presentó una revisión del proyecto titulado Almacenaje, Absorción, Densidad y Módulo de Alta energía (MODESTORE por sus siglas en inglés) que era un sistema HVAC que combinaba tres sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energía solar).

Aunque con este prototipo se podían alcanzar temperaturas de agua caliente de hasta 43 °C para alimentar los serpentines de la bomba de calor, no se han hecho estudios sobre el comportamiento térmico del suelo en donde se enterró el serpentín, esto para disminuir la demanda de energía eléctrica de la bomba de calor geotérmica

En ese mismo año Eicker et al. (2007) presentaron una investigación en donde mostraban la relación que guardaba la conductividad térmica del subsuelo con la capacidad de calentamiento de la bomba de calor con geotermia utilizada en el clima cálido de la isla de Creta, en Grecia durante la época de verano del 2006. Asegurando que si el suelo estuviera constituido por arena húmeda y tuviera una conductividad térmica de 2.5 W/mK se podía tener una disminución en la demanda de energía del sistema híbrido de hasta un 8 %.

Como se puede observar en el trabajo anterior el estudio la arena húmeda puede ser utilizada como sumidero y fuente de calor de las bombas de calor utilizando como fuente de calor a la tierra.

En 2008, Mustafa (2008b) afirmaba que un sistema de bomba de calor que utiliza como fuente de calor la tierra podría ahorrar de un 30 % y hasta un 40 % en comparación con la electricidad utilizada por un sistema HVAC convencional. Mustafa (2008a) recomendaba que era posible alcanzar disminuciones en la energía de los edificios mediante el uso de la tierra y con el uso de energías renovables como los paneles fotovoltaicos. Las sugerencias emitidas por Mustafa (2008a) se pueden utilizar en los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

renovables), ya que algunos sistemas usan el suelo como fuente y sumidero de calor y podrían utilizar la energía generada por paneles fotovoltaicos.

En 2009, Priyadarsini et al. (2009) presentaron un trabajo en donde 29 hoteles de diferentes partes de Singapur debían ser climatizados con ventiladores-serpentin y unidades de generación de agua helada. La evaluación del consumo de energía eléctrica por el uso de las generadoras de agua helada alcanzó un 44 % de la energía eléctrica total utilizada en los hoteles (427 kWh/m²) mientras que las unidades de calentamiento y ventilación mecánica demandaron hasta un 24 % de la electricidad y un 9 % del gas. Aquí se resalta la enorme dependencia que tienen los sistemas activos (HVAC convencionales) con los combustibles fósiles como la electricidad y el gas.

En ese mismo año, Maldonado (2009) reportó la climatización de un colegio ubicado en Puerto Montt, Región de Los Lagos, Chile en donde se climatizaron 2,190.77 m² con un sistema con bomba de calor geotérmica. La instalación de este sistema representó una disminución en la demanda de energía eléctrica de hasta un 20 %. Aunque Maldonado (2009) reportó que la demanda de energía eléctrica descendió hasta un 20 % con solo aislar la casa y usar un sistema híbrido a base de una bomba de calor con geotermia no considero el uso de sistemas pasivos o activos (HVAC de alta eficiencia energética).

Para el 2010, Fong et al. (2010) estudiaron el comportamiento energético de 5 diferentes sistemas activos de enfriamiento para edificios ubicados en Hong Kong que eran alimentados eléctricamente por paneles fotovoltaicos y colectores solares de tubos evacuados. Y concluyeron que se alcanzaron de un 15.6% a un 48.3 % de ahorro de energía eléctrica anual en comparación con los sistemas HVAC que usaban condensadores enfriados por aire y de un 8 % a un 43.7 % con sistemas activos (HVAC convencionales) que usan condensadores enfriados por agua. Este trabajo resalta la importancia que tiene el climatizar los edificios con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) y como una tercera opción.

En ese mismo año, Hong y Xiaobing (2010) presentaron un estudio comparativo entre la climatización de dos edificios pequeños de oficinas localizados en Miami y en Chicago en los Estados Unidos de América. El estudio basado en las simulaciones con los programas EnergyPro y eQUEST mostró que cuando se climatizan los edificios con sistemas de bomba de calor y empleando como fuente de calor a la tierra y sistemas VRF se disminuía el consumo de electricidad de un 90.60 % a un 76 % con los sistemas de bomba de calor y fuente la tierra sobre los sistemas VRF.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

La bomba de calor y fuente el subsuelo puede ser considerada como uno de los primeros sistemas que pueden ser utilizados como sistemas HVAC asistidos por energías renovables e incluso sustituir a los sistemas VRF en la climatización de edificios.

Un año más tarde, el Instituto Europeo de Funcionamiento del Edificio (2011) (BPIE, por sus siglas en inglés) estimó que los edificios europeos de uso residencial consumieron en 2009 el 40 % de la energía total del continente. Y agregó que este sector fue el que más energía consumió seguido por el sector del transporte con un 33 % y de este porcentaje un 70 % era empleado para el calentamiento de los espacios europeos. Finalmente, reportaron qué para el caso de los edificios con uso no residencial, estos consumieron el 26 % de la energía total en 2009 (BPIE, 2011).

Los altos porcentajes de consumo de combustibles fósiles utilizados para climatizar los edificios europeos deben disminuirse con sistemas que eviten el uso de los combustibles fósiles.

Según NBI (2011) cuando se recurre a un buen diseño y selección del sistema HVAC convencional se puede obtener hasta un 20 % de ahorro de energía en el edificio, mientras que un mal diseño y mala selección pueden resultar en un aumento de la demanda energética de hasta un 60 %. Esta puede aplicar tanto a los sistemas pasivos como a los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

En 2012, la Universidad de Ball State (BSU por sus siglas en inglés) en Indiana, terminó de poner en funcionamiento la instalación del sistema con bomba de calor geotérmica más grande del mundo, el cual enfría 47 edificios y calienta 20. La construcción continuó en 2013 y 2014 y calienta y enfría una superficie 511,152 m². Igual que el caso de estudio anterior no se realizó el estudio del suelo para evitar perforar a grandes profundidades el suelo estadounidense y no se desarrolló alguna metodología para climatizar los edificios basada en sistemas pasivos y sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

En octubre de 2013, Tennokese et al. (2013) publicaron un trabajo que comparaba el consumo de energía de una bomba de calor con geotermia y otra con fuente el agua-aire cuando climatizan una casa de dos pisos y 200 m²-de superficie en Taillin, Estonia. En la simulación realizada la bomba de calor con geotermia consumió 1.24 kWh anuales mientras que la bomba de calor con fuente agua-aire consumió 1.47 kWh anuales.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

En esta simulación no se utilizan sistemas fotovoltaicos para evitar el uso de la electricidad en la bomba de calor geotérmica.

En mismo año, Wang et al. (2013) evaluaron en 2013 los potenciales ahorros de energía que se tenían en un equipo de aire acondicionado de tipo central cuando se instalaba en 4 edificios: un edificio pequeño de oficinas, un edificio residencial, un centro comercial y una tienda de supermercado. Se auxiliaron con el programa Energy Plus y simularon los ahorros energéticos colocando los cuatro edificios en 16 estados de los Estados Unidos de América, obteniendo valores de entre el 14 % y el 42 %. Aunque estos autores estimaron los ahorros de energía en los sistemas activos (HVAC convencionales) no desarrollan una metodología para climatizar estos edificios usando otros tipos de sistemas como los pasivos y los sistemas híbridos (HVAC sostenidos energías renovables).

Para 2014, Mena et al. (2014) monitorearon durante 2013 el edificio CIESOL de 1,100 m² ubicado en Almería, España. El edificio era climatizado con sistemas compuestos por un chiller por absorción, dos colectores solares planos, a un tanque de almacenamiento de agua caliente, a un boiler para calentamiento de agua que usaba electricidad, una bomba de calor con fuente agua alimentada eléctricamente con un sistema fotovoltaico, y una torre de enfriamiento. Encontraron que el sistema demandaba 39.47 kW en invierno, 60.77 kW en verano, 42.45 kW en otoño y 59.31 kW en primavera. Dentro de los equipos que componían al sistema, la bomba de calor que tenía como fuente de extracción y sumidero de calor el agua fue la que más demandó energía eléctrica con 56.05 kW en un día promedio de operación.

Aunque en el trabajo anterior se monitoreó y climatizó el edificio con 3 diferentes sistemas activos (HVAC convencionales) y se suministró energía eléctrica con paneles fotovoltaicos no se tomaron en cuenta los sistemas pasivos para disminuir el consumo de energía eléctrica.

Zhu et al. (2014) combinaron las tecnologías activas de VRF y VAV en un sistema de aire acondicionado para reducir su demanda energética. En sus resultados encontraron que el control podría reducir la demanda de energía eléctrica hasta en un 32.17 % para el período de verano y en un 2.47 % para el invierno.

Este estudio abre la posibilidad de diseñar sistemas de control que demanden menos electricidad en los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) y considerar el control también en los sistemas pasivos.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

En ese mismo año, Santoli et al. (2014) elaboraron una investigación que mostraba que en todo edificio para que el sistema de climatización sea energéticamente sustentable debe recibir energía eléctrica de un sistema fotovoltaico, el edificio debe contar con protecciones solares y utilizar sistemas como las bombas de calor con fuente de extracción y sumidero de calor el agua-tierra.

Esta propuesta sugiere de manera general que los edificios usen sistemas fotovoltaicos para generar su electricidad, sistemas híbridos que tomen el calor de el agua y la tierra y el edificio tenga control solar. Este trabajo no toma en cuenta el confort de los ocupantes del edificio y el uso de sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

A finales de 2014, Skygreen (2014) indicó que la combinación de los sistemas activos (HVAC convencionales) y los sistemas híbridos (HVAC sostenidos por energías renovables) pueden disminuir hasta un 50 % de la energía eléctrica que los sistemas activos (HVAC convencionales) solos consumen. Y agrega que utilizar energía térmica y solar en un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) disminuye su consumo de electricidad de hasta el 75 % en comparación con los sistemas activos (HVAC convencionales).

Utilizar diferentes energías renovables para suministrar electricidad o energía térmica a través de colectores solares planos, parabólicos, de tubos al vacío, sistemas fotovoltaicos a los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) puede evitar el uso de combustibles fósiles.

1.5 Métodos de climatización para edificios revisados en la literatura

Pan et al. (2007) propusieron en 2006 un método para disminuir el uso de la energía eléctrica en un rascacielos con uso comercial ubicado en Shanghai, China. Su método solo tomaba en cuenta datos del clima, datos del edificio, horarios de ocupación, datos históricos de operación mínima de un año, climatización del edificio con sistemas activos (HVAC convencionales) y masa de la envolvente. Se corrió una simulación con el programa DOE 2 con los datos recolectados y se fueron modificando valores como el tiempo de ocupación para ir disminuyendo el cálculo del consumo energético de los sistemas de climatización convencionales del edificio.

Aunque estos autores alimentaban su modelo con una serie de datos y realizaron simulaciones del consumo energético de los sistemas HVAC convencionales no indicaron que porcentaje de disminución de energía eléctrica, gas natural o ambos se alcanzan con su modelo.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Wang et al. (2009a) propusieron en 2008 un método para climatizar una casa en el Reino Unido. Wang et al. (2009a) solo simuló con el programa TRNSYS varios sistemas HVAC de alta eficiencia energética como las unidades paquete solo frío alimentadas eléctricamente primero con la energía suministrada por paneles fotovoltaicos y posteriormente con turbinas eólicas.

Aunque Wang et al. (2009a) emitieron recomendaciones de diseño arquitectónico como parte de su método, este solo se enfocó en aumentar el aislamiento térmico de los muros exteriores, cambiar la orientación de la casa y establecer cuatro relaciones entre el tamaño de la ventana con respecto a la superficie total de los muros exteriores. No sugirieron utilizar algún sistema pasivo antes de usar los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables). En su estudio comparativo estos autores no indicaron a cuánto ascendió la disminución en el consumo de energía eléctrica por el uso de los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) cuando se comparan con los sistemas activos (HVAC convencionales).

En 2012 Ceballos (2012) desarrolló una metodología para hacer una casa cero-energía basada en 3 etapas. El primer paso es un edificio que dentro de su diseño consideraba la arquitectura bioclimática, el segundo paso tomaba en cuenta el uso de tecnología eficiente para promover el ahorro de gas y la electricidad, y finalmente el último paso que considera la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables. Esto lo realizó para que la vivienda interactuara con el medio ambiente, ahorrara gas y electricidad, y generara su propia electricidad, es decir buscando alcanzar el máximo uso eficiente de la energía.

Aunque este autor estudia el tema de la sustentabilidad energética en la vivienda en su metodología y utiliza algunos sistemas pasivos de climatización y pequeños sistemas activos (HVAC convencionales) no estructura una metodología para climatizar los edificios que considere el uso de sistemas pasivos, sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

En 2014, Cho et al. (2014) presentaron una metodología enfocada a disminuir el consumo de energía de los sistemas activos (HVAC convencionales) de los edificios. Esta metodología estaba considerando un cálculo de la carga de enfriamiento o calentamiento del edificio, la selección de sistemas activos eficientes energéticamente, diseñar sistemas de control precisos para encender y apagar los sistemas activos de climatización y generar electricidad para alimentar a estos sistemas. Con esta metodología se alcanzaba disminuir el consumo de energía eléctrica hasta un 62 %.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

Aunque Cho et al. (2014) propusieron una metodología para disminuir la demanda de energía eléctrica de los sistemas HVAC convencionales no consideran el uso de sistemas HVAC asistidos por energías renovables. Tampoco indican como alcanzar un 50 % en la disminución de la demanda de energía eléctrica con el diseño pasivo del edificio.

En el mismo año, Santoli et al. (2014) afirmaron que para disminuir el consumo de energía de un edificio, el método de diseño debe tomar en cuenta escudar la envolvente del edificio para reducir las cargas de enfriamiento en verano y de calentamiento en invierno, usar unidades de generación de agua helada o caliente, usar bombas de calor con fuente y sumidero de calor el agua-agua o el agua-tierra y usar sistemas activos (HVAC convencionales) que operen con paneles fotovoltaicos.

Este trabajo se limita solo a aislar térmicamente la envolvente del edificio contra la radiación solar y usar sistemas pasivos con doble cubierta de vidrio y algunos sistemas de bomba de calor con serpentines sumergidos en agua o enterrados en la tierra, pero no propone una metodología que indique de manera detallada como climatizar el edificio y como disminuir el consumo de combustibles fósiles hasta hacerlos 0 kWh. Con su método los autores solo logran disminuir el consumo eléctrico hasta un 54 %.

Vakiloroaya et al. (2014) propusieron un método para climatizar un edificio utilizando diferentes sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética). El método estaba basado en seleccionar diferentes configuraciones de sistemas de enfriamiento con agua helada, sistemas por compresión de vapor, y en el uso de un sistema de manejo de la energía. Estos autores indicaron que con el sistema de manejo de energía se puede alcanzar hasta un 66.67 % de disminución en el consumo eléctrico de los sistemas activos (HVAC convencionales) mientras que con el uso de las diferentes estrategias se puede alcanzar solo un 75 % de disminución del consumo eléctrico.

Estos autores solo se enfocaron en estudiar las diferentes estrategias para ahorrar energía en los diferentes sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y no consideraron ni el uso de sistemas pasivos de climatización, ni el uso de sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

En febrero del 2016, Abdul et al. (2016) propusieron un método para climatizar con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) el hospital Kiowa, en Kansas en los Estados Unidos de América. Los sistemas HVAC de alta eficiencia eran enfriadores de líquido con rodamientos magnéticos, sistemas de recuperación de calor y sistemas de Volume de Aire Variable (VAV). La metodología para seleccionar

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

los sistemas HVAC de alta eficiencia energética partía de identificar las metas del proyecto de climatización, los requerimientos de un programa a seguir, las limitantes, los deseos y expectativas de las instalaciones, calcular las cargas de enfriamiento y calentamiento y seleccionar los sistemas. La disminución de energía eléctrica reportada con esta metodología fue del 40 % la cual consideraba que los sistemas de alta eficiencia energética disminuían el consumo hasta un 68 % y un generador eléctrico de viento disminuía el consumo hasta en un 60 %.

Aunque estos autores climatizaron el hospital solo tomaron en cuenta los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y no consideraron otros tipos de sistemas de climatización como los sistemas pasivos.

Además no incluyeron una nueva clasificación que incluyera a los sistemas con temperatura de refrigerante variable (VRT por sus siglas en inglés).

CAPÍTULO II
CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN
EDIFICIOS

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

En este capítulo se define el concepto de climatización y se describen sus necesidades tomando en cuenta la energía y el confort en los edificios. Posteriormente se presenta una forma de determinar los requerimientos y como se clasifican los sistemas de climatización. Se muestran las definiciones de sistema pasivo, activo (HVAC de alta eficiencia energética) e híbrido (HVAC sostenidos por energías renovables), su funcionamiento y principales características.

2.1 Definición de climatización

ASHRAE (2016) define textualmente la climatización de la siguiente manera: "Es el proceso de tratamiento del aire para satisfacer las necesidades de un espacio acondicionado mediante el control de su temperatura, humedad, limpieza, y distribución".

2.2 Necesidades de la climatización en edificios: energía y confort

Una forma de recibir energía del cuerpo humano es a través de los alimentos que consume. Esta energía es procesada dentro del cuerpo a través de diversos procesos metabólicos que producen calor. La literatura define a la producción de calor metabólico como la cantidad de calor emitida por una persona sentada y descansando tranquilamente (100 W).

Para normar a personas de diferentes tamaños, el metabolismo se expresa en watts por unidad de área de la piel. Esta unidad especializada, es mejor conocida como MET o índice metabólico, y se define en términos de múltiplos de metabolismo basal por ejemplo: 1 MET es igual a 58.15 W/m² (ASHRAE, 2005).

Fanger (1972) citado por Borjórquez (2010) estableció los siguientes rangos de energía que el cuerpo genera por actividad.

Tabla 2.1 Energía que el cuerpo genera por actividad.

Nivel de actividad	Sedentario (Pasiva)	Medio (Moderada)	Alto (Intensa)
Mínima-Máximo (W/m ²)	58-87	87-145	145-232

Fuente: Fanger (1972)

El calor producido por el metabolismo basal hace que los seres humanos mantengan su temperatura corporal dentro de un pequeño rango de entre 36 °C y 38 °C, lo que ocasiona que la piel sea el órgano principal que controle el flujo de

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

calor y humedad hacia el medio ambiente circundante. La piel contiene por lo tanto sensores térmicos que participan en el control termoregulatorio del cuerpo, y que afectan su sensibilidad y confort térmico.

La ASHRAE (2001) indica que entre otros factores físicos la temperatura, humedad, velocidad del aire, y la energía radiante influyen en el ambiente interior del edificio. También que estos agentes físicos pueden afectar de manera directa a los ocupantes del edificio e influir en la forma en que estos ocupantes responden al ambiente interior.

Afirma que el ambiente térmico afecta a la salud humana ya que afecta la temperatura del cuerpo, tanto en la parte interna como en la externa de la piel. Las temperaturas internas del cuerpo para un adulto normal, saludable, y en reposo, son muy estables, con variaciones rara vez superiores a 0.5 K (ASHRAE, 2001). Su temperatura promedio medida vía oral es de aproximadamente 37 °C y medida vía rectal, es de 0.5 K superior (ASHRAE, 2001). En caso contrario, la temperatura de la piel puede variar de aproximadamente 31 °C a 36 °C en entornos y actividades normales, y también varían a lo largo diferentes partes de la piel, presentando la mayor variación en las manos y los pies.

Las propiedades térmicas de las ropas de los ocupantes del edificio y el metabolismo dependen de la edad, la complejión física y tipo de actividad de los ocupantes del edificio (Morillón, 1993).

La ASHRAE (2001) afirma que una persona en reposo con pantalones y camisa de manga larga experimenta confort térmico en un entorno de aire en reposo a 24 °C y que la zona de confort se extiende alrededor de 1.5 K por encima y por debajo de este nivel óptimo. Afirma textualmente que:

"La producción de calor metabólico tiende a disminuir con la edad, como resultado de la disminución de metabolismo basal junto con disminución de la actividad física. La producción de calor metabólico a la edad de 80 años es de aproximadamente 20 % menos que a la edad de 20 años, para una estatura y masa de personas comparables".

Para el caso específico de la hipertemia las funciones de termorregulación como son la sudoración y la vasodilatación periférica cesan aproximadamente a los 43 °C, después de lo cual la temperatura del cuerpo tiende a aumentar rápidamente si no se aplica un enfriamiento externo. En ambientes calientes, la cantidad de ropa se puede reducir, el nivel de actividad física también se puede reducir, y crear un ambiente más propicio para el incremento de la pérdida de calor (ASHRAE, 2001).

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Por lo que al proceso en el cual las personas tienden a reaccionar física y psicológicamente tratando de recuperar su confort se le llama adaptación (Nicol y Humphreys, 2002).

Para que un 80 % o más de los ocupantes de un edificio puedan estar bajo un ambiente confortable se deben tomar en cuenta factores como el metabolismo de la persona; el aislamiento térmico de la ropa; la temperatura promedio del aire que circunda a los ocupantes del edificio; la temperatura promedio de las superficies que rodean a los ocupantes; la velocidad del aire; y la humedad del aire (ASHRAE, 2010).

La sensación de bienestar depende de las características termodinámicas del ambiente como son (Jutglar et al., 2011):

1. Las características objetivas del aire ambiente que se puede medir como son la temperatura, humedad, velocidad, etc.
2. Las características objetivas del recinto que no se pueden medir fácilmente y que se calculan como son la temperatura radiante de un conjunto de superficies, la temperatura resultante, etc.
3. Las características que dependen del sujeto y que de cierta manera pueden medirse como son la vestimenta, la actividad metabólica, etc.
4. Las características que dependen del sujeto y que no pueden medirse como son su criterio de bienestar, gustos, pareceres, etc.
5. Y las variables de índole mecánica como son el ruido y las vibraciones.

Muchos modelos de confort han sido desarrollados en los últimos años en un intento por aproximarse a predecir la realidad. Algunos de estos modelos están enfocados en alcanzar y mantener una temperatura interior del edificio y toman como base el índice Votado Promedio Predicho (PMV, por sus siglas en inglés). Algunos autores proponen valores para el índice metabólico, la velocidad, temperatura y humedad del aire interior. En el siguiente apartado se muestran algunas generalidades sobre estos conceptos.

2.2.1 Confort

Como punto de partida del tema de climatización se tiene a la termofisiología. De acuerdo con lo tratado en el apartado anterior esta se ve influenciada principalmente por los factores e intercambios de calor mencionados en el apartado 2.2.

Dentro de los factores que influyen en el confort además de la temperatura del aire interior está la velocidad del aire, la cual no debe ser demasiado alta para que cause

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

escalofrío o pérdida de calor a través de la superficie de la piel por lo que 0.1 m/s es un valor propuesto por Matzarakis (2007).

La ASHRAE (2010) propone un método gráfico para determinar las condiciones de confort y aceptabilidad del 80 % de los ocupantes de un edificio. Y también considera un 10 % por concepto del criterio de desconfort basado en el Índice que predice el valor promedio de los votos de un gran grupo de personas en los siete puntos de la escala de sensación térmica y un 10 % en personas insatisfechas. Una temperatura interior de entre 21.3 °C y 24 °C y humedad relativa del 50 % son sugeridos por la ASHRAE (2010) para alcanzar el confort térmico en el interior de un edificio.

2.3 Forma de determinar los requerimientos de climatización

Existen varias formas para determinar los requerimientos de climatización desarrolladas por diversos autores en la literatura y se tomará la propuesta por Morillón et al. (2004) por incluir varias herramientas y métodos. La forma se resume de la siguiente manera:

1. Obtener los datos climatológicos de las temperaturas promedio máxima y mínima mensual y la temperatura media
2. Calcular la temperatura neutral (T_n) utilizando la ecuación propuesta por Auliciems (1983)
3. Calcular la amplitud de la zona de confort. Esta amplitud teniendo como centro la temperatura neutral determina los límites de la zona de confort
4. Definir las condiciones de sensación térmica mediante el procesamiento de los datos de temperatura y humedad con los diagramas de Givoni y Olgyay
5. Con las cartas de Olgyay y Givonni para cada uno de los meses del año se concentran los datos en un diagrama de isorequerimientos para observar las condiciones de confort y los periodos de frío y calor. Esto para las 24 horas de día y los 12 meses del año
6. A partir del diagrama de isorequerimientos se identificarán las estrategias particulares de climatización para cada uno de los periodos.

Una vez que se ha descrito una de las formas para determinar los requerimientos de climatización en los edificios se hace necesario conocer como se clasifican y subdividen los sistemas de climatización.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

2.4 Clasificación y eficiencia energética de los sistemas de climatización

Paul (1979) citado por Barber (2012) definió que los sistemas pasivos se utilizan para recolectar, almacenar y distribuir la energía térmica por radiación natural, conducción, y convección a través de un diseño sofisticado y una sabia selección de los materiales de construcción.

Givoni (1984) clasificó a los sistemas pasivos como sistemas de enfriamiento convectivo, enfriamiento radiante y enfriamiento evaporativo. El enfriamiento evaporativo también lo subdividió en enfriamiento directo e indirecto. Givoni (1984) señaló también que la tierra podía servir como fuente de enfriamiento tanto en sistemas pasivos como en sistemas HVAC convencionales.

Morillón (2004) también clasificó a los sistemas de climatización por sus características en: sistemas pasivos, cuasipasivos, activos, híbridos, naturales y de autoclimatización.

También subdividió a los sistemas pasivos por su configuración estructural, su género y los requerimientos de climatización. Por género los subdividió en:

- Enfriamiento o calentamiento directo,
- Enfriamiento o calentamiento indirecto,
- Y enfriamiento o calentamiento aislado.

Por otra parte, y partiendo del diagrama de isorrequerimientos, clasificó a los sistemas pasivos por los requerimientos de climatización en:

- Control Térmico
- Enfriamiento
- Y calentamiento

Además, propuso algunos ejemplos para enfriamiento como los siguientes:

Enfriamiento directo: Claraboyas operables, chimeneas de aire fijas y operables, respiradores de aire en Irán, edificaciones subterráneas, uso del agua y la vegetación para crear microclimas, y enfriador evaporativo en New Gourná, Egipto.

Enfriamiento indirecto: Muro Trombe para enfriamiento: ventilación inducida, techo con estanque de agua, extractores eólicos de aire, chimeneas solares, sistema de doble envolvente (vigueta y bovedilla), torres de viento, techos sombreados, ductos enterrados, y techo de concreto con aislamiento operable.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Enfriamiento aislado: Sistema Hill en Pont Moresby Australia ductos subterráneos, torre de viento, aberturas a nivel del piso y alero, y sistema living con material reflectivo.

Y para el calentamiento, propuso los siguientes sistemas:

Calentamiento directo: Vidrios en fachadas expuestas a la radiación solar o en techos en combinación con superficies internas que absorben y almacenan el calor.

Calentamiento indirecto: Muros Trombe, muro de almacenamiento térmico, por apertura remota y calentamiento de una cámara de aire que calienta el piso, techo de almacenamiento térmico e intercambiador de calor y techo con circuito convectivo.

Y calentamiento aislado: Invernadero acoplado, por apertura remota y calentamiento del aire que es inducido por el piso, acristalamiento en el techo con doble pared, acristalamiento sombreado en el techo, y acristalamiento hacia el sur.

Cabe mencionar que dentro del calentamiento pasivo indirecto se pueden considerar como sistemas pasivos a los aislantes térmicos transparentes con y sin absorbedor de calor integrado. Y Aksamija (2009) indica que las fachadas con doble pared de vidrio son sistemas pasivos de climatización tanto para el enfriamiento como para el calentamiento indirecto. Y los clasificó en fachada caja-ventana, tipo corredor, fachada caja-eje, y fachada multipisos.

Por otra parte, Barber (2012) clasificó a los sistemas pasivos como ganancia directa, ganancia indirecta y ganancia aislada.

Para el caso de los sistemas HVAC, la ASHRAE (2016) los define de la siguiente manera:

Son los sistemas de distribución, equipos y terminales que proporcionan, tanto colectiva como individualmente, los procesos de calentamiento, ventilación, o aire acondicionado a un edificio, o parte de un edificio.

ASHRAE (2000) los clasifica de manera general en sistemas centralizados y descentralizados.

La principal característica de gran parte de los sistemas activos (HVAC de tipo central) es que integran en un solo gabinete todos sus componentes mecánicos y eléctricos mientras que los sistemas activos (HVAC descentralizados) pueden estar instalados en todo el edificio, sobre el edificio o en un edificio adyacente (ASHRAE, 2000)

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Alfonso (2006) clasifica a los sistemas activos por el tipo de fluido de trabajo que utilizan o la forma en que operan térmica y eléctricamente. Es decir, cuando utilizan refrigerante, aire, CO₂, o son sistemas termoeléctricos.

Si utilizan demasiada energía eléctrica o gas, Alfonso (2006) también los clasifica en sistemas activos en convencionales y con alta eficiencia energética.

Según Jutglar et al. (2011) los sistemas se pueden clasificar en sistemas pasivos y sistemas activos y definen a los primeros como todos aquellos sistemas en los que la demanda de energía mecánica es despreciable y los segundos son aquellos sistemas que necesitan un aporte importante de energía mecánica (página 317, 1.^{er} párrafo).

La norma oficial mexicana NOM-020-ENER/SCFI-2008 define un término importante dentro del tema de la eficiencia energética de los sistemas activos de climatización en su modo de enfriamiento y este es la Relación de Eficiencia Energética (REE) o también conocido como Energy Efficiency Ratio (EER, por sus siglas en inglés). La expresión (2.1) tomada de la norma mexicana la define de forma matemática y sus unidades son W térmicos/W eléctricos, mientras que para la EER son (BTU)/h/ W.

$$REE = \frac{\text{Efecto neto de enfriamiento (W térmicos)}}{\text{Potencia eléctrica (W eléctricos)}} \quad (2.1)$$

Cuando la relación de enfriamiento es establecida durante un período de un año se le conoce como Relación de Eficiencia Energética Estacional (REEE) o Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER por sus siglas en inglés). Las unidades para la primera son W térmicos en un año/W eléctricos mientras que para el SEER son BTU/Wh.

Harvey (2009) indica que un sistema activo (HVAC con alta eficiencia energética) debe tener las siguientes características:

1. Velocidad variable en el ventilador interior, es decir debe ser un sistema de Volumen de Aire Variable (VAV, por sus siglas en inglés);
2. Flujo de Refrigerante Variable (VRF, por sus siglas en inglés)
3. Puede tener un recuperador de calor;
4. Cajas separadoras de ventilación y de los estados de enfriamiento y calentamiento;
5. Cajas separadoras de los procesos de deshumidificación y enfriamiento;
6. Ductos y tuberías de refrigeración debidamente dimensionadas;
7. Si es un sistema central y dependiendo de las condiciones de operación estos deben tener un Coeficiente de Operación (COP, por sus siglas en

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

inglés) de 2.2 a 3.8 para sistemas centralizados y de hasta 6.2 para sistemas mini-divididos;

8. Y para calefactores de tipo centralizado que demandan gas sus eficiencias energéticas deben ser del 96 %.

La ASHRAE (2014) agrega que además de estas especificaciones técnicas los sistemas deberán tener un SEER igual o mayor a 14, EER mayor o igual a 12 y un Factor de Eficiencia Estacional en Calentamiento (HSPF, por sus siglas en inglés) igual o mayor a 7, valores propuestos en su apéndice B de la norma 189.1-2014.

Por otra parte, en 1998 Lamp y Ziegler (1998) clasificaron a los sistemas híbridos por el tipo de energía renovable que utilizan, por los requerimientos de la temperatura de enfriamiento, por la tecnología de refrigeración que utilizan y por el uso de la tecnología solar.

Por el tipo de tecnología solar que utilizan, Lamp y Ziegler (1998) los subdividieron en:

- Colector plano no evacuado
- Plano evacuado
- Colector de tubo y
- Colector de baja concentración.

Y por la tecnología refrigeración que utilizan, Grossman (2002) los clasificó en ciclo cerrado y ciclo abierto.

Papadopoulos et al. (2003) indican que el coeficiente de operación para los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) y ciclo cerrado es igual a la cantidad de calor recibido por el evaporador entre la cantidad de calor requerido por el generador. Esto se expresa como:

$$\text{COP} = \frac{\text{Calor recibido por el evaporador (W)}}{\text{Calor recibido por el generador (W)}} \quad (2.2)$$

Fan et al. (2007) indicaba que el coeficiente de funcionamiento para un sistema híbrido que usa colectores solares se puede expresar de la siguiente forma:

$$\text{CDF}_{\text{solar}} = \frac{\text{Calor recibido por el evaporador (W)}}{\text{Calor recibido por el colector solar (W)}} \quad (2.3)$$

La ASHRAE (2014) propone los valores de Coeficiente de Operación mínimos mostrados en la tabla 2.2 para los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) y ciclo cerrado.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Tabla 2.2 Requisitos mínimos de eficiencia energética para sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) de ciclo cerrado y con condensador enfriado por agua.

Tipo de sistema	Capacidad (kW)	COP
Chiller de efecto de absorción simple	Todas las capacidades	0.7
Chiller de efecto de absorción doble, fuego indirecto	Todas las capacidades	1.0

Fuente: ASHRAE (2014)

Çengel y Boles, (2003) expresan que el rendimiento de una bomba de calor en el modo de enfriamiento se define en términos del coeficiente de funcionamiento. Es decir,

$$CDF_{AA} = \frac{\text{Efecto de enfriamiento (W)}}{\text{Entrada de trabajo (W)}} \quad (2.4)$$

Este es conocido como Coeficiente de Operación (COP, por sus siglas en inglés). Para el modo de calentamiento en los sistemas híbridos que usan la tierra como fuente de calor, un parámetro importante a considerar es el Coeficiente de Funcionamiento (CDF_{BC}). Ressources Naturelles Canada (2002) indica que este funcionamiento se obtiene al dividir el calor entregado por el condensador entre el trabajo efectuado por el compresor, el ventilador interior y la bomba de agua. Por lo que compresores más eficientes efectuarán menos trabajo y con esto se demandará menos energía eléctrica. Es decir, si el CDF_{BC} es alto significa el sistema en su circuito de refrigeración tiene un condensador que entrega el calor al exterior de manera muy eficiente y rápida o que tiene un compresor o compresores que efectúan un mínimo trabajo para mover el refrigerante. Esto se expresa como

$$CDF_{BC} = \frac{\text{Velocidad de rechazo del calor en el condensador (W)}}{\text{Dem. compresor (W) + Dem. del ventilador (W) + Dem. de la bomba de agua (W)}} \quad (2.5)$$

Otro factor importante a tomar en cuenta es el Factor de Operación Estacional en Calefacción o Heating Seasonal Performance Factor (HSPF). Este factor no solo influye en los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) sino también en los sistemas híbridos que usan como fuente de calor la tierra. Este es definido por el AHRI (2008) como la relación entre el calor de salida, durante la época de calentamiento y la electricidad utilizada. Para estos sistemas Mustafa, 2008 sugiere

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

que el HSPF se encuentre en un rango de entre 9.0 y 10.0 y el Radio de Eficiencia Energética Estacional (SEER) está por encima de 14.0.

Alfonso (2006) clasificó a los sistemas de climatización basándose en el principio de combinar las energías renovables con las no renovables. Es decir,

- Energía eléctrica con energía térmica;
- Energía térmica, energía de la biomasa y energía solar fotovoltaica;
- Energía térmica con energía solar fotovoltaica;
- Y energía solar térmica con energía química.

Una vez que se han clasificado a los sistemas de climatización y revisado los parámetros que determinan la eficiencia energética de los sistemas activos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) se presentan algunas de sus características.

2.5 Sistemas pasivos

Givoni (1984) definió el término pasivo como aquel sistema de climatización que utiliza los procesos de transferencia de calor natural para pérdida de calor y sumideros naturales, lo que permite el rechazo de calor en el edificio.

Morillón (2004) también definió de forma textual a un sistema pasivo de la siguiente manera:

Los sistemas en los que la captación, distribución y almacenamiento del calor, así como su disipación o descarga (en forma directa o indirecta), se realizan mediante procesos naturales de transferencia de calor.

Wittwer y Platzer (2000) definen a los aislantes térmicos transparentes como aquellos materiales que tienen un alto potencial para incrementar la eficiencia de los sistemas térmicos solares utilizados en las fachadas de los edificios.

Wittwer (1989) indica que los aislantes térmicos transparentes son sistemas pasivos porque están integrados en la estructura del edificio y están compuestos por cuatro elementos: un elemento absorbedor de la radiación solar, un elemento almacenador de calor, un elemento para el control solar y un aislamiento traslucido.

Por otra parte, para el caso del enfriamiento o calentamiento indirecto, Morillón (1993) indicó que cuando los rayos solares incidían sobre cualquier superficie arquitectónica exterior como son muros, techos, etc., una parte de la energía era absorbida y la otra era reflejada, pero que esto dependerá de las propiedades ópticas del material de construcción de los elementos arquitectónicos.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Kaushika y Sumathy (2003) muestran que estos sistemas pueden ser utilizados aun bajo condiciones de temperatura de entre 50 °C y 80 °C y que cuentan normalmente con tubos capilares con un arreglo en forma de panal de abeja. Estos no solo pueden reducir las pérdidas de calor del edificio sino de transmitir gran parte de la radiación solar que recibe el muro exterior hacia el interior.

Wong et al. (2007) afirma que la razón de flujo de calor de estos sistemas de climatización oscila entre los 100 kWh/m² y los 200 kWh/m² anuales.

Hernández et al. (2006) indican que los sistemas de descarga de calor aplicados en muros verticales exteriores (muro Trombe) son otro tipo de sistemas pasivos que contribuyen a la climatización de los edificios. Hernández et al (2006) señalan que este tipo de sistemas pueden disminuir un promedio del 14 % el consumo de energía eléctrica de un sistema de aire acondicionado para el caso de México.

Fernández (2007) advierte que los sistemas pasivos de enfriamiento/calentamiento como los techos con estanque de agua pueden alcanzar rangos de temperatura promedio de entre 7.8 °C y 10.3 °C para calentar y de 1.2 °C a 1.4 °C para enfriar. Y agregan que esto se puede lograr en edificios localizados en estados como el de Indiana, en los Estados Unidos de América.

Para Barber (2012) los sistemas pasivos también sirven para bloquear de los rayos del Sol, esto con la finalidad de proporcionar enfriamiento durante le estación de verano. Mazria (1979) citado por Barber (2012) define a los sistemas pasivos de calentamiento con ganancia directa, indirecta y aislada de la siguiente manera:

“El sistema pasivo con ganancia directa es aquel sistema en donde el espacio del edificio se calienta directamente por la luz del Sol, lo que más a menudo entra a través de las ventanas dentro de la pared orientada hacia el sur en los edificios localizados en el hemisferio norte”.

“El sistema pasivo con ganancia indirecta es aquel en donde la luz solar es más a menudo recibida por una pared orientada hacia el sur, y con el movimiento del aire a lo largo del espacio interior, el calor se transferirá de la pared hacia la sala de estar”.

Y define al último sistema como:

“El sistema pasivo con ganancia aislada, utiliza la captación solar y el almacenamiento térmico, ambos separados por un espacio habitable, lo que provoca que el calor se mueva hacia el espacio habitable a través de la convección natural o forzada. La ventilación natural es también esencial en este método de ganancia de calor solar pasivo”.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Goçalvez et al. (2012) y Mora (2013) han señalado que los sistemas pasivos de enfriamiento a base de tubos enterrados a profundidades de entre 0.10 m y hasta 4.5 m y con diámetros de entre 20 cm y 30 cm pueden inyectar el aire al interior de los edificios a temperaturas de entre 22 °C y 23 °C cuando en la temperatura del aire exterior oscila entre los 25 °C y los 26 °C.

Y Hernández y Morillón (2013) aseguran que los sistemas de descarga de calor pueden ser aplicados a los techos de los edificios como sistema pasivo de enfriamiento (llamados sistemas de doble pared ventilada). Y reiteran que dependiendo de las condiciones climáticas del lugar en donde se ubique el edificio pueden alcanzar temperaturas en la salida del aire de hasta 40 °C.

2.6 Sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética)

La ASHRAE (2014) define como sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética) a aquel sistema que debe cumplir con los estándares establecidos en la norma 189.1-2014 que lleva por título "Estándar para el Diseño de Edificios Verdes de Alto Rendimiento, excepto edificios residenciales de baja altura" en su apéndice B".

De acuerdo con este apéndice en las tablas B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6, B-7, B-12 Y B-13, se debe seleccionar el tipo de sistema HVAC de alta eficiencia energética.

Para el caso de los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) estos operan bajo los siguientes principios.

2.7 Sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables)

La ASHRAE (2007a) define como un sistema híbrido aquel sistema que combina elementos de los sistemas activos y pasivos. Además estos sistemas requieren de algo de energía no renovable, pero la cantidad es tan pequeña que pueden mantenerse con un Coeficiente de Operación (COP por sus siglas en inglés) de alrededor de 50.

La ASHRAE (2007a) divide a los sistemas de enfriamiento y calentamiento solar en sistemas solares pasivos y sistemas solares activos. Los sistemas solares pasivos requieren poca o ninguna energía no renovable para funcionar mientras que los sistemas solares activos usan o un líquido o aire como fluido colector. Los sistemas activos deben de tener disponibilidad continua de energía no renovable, generalmente en la forma de electricidad, para operar bombas y ventiladores. Un sistema completo incluye colectores solares, componentes de almacenaje de

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

energía, y bombas o ventiladores para transferir energía para almacenaje o para calentamiento o enfriamiento del edificio (ASHRAE, 2007a).

Funcionamiento

Dentro de los componentes que puede usar un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) se tienen los colectores solares, fluidos de trabajo como el BrLi, tanques de almacenamiento de energía térmica, intercambiadores de calor, tanques de expansión, bombas centrífugas, tuberías, válvulas, manómetros, fuentes de calor auxiliares como el subsuelo, y controles (ASHRAE, 2007a).

La ASHRAE (2007a) indica que dentro de los sistemas híbridos para enfriamiento o calentamiento sostenidos con energía solar están los sistemas de refrigeración por absorción. Estos sistemas de refrigeración por absorción se pueden clasificar en sistemas por absorción de ciclo cerrado y de ciclo abierto. Un ejemplo se muestra en la figura 2.1 y a continuación se describe su funcionamiento.

Cuando la energía solar es usada tanto para calentamiento como para enfriamiento el sistema de absorción mostrado en la figura 2.1 o una de sus variantes puede ser usado. El colector solar y el amacenaje deben operar a temperaturas de cerca de 90 °C en verano cuando el agua de la torre de enfriamiento excede los 27 °C, aunque también se tiene el agua de enfriamiento de la torre de enfriamiento. Los controles para colección, enfriamiento, y distribución están generalmente separados, con la bomba de circulación P_1 operando en respuesta al termostato del colector solar T_1 , el cual está localizado en el espacio climatizado. Cuando el termostato T_2 manda una señal para el calentamiento, las válvulas V_1 y V_2 dirigen el flujo de agua desde el tanque de almacenamiento mediante del calentador auxiliar inactivo a la unidad serpentín en el sistema de distribución de aire.

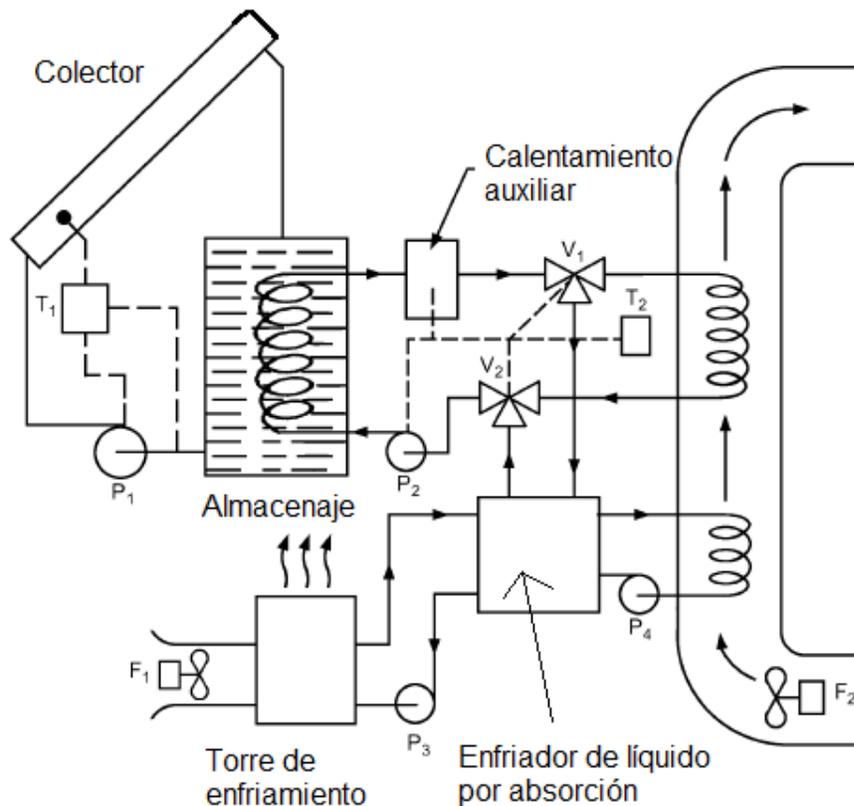
Cuando el termostato T_2 manda una señal para el enfriamiento, las válvulas dirigen el agua caliente dentro del generador de la unidad de absorción, y las bombas P_3 y P_4 activan la bomba de agua de la torre de enfriamiento, haciéndola pasar por los circuitos del absorbedor y el condensador y el agua helada pasa por el serpentín de enfriamiento en el sistema de distribución de aire. Un gran tanque de almacenamiento de agua caliente opera cuando la radiación del Sol no está disponible. Un tanque de almacenamiento de agua helada puede ser agregado por lo que la unidad de absorción puede operar durante el día. El COP de una unidad de absorción agua/bromuro de litio puede ser de hasta 0.75 bajo condiciones favorables.

Los condensadores enfriados por agua son necesarios en los ciclos de absorción, porque los ciclos de agua/bromuro de litio operan con un balance delicado entre las

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

temperaturas de los tres fluidos de trabajo (agua de la torre de enfriamiento, agua helada y agua de activación). Los sistemas de absorción operados con vapor, y derivados de los sistemas híbridos de enfriamiento solar, operan a temperaturas energizantes de 110 °C a 116 °C, que están por encima de las temperaturas de operación de muchos colectores solares planos (ASHRAE, 2007a).

Pequeñas unidades domésticas pueden operar con circulación normal, o pre-enfriamiento, en las cuales las cargas de solución de bromuro de litio/agua desde generador (en el cual el calor de activación es suministrado) al separador y condensador, ahí, el reconcentrado, LiBr es retornado al absorbedor mientras el vapor del agua se va al condensador antes de ser retornado al evaporador donde el enfriamiento tiene lugar. Las grandes unidades usan una bomba centrífuga para hacer circular el fluido de trabajo (ASHRAE, 2007a).



Fuente: ASHRAE (2007a)

Figura 2.1 Sistema de calentamiento y enfriamiento de espacios utilizando un enfriador de líquido por absorción de bromuro de litio-agua.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Los enfriadores por absorción estándar están diseñados generalmente para dar temperaturas de activación del fluido muy por encima de 90 °C a plena carga. Usan colectores de placa plana que pueden operar de manera eficiente a esta temperatura, sin embargo, un fluido caliente a más baja temperatura se utiliza cuando la energía solar proporciona el calor. Ambos, la temperatura de agua en el condensador y el porcentaje de carga de diseño son determinantes en la temperatura de activación óptima, la cual puede ser bastante baja, y a veces por debajo de 50 °C. Un control adecuado puede aumentar el COP en estas condiciones de carga parcial.

Muchas de las grandes instalaciones de refrigeración comercial e institucional deben funcionar durante todo el año, y la baja la temperatura del agua de refrigeración disponible en invierno lo que implica el uso de fluidos como el LiBr / H₂O para funcionar bien con una entrada de fluido caliente por debajo de 88 °C. Los sistemas híbridos HVAC sostenidos con energías renovables y que son utilizados para el enfriamiento de edificios residenciales tienen una capacidad máxima de enfriamiento de 5,3 kW, y la temperatura de entrada del fluido de trabajo es de 80 °C (ASHRAE, 2007a).

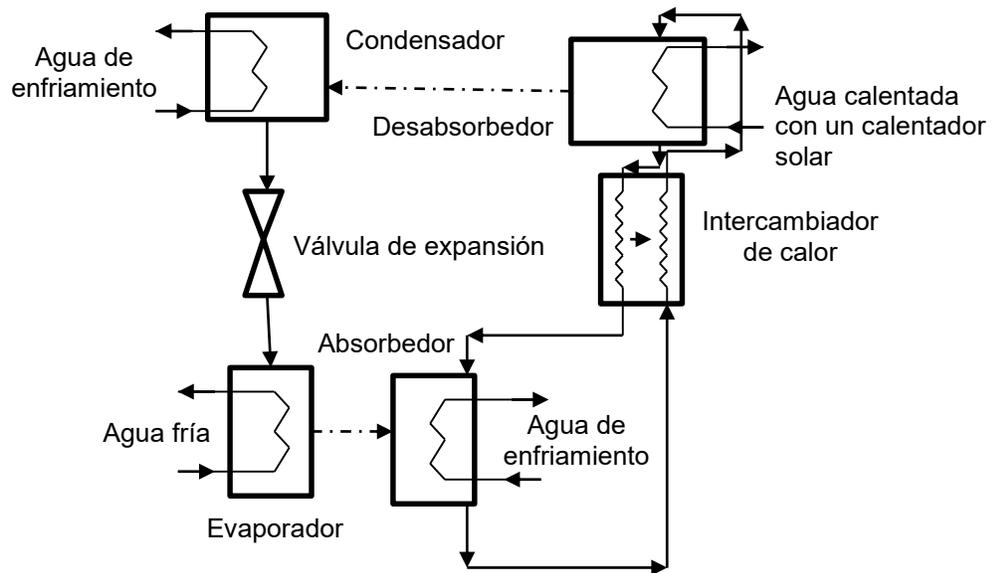
Los sistemas de absorción de vapor, en los cuales sistemas de enfriamiento solar es utilizado, habitualmente operan a temperaturas de energización de 110 °C a 116 °C, y están por encima de la capacidad de la mayoría de colectores de placa plana. Estas unidades de enfriamiento solar están diseñadas para funcionar a temperatura bajas (entre 0 °C y 20 °C) (ASHRAE, 2007a).

Por otra parte, el funcionamiento de los sistemas de refrigeración por absorción de ciclo cerrado es de la siguiente manera Grossman (2002):

- El sistema puede operar con reservorios de calor en tres niveles de temperatura: la temperatura del medio enfriado o espacio climatizado, la temperatura alta suministrada por la fuente de calor solar; y la temperatura del medio ambiente que sirve como sumidero para el calor rechazado,
- El coeficiente de operación depende de la temperatura de la fuente de calor
- Como este coeficiente depende de la temperatura del aire del medio ambiente, se prefiere enfriar el sistema con agua en vez de aire exterior,
- Si se agregaban dos o más intercambiadores de calor el sistema se convierte en doble o triple efecto (también conocido como sistemas de ciclo cerrado con multiestados).
- Los sistemas de refrigeración por absorción de ciclo cerrado deben tener agua calentada por energía solar en el desabsorbedor.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de un sistema de ciclo cerrado.



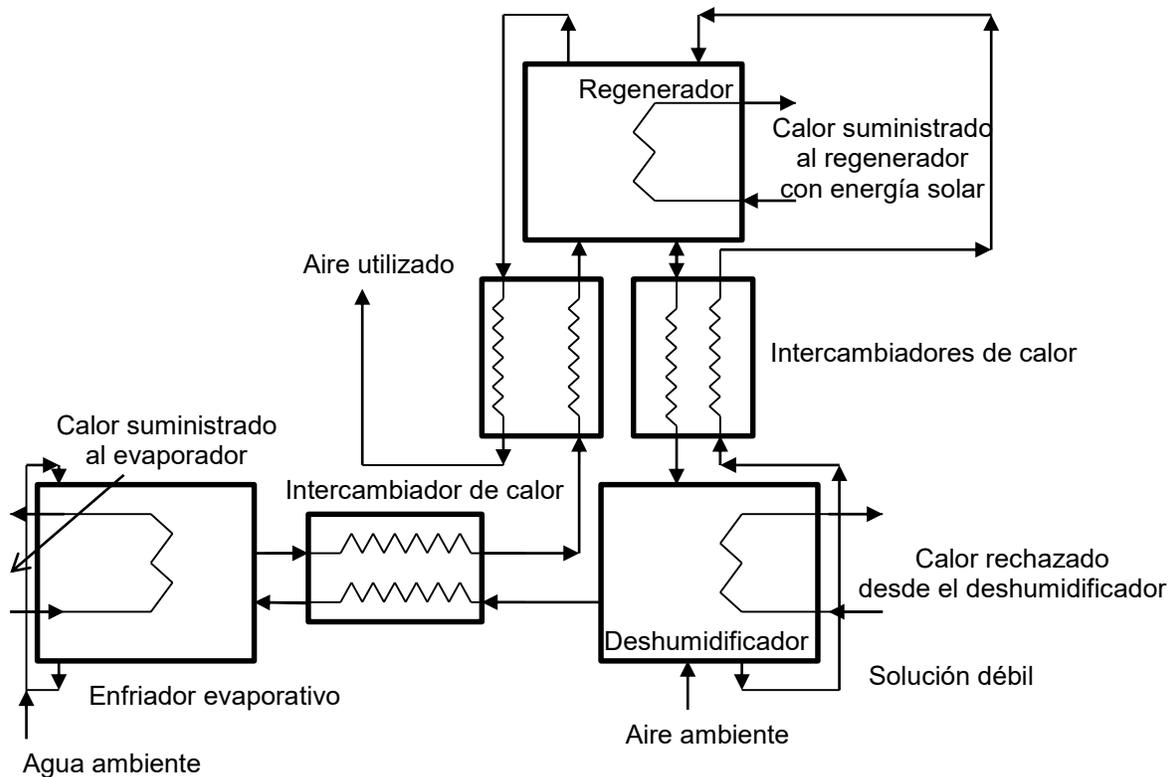
Fuente: Grossman (2002)

Figura 2.2 Descripción esquemática de un sistema de enfriamiento por absorción de ciclo cerrado (chiller por absorción).

Por otra parte, Grossman (2002) dió las características principales para los sistemas de enfriamiento por absorción de ciclo abierto de la siguiente manera.

- Utilizan agua como refrigerante,
- El desecante puede ser sólido o líquido y es utilizado para facilitar el intercambio de calor sensible y latente con el vapor de aire,
- El término abierto significa que el refrigerante es descargado desde el sistema después de suministrar el efecto de enfriamiento y un nuevo refrigerante es cargado
- El desecante es regenerado con el aire ambiente o el aire usado es calentado a la temperatura requerida por la fuente de calor solar,
- Los sistemas operaban a presión ambiente
- El calor y la transferencia de masa entre el aire y el desecante se da al contacto directo,
- Tienen un COP menor al de los sistemas de ciclo cerrado,
- Y el desecante es regenerado con aire caliente previamente calentado con energía solar.

En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de un sistema de enfriamiento por absorción de ciclo abierto.



Fuente: Grossman (2002)

Figura 2.3 Descripción esquemática de un chiller por absorción abierto.

Zheng (2000) señalaba en el año 2000 que cuando los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) capturan o rechazan el calor del agua o de la tierra, son de gran interés los segundos, debido a que el suelo tiene mejor estabilidad térmica que el agua durante todo el año.

La ASHRAE (2007b) subdivide los recursos geotérmicos en tres categorías: alta temperatura ($>150^{\circ}\text{C}$) que son utilizados para producción de electricidad, temperatura baja-intermedia ($<150^{\circ}\text{C}$) que son utilizados en aplicaciones de uso directo, y en aplicaciones de bomba de calor (generalmente $<32^{\circ}\text{C}$). A este último rango de temperaturas en la cuales se puede extraer el calor de la tierra se le llama geotermia de baja temperatura.

La ASHRAE (2007b) señala que la temperatura del fluido en una fuente geotérmica de baja temperatura es menor de 90°C . Y clasifica a los sistemas con bomba de calor geotérmica en sistemas de uso directo e indirecto. En un sistema de uso directo el fluido geotérmico está separado del sistema de calentamiento por un intercambiador de calor. Un serpentín geotérmico secundario es especialmente

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

deseable cuando el fluido geotérmico es particularmente corrosivo y/o causa descamación. El fluido geotérmico es bombeado directamente de regreso al suelo sin pérdida en la superficie circundante. Las principales aplicaciones de los sistemas de uso directo son el calentamiento de edificios de uso residencial y comercial y el calentamiento de agua para uso doméstico. Como sistemas de enfriamiento puede usarse en combinación con los sistemas de enfriamiento por absorción, aunque rara vez se utilizan (ASHRAE, 2007b).

La ASHRAE (2007b) define un sistema de uso indirecto como aquellos sistemas que utilizan el suelo, el agua y la tierra o el agua de la superficie de un lago o río como fuente o sumidero de calor. En términos generales incluyen las bombas de calor acopladas al suelo (GCHP, por sus siglas en inglés), las bombas de calor agua-tierra (GWHP, por sus siglas en inglés), y las bombas de calor y fuente calor el agua (SWHP, por sus siglas en inglés). Las unidades trabajan específicamente a temperaturas de entrada del agua de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el modo de calentamiento y $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el modo de enfriamiento (ASHRAE, 2007b).

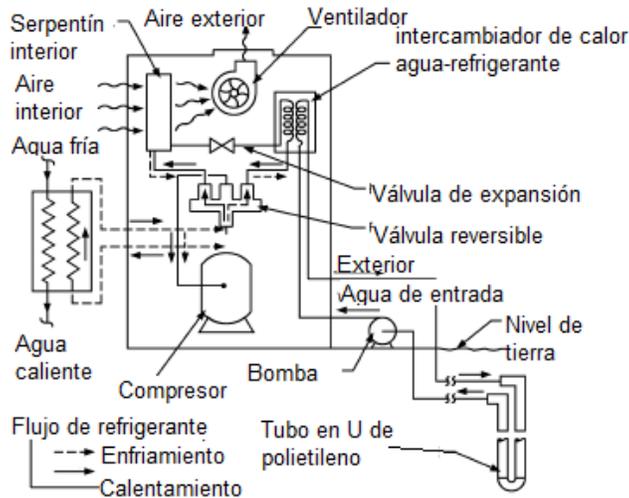
Sistema de bomba de calor acoplada a la tierra

Como se muestra en la figura 2.4 este tipo de sistemas consisten en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor con válvula reversible que está vinculado a un intercambiador de calor de cerrado y enterrado en el suelo. La unidad más ampliamente utilizada en esta clase de sistemas es la bomba de calor agua-aire, en la que circula agua o una solución de agua / anticongelante a través un intercambiador de calor líquido-refrigerante y una tubería termoplástica es enterrada en el suelo. Un segundo tipo de bombas de acopladas a la tierra son los de expansión directa (DX), las cuales utilizan una red de tuberías de cobre enterradas a través del cual circula refrigerante.

Este tipo de sistemas tienen una bomba de calor acoplada a la tierra con un serpentín fabricado con polietileno. Estos sistemas se clasifican de acuerdo con tipo de intercambiador de calor que utilizan en verticales y horizontales. Los intercambiadores de calor verticales son generalmente en dos tubos pequeños hechos de polietileno de alta densidad, los cuales son colocados en un depósito vertical que se llena posteriormente con material sólido. Estos tubos tienen diámetros nominales de entre 20 mm y 40 mm y se extienden a profundidades de 15-180 m, dependiendo de las condiciones locales de perforación del suelo y del equipo que se use. Para reducir la interferencia térmica entre las perforaciones realizadas en el suelo, estas deben tener una distancia mínima de separación de 6 m cuando el patrón de perforación es del tipo cuadrículado (ASHRAE, 2007b).

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

La tubería enterrada de un circuito cerrado con bomba de calor y fuente la tierra puede producir teóricamente un cambio en la temperatura en el suelo a una profundidad de hasta 5 m. Sin embargo, la temperatura del suelo permanece esencialmente sin cambios a una profundidad de 1 m. Por esta razón, la tubería puede ser enterrada relativamente cerca de la superficie del suelo y todavía beneficiarse de las temperaturas de moderación que la tierra ofrece. Debido a que la temperatura del suelo puede fluctuar tanto como ± 5 K a una profundidad de 2 m, una solución de anticongelante puede ser utilizado en la mayoría de las regiones en donde se requiere el calentamiento (ASHRAE, 2007b). La mayoría de las instalaciones que tienen serpentines horizontales colocan la tubería en un paralelo en lugar de un solo serpentín (en serie) esto para reducir la potencia de bombeo. Los sistemas con bomba de calor geotérmicas deben ser calentadas por medio de radiación solar (Zheng, 2000). En la figura 2.4 se muestra todos los componentes mecánicos de una bomba de calor con serpentín cerrado vertical y enterrado.



Fuente: ASHRAE (2007b)

Figura 2.4. Sistema de bomba de calor acoplada a la tierra y serpentín cerrado vertical.

Sistemas de bomba de calor con fuente y sumidero de calor la arena

Un sistema con bomba de calor con fuente la arena trabaja de manera muy similar a un sistema de bomba de calor acoplada a la tierra solo que su fuente y sumidero de calor es un talud de arena y no el suelo o subsuelo. El sistema está constituido básicamente por los siguientes componentes:

1. El sistema de refrigeración mecánica,

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

2. Un serpentín de tubería de plástico resistente a los cambios de temperatura del agua. Y que generalmente se entierra en la arena,
3. Una bomba de agua de tipo centrífuga,
4. Un sistema de ductos,
5. Y un talud de arena.

El sistema de refrigeración mecánica está compuesto básicamente de un compresor de tipo espiral, dos serpentines de cobre con aletas de aluminio, tubería de cobre por la cual circula gas refrigerante que puede ser freón 410A. Una válvula reversible de 4 vías y un serpentín de tipo circular por el cual circula en un tubo interior el gas refrigerante y por exterior agua. Otro elemento mecánico del sistema para la expansión del gas es la válvula termostática. En la figura 2.5 se muestran los componentes mecánicos más importantes de la bomba de calor como son el condensador, el intercambiador de calor del refrigerante, el intercambiador de calor del agua la válvula reversible de 4 vías y el compresor.

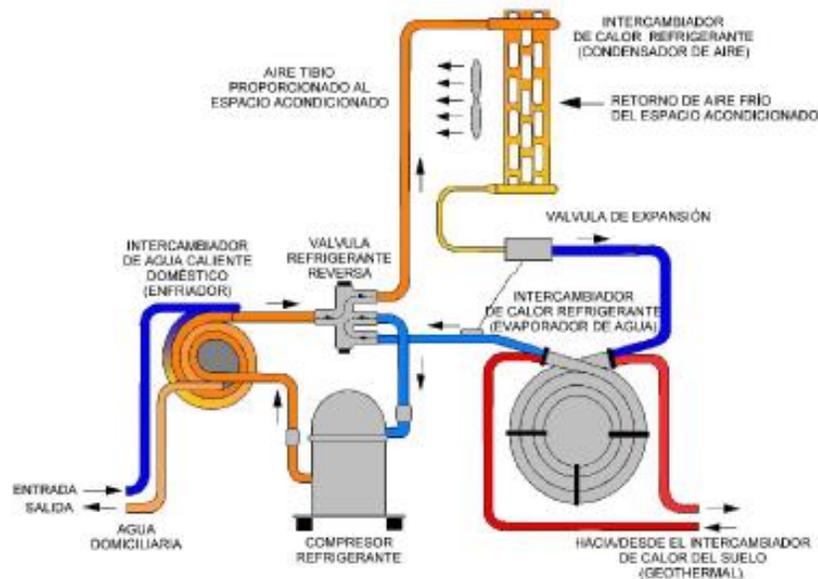


Figura 2.5 Circuito de refrigeración de la bomba de calor y fuente la arena.

TRANE (2007) indica que la válvula reversible sirve para invertir el flujo del refrigerante y que el sistema pueda operar tanto para enfriar como para calentar el edificio.

Los serpentines captadores del calor pueden ser cerrados y abiertos. Los serpentines cerrados están localizados en el subsuelo y un líquido como el agua transporta el calor desde el suelo hasta la bomba de calor (o viceversa). Los serpentines de tipo cerrado se pueden clasificar de acuerdo con la forma que tienen

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

y el tipo de conexión en: circulares, espirales, con forma de “U” y en serie o paralelo (Mustafa, 2008b). De acuerdo con la posición en que son enterrados en el suelo pueden ser verticales y horizontales (Mustafa, 2008b). Los serpentines verticales y horizontales se pueden sumergir en un lago, pozo cercano, bahía o tierra. En la figura 2.6 se muestra un ejemplo de un serpentín enterrado de forma horizontal.



Figura 2.6. Serpentín horizontal cerrado en forma de U.

El talud de arena es otro de los elementos que integran este sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables). Dentro de los materiales inorgánicos que pueden acumular calor se tiene la arena, un material que proviene de los materiales cerámicos. La arena contiene sílice con una estructura constituida por un átomo de silicio y cuatro átomos de oxígeno. Otros elementos contenidos en la arena pueden ser el magnesio, el calcio y el berilio que se pueden combinar con el silicio y oxígeno y dar origen a estructuras más complejas llamados silicatos complejos. La arena fundamentalmente está constituida por una combinación de cuarzo, arcilla, algunos feldespatos y agua (Askeland, 1987).

La ASHRAE (2007a) indica que para usar un sistema híbrido (HVAC sostenido con energía solar) en la climatización de un edificio se debe realizar un análisis del costo del ciclo de vida del sistema y un análisis comparativo entre el costo de la energía que el sistema no consumiría y el costo que implica la compra del sistema híbrido (HVAC sostenido con energía solar) (ASHRAE, 2007a). El equipo se empleará cuando no se desee utilizar combustibles fósiles y los recursos financieros permitan su adquisición.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se describe la metodología para climatizar de manera energéticamente sustentable los edificios. Está integrada por 3 etapas, la primera etapa comprende la climatización mediante sistemas pasivos, en la segunda etapa se utilizan sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y en la tercera etapa se emplean los sistemas híbridos (HVAC que usan energías renovables).

En el siguiente apartado se muestran los esquemas que describen la integración de las etapas de la metodología.

3.1 Etapas

De manera general el método se divide en 3 etapas:

- ❖ Primera etapa: Climatización con sistemas pasivos
- ❖ Segunda etapa: Climatización con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).
- ❖ Tercera etapa: Climatización con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

En la figura 3.1 se muestran las tres etapas.

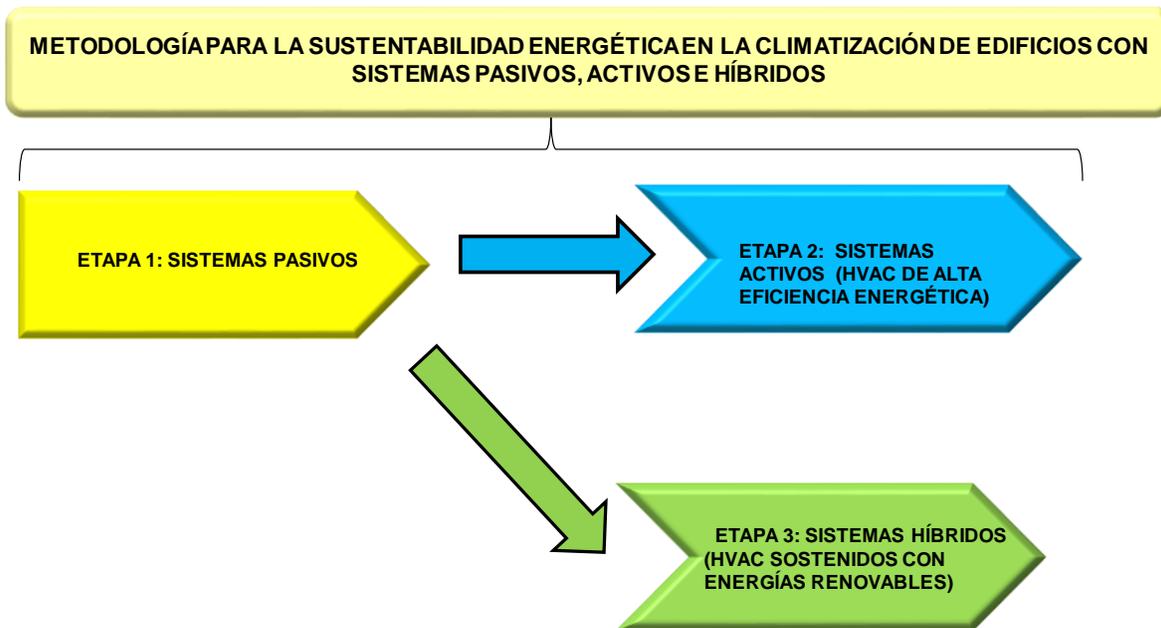


Figura 3.1 Etapas de la metodología para la sustentabilidad energética en la climatización de edificios.

La figura 3.2 muestra un esquema con las 2 primeras etapas.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

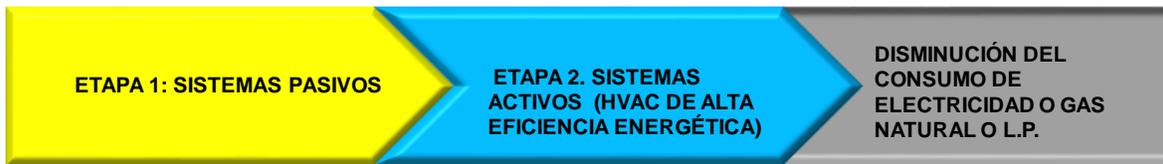


Figura 3.2 Primeras dos etapas de la metodología para disminuir el consumo energético en la climatización de edificios.

La figura 3.3 muestra la metodología cuando se han seleccionado las etapas 1 y 3.

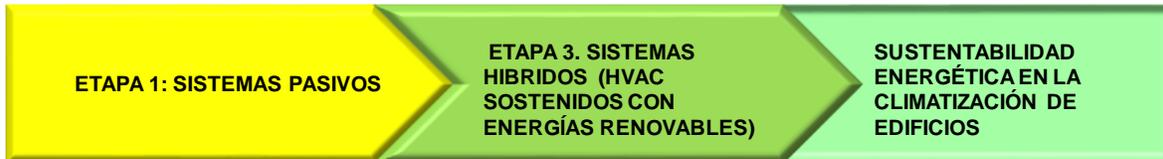


Figura 3.3 Primera y tercera etapas para alcanzar la sustentabilidad energética en la climatización de edificios.

En la figura 3.4 se muestran los pasos de la primera etapa.

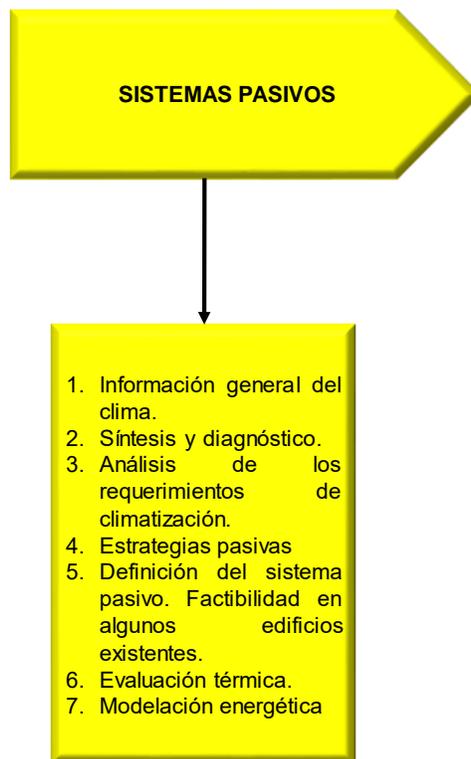


Figura 3.4 Pasos de la primera etapa con sistemas pasivos de climatización.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

La primera etapa tiene como base a los sistemas pasivos de climatización que de acuerdo con el clima y su diseño alcanzan un cierto porcentaje en la disminución de la demanda energética de climatización del edificio.

Posteriormente y como segunda etapa se utilizarán sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética), esto para incrementar la disminución de la demanda de energía. Lo cual dependerá de la demanda energética no cubierta con los sistemas pasivos y de parte del tiempo en que el clima y el diseño no permitan la climatización del edificio. La tercera etapa considera el uso de sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) que dependerán de la demanda no cubierta con los sistemas pasivos y sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética), del tiempo parcial en que el edificio no se climatizado con las dos primeras etapas y del tiempo en que todavía se disponga de Sol. Este tiempo durante el día es importante por las siguientes razones:

1. Se necesita calentar el agua del desasorbedor, en el caso de los sistemas híbridos de absorción de ciclo cerrado asistidos por energía solar,
2. Regenerar el desecante con el aire ambiente o el aire usado, en el caso de los sistemas híbridos de absorción de ciclo abierto sostenidos con energía solar,
3. Y acumular calor en la arena, para el caso de los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energía geotérmica de baja temperatura).

En el siguiente apartado se hace una descripción de los temas principales de la primera etapa.

3.2 Sistemas pasivos de climatización

3.2.1 Información general del clima

Morillón et al. (2004) propusieron como pasos iniciales recolectar la información general del clima como son la obtención de las coordenadas geográficas del sitio en donde se ubica el edificio o se proyectará (latitud, longitud y altitud), los datos climatológicos del lugar, establecer la temperatura y humedad relativa del aire interior para crear confort en los ocupantes del edificio de acuerdo al tipo de actividad que realizan. Los datos de coordenadas geográficas y climatológicos se pueden obtener de las estaciones meteorológicas más cercanas al edificio, de atlas bioclimáticos o mediante el uso de los sensores o estaciones meteorológicas portátiles que registren con exactitud y precisión los datos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento durante un periodo de tiempo de mínimo 10 años.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

También propone que los valores de radiación solar, velocidad y dirección del viento se podrán leer de algún atlas de radiación solar, de los datos registrados por alguna estación meteorológica cercana al edificio proyectado o existente. O bien pueden ser consultados en alguna publicación lo más recientemente posible de alguna dependencia gubernamental o en universidades a través de los prontuarios solares.

Para las condiciones de comodidad del edificio se seguirán los valores de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire interior propuestas en el apartado 2.2.1 que trata sobre las condiciones de confort de los ocupantes de acuerdo con el tipo de uso del edificio.

Para establecer el tipo de actividad realizada por los ocupantes del edificio se tomará como referencia el apéndice normativo A de la ASHRAE (2010) que trata sobre la razón de flujo de calor metabólico por tipo de actividad realizada.

Con esta información será posible establecer una síntesis del clima del lugar.

3.2.2 Síntesis y diagnóstico

Morillón et al. (2004) indicaron que para sintetizar la información del bioclima se requieren cinco pasos:

1. Recolectar la información general del clima
2. Calcular la posición del centro de la zona de confort
3. Calcular la amplitud de la zona de confort
4. Definir las condiciones del clima
5. Y analizar mediante el diagrama de isorrequerimientos.

1. Recolectar la información general del clima

Para ordenar la información de temperatura y humedad del aire, la radiación solar, la velocidad y dirección del viento Morillón et al. (2004) proponen que se deberá emplear el siguiente procedimiento:

- I. El registro de temperaturas se organizará en 12 columnas que corresponderán a los 12 meses del año y 24 renglones en las que se tendrá la temperatura promedio de cada hora, partiendo de las 1:00 y hasta las 24:00 h.
- II. De la misma manera se elaborará una tabla para registrar las 288 humedades relativas horarias correspondientes a los 12 meses del año.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

- III. Para la radiación solar se elaborará una tabla poniendo en la primera columna la radiación máxima difusa, la radiación máxima directa y la radiación máxima total. En el primer renglón se pondrá los meses del año que sale y se mete el Sol, es decir de las 6:00 h y hasta las 18:00 h. Cada espacio mes/tipo de radiación se llenará con el valor en W/m^2 . Aquí se pondrá atención a la hora y mes en que se presenta la máxima y mínima radiación. En la última columna se calculará cada tipo de radiación solar y se obtendrá el promedio anual.
- IV. El registro de la velocidad del viento, en m/s se organizará en 12 columnas que corresponderán a los 12 meses del año y 1 renglón en las que se tendrá la velocidad promedio mensual. Aquí se enmarcará el valor máximo y mínimo tomando en cuenta el mes en que se presentan.
- V. El registro de la dirección del viento, se organizará en 12 columnas que corresponderán a los 12 meses del año y 24 renglones en las que se tendrá la dirección de cada hora, partiendo de las 1:00 y hasta las 24:00 h. Aquí se enmarcará la hora y mes en que se presenta con mayor frecuencia el viento.

2. Calcular la posición del centro de la zona de confort

El siguiente paso consiste en calcular el centro de la zona de confort, por lo que Morillón et al. (2004) sugieren lo siguiente:

- a. En el cálculo de las temperaturas de confort de cada mes se empleará la expresión propuesta por Auliciems (1983) introduciendo el valor de la temperatura media mensual.

3. Calcular la amplitud de la zona de confort

Para este paso la amplitud de la zona de confort será la diferencia entre los datos climatológicos de máxima y mínima temperaturas promedio mensuales obtenidos de los datos de las tablas de las normales climatológicas. Para más detalles de los pasos 2 y 3 se puede consultar la metodología de evaluación y delimitación de las condiciones de confort térmico propuesta por Morillón et al. (2004).

4. Definir las condiciones del clima

Una herramienta que nos permite definir de manera aproximada cuáles es el comportamiento del clima de un lugar en específico a lo largo del año y saber qué

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

tipo de estrategias deben tenerse en cuenta para proyectar o implementar en un edificio es la carta bioclimática de Givoni.

El diagrama bioclimático de Givoni como también se le conoce es un diagrama psicrométrico que toma en cuenta las características del aire exterior como son su temperatura y humedad relativa, esto para evaluar la sensación térmica y de confort. En la figura 3.5 se muestra un ejemplo del diagrama de Givoni.

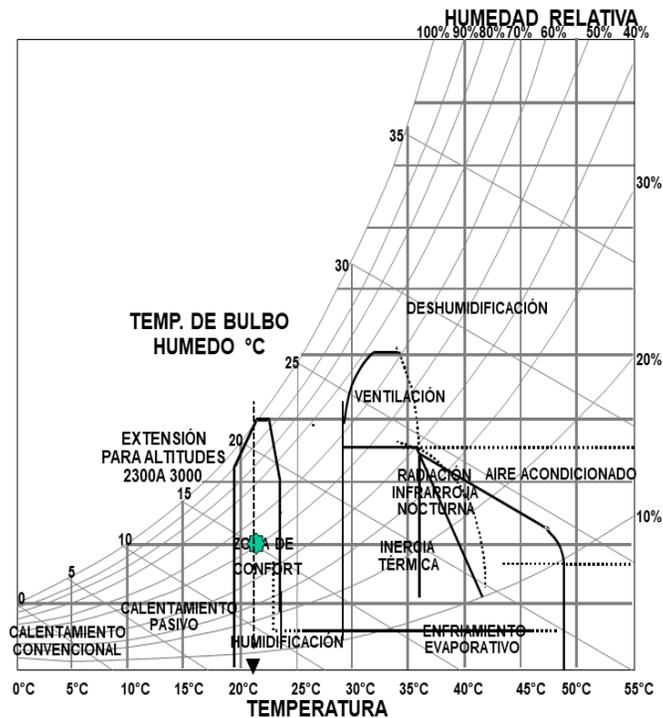


Figura. 3.5 Diagrama bioclimático de Givoni.

Otra de las cartas bioclimáticas también utilizadas dentro de la Arquitectura Bioclimática que permiten definir las condiciones del clima es la carta bioclimática de Olgay. Esta carta consiste en un diagrama de condiciones básicas donde el eje de las abscisas representa la humedad relativa y el de las coordenadas la temperatura. Dentro del diagrama se localiza una zona denominada de confort en la que los valores de temperatura-humedad relativa infieren al cuerpo humano una sensación térmica agradable. En la figura 3.6 se muestra un ejemplo del diagrama bioclimático de Olgay con la temperatura neutral y variables como la velocidad del viento, la radiación y la evaporación.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

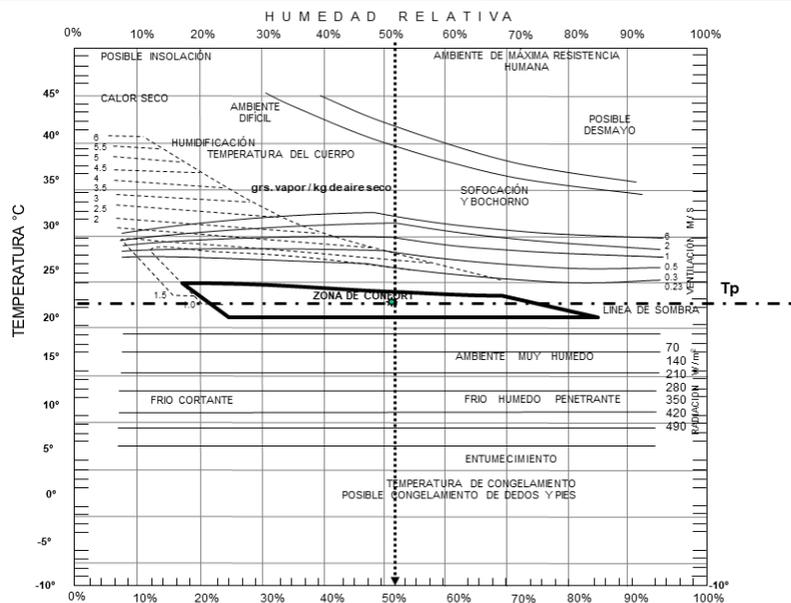


Figura. 3.6 Diagrama bioclimático de Olgay.

Continuando con el desarrollo de la metodología, los 288 valores de la temperatura horaria para los 12 meses del año, se procesarán en cartas bioclimáticas, como las de Olgay y Givoni por ejemplo, en donde se deberá indicar el centro de la zona de confort, dado por la línea de la temperatura neutral (T_n) y la línea que representa el 50% de humedad relativa. Se deberán localizar los datos de temperatura y humedad horario para cada uno de los meses del año. Aquí se deberá poner especial atención para identificar cuando se encuentre el punto localizado en una zona de frío, intenso frío, calor, bochorno y confort.

5. Análisis mediante el diagrama de isorrequerimientos

Una vez que se han elaborado los 12 diagramas de Givoni y las 12 cartas de Olgay los resultados se deberán vaciar en un diagrama llamado diagrama de isorrequerimientos, en el cual se observarán las condiciones de confort, los períodos de frío y calor durante las 24 horas del día. En este diagrama de isorrequerimientos se podrán observar las condiciones de sensación higrótérmica para todo el año del lugar en donde se encuentra ubicado el edificio.

En el diagrama de isorrequerimientos se deberán trazar dos líneas, la primera indicando la hora de inicio de ocupación del edificio, así como la hora en que se desaloja. Si son varias de ocupación o desocupación se deberán indicar también. En este diagrama se deberán agrupar los meses por estaciones de las siguientes formas:

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

- Para los países ubicados en el hemisferio norte del planeta se considerará el periodo de invierno del 21 de diciembre al 20 de marzo y para los países localizados en el hemisferio sur la estación invernal será del 21 de junio al 20 de septiembre.
- De la misma forma para los edificios localizados en los países del hemisferio norte los periodos de primavera-verano serán del 21 de marzo al 20 de septiembre mientras que para los edificios ubicados en los países del hemisferio sur estas estaciones serán del 21 de septiembre al 20 de marzo.

A partir de este diagrama se deberán identificar las estrategias generales de climatización.

3.2.3 Estrategias de climatización

A partir del diagrama de isorrequerimientos se deberán observar las condiciones de frío, confort y calor durante las 24 horas del día y para cada uno de los meses del año. Con este diagrama se deberán identificar estrategias particulares para las épocas de primavera, verano, otoño e invierno y tomar en cuenta el horario de ocupación, el tipo de actividad de los ocupantes, una selección cualitativa de los dispositivos, su forma, materiales y arreglo en el edificio. Se deberá emplear del clima lo que convenga para tomar ventaja de él o en caso contrario, no tomar lo que no se necesite. Por ejemplo, se puede diseñar un sistema pasivo de doble vidrio ventilado en la fachada Sur de un edificio localizado en el hemisferio Norte, con clima frío y que tenga ventilación natural para aprovechar el viento, calentarlo y llevarlo hacia el interior del edificio. Esta corriente de aire caliente que circula por el canal vidriado con orientación Sur no solo servirá para calentar el interior del edificio en invierno sino también servirá como aislante térmico contra las temperaturas extremas del lugar.

Una vez establecidas las estrategias generales de climatización, se deberán definir los sistemas pasivos de climatización.

3.2.4 Definición del sistema pasivo de climatización

La definición de los sistemas pasivos se puede efectuar a partir de dos periodos; el período frío y el período caliente. Para el periodo frío, se deben promover las ganancias y evitar las pérdidas de calor en el edificio. Mientras que para el período caluroso, se deberán restringir las ganancias y promover las pérdidas.

Para promover las ganancias de calor en el periodo de frío se podrán definir sistemas pasivos que proporcionen ganancias directas, indirectas o aisladas. Por

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

ejemplo, el caso del sistema pasivo de doble pared de vidrio ventilada suministrará ganancias de calor indirectas al edificio en época de invierno. Además este sistema pasivo restringirá el flujo de calor convectivo entre la envolvente del edificio y el aire exterior. También el doble vidrio minimizará la infiltración del aire exterior dentro del edificio. Para el caso de ganancias de calor aisladas un invernadero expuesto a la radiación solar y que este adosado a un edificio que cuenta con un muro acumulador ventilado es un ejemplo.

De la misma manera este sistema pasivo puede ser utilizado en época de primavera o verano como aislamiento térmico al minimizar las ganancias de calor del edificio mediante el cierre de las ventilas lo que provocará que la corriente de aire caliente, suba por el canal vidriado a lo alto del edificio para posteriormente ser enviado al exterior. Otros sistemas que se pueden definir para el periodo de calentamiento y que forman parte del enfriamiento directo son la ventilación natural, el enfriamiento evaporativo, y los ductos enterrados. Ejemplos de sistemas pasivos de enfriamiento indirecto son los techos sombreados y el sistema de doble pared ventilada.

Para el caso de algunos edificios existentes en donde no sea factible adecuar el sistema pasivo será necesario redefinir un nuevo sistema pasivo tomando en cuenta que climatize, proporcione confort y afecte lo menos posible sus fachadas, instalaciones y estructuras.

Con la definición propuesta y de acuerdo con el análisis de requerimientos se seleccionará el sistema o sistemas pasivos sugeridos en el apartado 2.4 para satisfacer las ganancias o pérdidas de calor del edificio.

3.2.5 Evaluación térmica

Se estimarán las ganancias o pérdidas de calor del edificio en estado estacionario de un día del mes con más horas de clima frío o caliente de acuerdo con lo mostrado en el diagrama de isorrequerimientos. Para ello se elaborará una hoja de cálculo sin algún sistema pasivo. En esta hoja de cálculo se deberán ingresar los siguientes datos:

1. Datos del propietario
2. Ubicación del edificio
3. Latitud
4. Valores para el cálculo de la ganancia o pérdida de calor a través de la envolvente. Aquí se introducirá la temperatura interior de confort promedio del periodo t_i (°C) y temperatura mínima del período (°C). La temperatura de confort " t_i " será la que se estimó para la posición del centro de la zona de confort estimada en el apartado 3.2.2.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

5. Los valores para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor de las porciones de la envolvente.
6. Los metros lineales de ganancias o pérdidas de calor por infiltración en ventanas y puertas.
7. Las renovaciones de aire de acuerdo al número de personas
8. Y en el caso del enfriamiento, el número de personas, lamparas, balastos y equipo que aporte ganancias de calor, así como la radiación solar incidente en cada una de las fachadas del edificio desde que sale el Sol hasta que se oculte.
9. Para el caso del calentamiento se deberán estimar las pérdidas de calor por el suelo o cuando algún piso del edificio esté sobre algún piso no calentado.

Se deberán estimar las ganancias o pérdidas de calor considerando diseño, modelos matemáticos, valores de temperatura, humedad del aire exterior, radiación solar directa o difusa, velocidad del aire exterior, temperatura y conductividad térmica del suelo, absorptividad, densidad y calor específico de materiales que permitan el diseño del sistema pasivo previamente definido en el apartado anterior. Para ello se deberán consultar libros especializados o artículos científicos recientes que muestren estos modelos matemáticos y sus parámetros de diseño. Esto deberá permitir estimar las ganancias o pérdidas de calor que el sistema pasivo puede aportar o retirar del edificio. Una comparación entre la carga térmica de enfriamiento o calentamiento del edificio con la implementación de los sistemas pasivos y sin estos se deberá realizar. O bien, si los sistemas pasivos cubren las ganancias o pérdidas de calor totales, se deberá observar en que horario el clima exterior y el diseño de los sistemas no permiten el confort en los ocupantes del edificio y pasar a la segunda etapa de la metodología.

Ejemplo de cálculo de las ganancias o pérdidas de calor de un sistema pasivo muro Trombe-aislante térmico transparente

Cuando se necesiten estimar las ganancias o pérdidas de calor de un muro Trombe se emplearán las ecuaciones propuestas por Çengel (2004) con la iteración de las temperaturas T_1 y T_2 dentro de la corriente de aire que fluye entre el muro Trombe y el absorbedor del aislante térmico transparente. Las ganancias de calor se deberán multiplicar por el Factor de Corrección Solar (FCS) de 0.82 propuesto por Platzer (1995) para un aislante térmico transparente con arreglo de tubos capilares en forma de panal de abeja. Con estos valores se obtendrá la ganancia o pérdida de calor que será el resultado de multiplicar este valor por el área del aislante térmico transparente sobre la cual incide la radiación solar. En este apartado también serán necesarias la conductividad térmica del concreto, en $W/m^{\circ}C$, su

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

densidad, en kg/m^3 , su calor específico, en $\text{J/kg}^\circ\text{C}$, su difusividad térmica en m^2/s y el coeficiente global de transferencia de calor interior, datos tomados de la norma NOM-020-ENER-2011. Todas estas ecuaciones y datos serán introducidos en una hoja de cálculo que servirá para estimar las ganancias o pérdidas de calor que puede suministrar o rechazar el sistema pasivo.

Otros valores que se requieran serán la absorptividad del concreto, la conductividad térmica del aire, el número de Prantl, la viscosidad dinámica del aire a la temperatura del aire que circula por el interior del sistema pasivo, el número de Raleigh, el número de nodos que será iguala 5, con una distancia entre nodos de 0.25 y un lapso de tiempo de 1 h.

Si este sistema pasivo recibe la radiación solar en la mayor parte del tiempo en la fachada Sur, en el caso de edificios localizados o proyectados en el hemisferio Norte o en la fachada Norte en el caso de edificios localizados o proyectados en el hemisferio Sur, se puede utilizar la ecuación propuesta por Hernández et al. (1991) y citado por Tejeda y Gómez-Azpeitia (2015). Esta ecuación toma en consideración la irradiancia solar diaria global sobre un plano horizontal, la declinación solar, la latitud y el ángulo de amplitud horaria que describe el Sol en el cuadrante Sur. Esta ecuación da como resultado la irradiación solar global diaria sobre un plano vertical, en W/m^2 .

3.2.6 Modelación energética

Para estimar las ganancias o pérdidas de calor en cada piso del edificio se debe realizar una modelación energética del edificio. Para ello se deberá utilizar el programa ENERGY PLUS en su última versión como programa principal de cálculo en combinación con alguna de sus interfaces gráficas. Estas interfaces servirán para introducir todos los datos del clima, lugar en donde se proyectará el nuevo edificio o ubica el edificio existente, los materiales de construcción de la envolvente, la ventilación natural, y los sistemas de alta eficiencia energética de climatización. Esto servirá para estimar las ganancias o pérdidas de calor que se pueden tener en cada uno de los pisos del edificio. Las interfaces gráficas de Energy Plus versión 8.5.0 que se pueden utilizar son SIMERGY versión 2.2, BEopt versión 2.7.0 o N++1.0.0.

3.3 Sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

Cuando las condiciones del clima o el diseño del sistema pasivo no permitieran climatizar el edificio ni propiciar confort a sus ocupantes será necesario utilizar los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética). Incluso si en ciertas horas del día o de la noche no se logra el confort con los sistemas pasivos será necesario

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

recurrir a los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética). En esta etapa el primer paso está enfocado a la selección del sistema HVAC de alta eficiencia energética. Esta selección se podrá realizar primero por desarrollo tecnológico después por diseño y finalmente por elección de algunos componentes del sistema. En el siguiente apartado se describen los pasos de esta etapa.

3.3.1 Selección del sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética)

Para seguir con el enfoque de sustentabilidad en los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) estos deberán seguir una serie de criterios en su selección.

Selección por eficiencia energética y desarrollo tecnológico

De acuerdo con lo tratado en el apartado 2.4 se deben seleccionar todos aquellos sistemas de alta eficiencia energética que presenten:

1. Un SEER ≥ 14 ó EER ≥ 12 , HSPF ≥ 7 para sistemas con bomba de calor de alta eficiencia y con COP ≥ 2.5 para sistemas solo de enfriamiento
2. Un porcentaje de Eficiencia de Uso de Combustible Anual (A.F.U.E por sus siglas en inglés) ≥ 96 % para aquellos sistemas que no tienen sistema de refrigeración pero que demandan gas y electricidad
3. Utilizar los valores base calculados para el consumo de electricidad para el enfriamiento de edificios no residenciales presentados por García et al. (2014) para clima cálido húmedo, cálido seco y templado. Estos valores de acuerdo con el tipo de edificio se presentan a continuación:

Tabla 3.1 Entrada de energía anual total/total de energía por uso final anual de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) (%).

Tipo de edificio	Clima		
	Cálido seco	Cálido húmedo	Templado
Hoteles	47.39	52.86	37.55
Oficinas	61.01	62.04	24.40
Escuelas	45.37	44.05	3.88
Hospitales	66.82	57.45	21.22
Restaurantes	29.36	32.72	8.78
Centros comerciales	53.08	58.57	20.77
Supermercados	8.64	9.95	5.08

Fuente: García et al. (2014)

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

4. Seleccionar los sistemas en el siguiente orden:

(a) Sistemas con temperatura de refrigerante variable (TRV). Estos sistemas tienen la capacidad de ajustar la temperatura del refrigerante que sale del evaporador con la temperatura del aire exterior del edificio, la temperatura interior y la carga de calor ajustando la velocidad de rotación del compresor. Por ejemplo, cuando es otoño o invierno y la temperatura del aire exterior del edificio desciende el sistema esta programado para entregar una temperatura alta del refrigerante que sale del evaporador por lo que el compresor rotará más rápido pero menos tiempo. Cuando la temperatura del aire exterior sube como en la época de primavera o verano el sistema esta programado para disminuir la temperatura del refrigerante que sale del evaporador a través de una disminución en la rotación de la espiral del compresor por poco tiempo y proporcionar la temperatura de confort programada en los termostatos del edificio.

(b) Sistemas con volumen de refrigerante variable (VRV). Utilizan tecnología inverter en los compresores para adecuar la velocidad y el flujo del refrigerante hacia el sistema, en función de la demanda existente en cada momento para cada una de las zonas a climatizar. Esto permite controlar de manera más eficiente las condiciones térmicas de los diferentes pisos del edificio.

(c) Sistemas con volumen de agua variable (VAV). Sistemas que con base en la temperatura de retorno del agua caliente o fría y de las zonas desocupadas del edificio se reduzca el tiempo de operación de la bomba o bombas centrífugas.

(d) Sistemas con volumen de aire variable (VAiV). Sistemas que con base a la temperatura de aire de retorno o de un aumento de las zonas desocupadas del edificio se reduce la velocidad o tiempo de operación de los ventiladores que impulsan el aire caliente o frío dentro del edificio. Estos sistemas también permiten recuperar el calor de otras zonas del edificio o de edificios contiguos que no ocupan el calor.

5. Revisar el circuito de refrigeración. Para seleccionar un sistema por desarrollo tecnologico se deberá tomar en cuenta también la revisión del circuito de refrigeración. Esto para observar las condiciones en que se encuentran los compresores, y ventiladores del serpentín evaporador y condensador, componentes que más demandan electricidad dentro del sistema. Esta revisión deberá efectuarse de acuerdo con el siguiente procedimiento:

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

- (a) Revisar que el sistema de refrigeración no tenga más de 15 componentes mecánicos como máximo, esto para no incrementar las pérdidas por fricción y la demanda eléctrica en el compresor.
- (b) Revisar que el sistema de refrigeración no cuente con aplastamientos en algunas de sus tuberías principales.
- (c) Revisar que el tubo capilar que conecta al bulbo sensor con la válvula de expansión termostática no esté cortado, esto para evitar que el compresor envíe siempre la máxima cantidad de refrigerante y por consecuencia su demanda de electricidad sea la máxima.

Diseño

Cuando se necesiten diseñar algunos componentes del sistema se deberán seguir las siguientes recomendaciones:

- 6. Diseñar la red de tubería hidrónica. Para el diseño se proponen los siguientes valores de velocidad del agua:

Tabla 3.2 Criterio de velocidad del agua

Aplicación	Velocidad (m/s)
Arreglo terminal en habitaciones	1.22
Tubería en área pública	1.83
Tubos aislados	2.13
Cuartos de máquinas	2.44
Tubos exteriores	2.44

Fuente: Carrier (2009)

- 7. Diseñar el sistema de distribución del aire. El diseño de los de conductos que transportarán y suministrarán el aire caliente o frío dentro del edificio deberá seguir el siguiente procedimiento:
 - (a) Diseñar lo más recto posible el trayecto de los conductos de suministro y retorno del aire entre el sistema y los diversos espacios a climatizar dentro del edificio
 - (b) Estimar las pérdidas por fricción de todo el sistema de distribución por el método de iguales pérdidas por fricción y tomar como valor de referencia 1 Pa por cada metro de conducto
 - (c) Preferir diseñar ductos redondos sobre ductos rectangulares
 - (d) Dimensionar el conducto de retorno lejos de ventanas o puertas principales o de alguna rejilla o difusor de suministro

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

- (e) Diseñar compuertas en cada una de las salidas de los conductos secundarios
 - (f) Si es posible realizar una simulación del sistema con algún software CFD para balancear la cantidad de aire que saldrá por cada rejilla o difusor
8. Diseñar las tuberías de succión y descarga de refrigerante. Para realizar un correcto diseño se sugieren los siguientes parámetros:
- i) Diseñar tuberías con una caída de presión de 20 kPa.
 - ii) Utilizar una velocidad de retorno del aceite al compresor en tramos de tubería ascendente de 6 m/s.
 - iii) Y proponer una velocidad de retorno del aceite al compresor en tramos descendentes u horizontales de 3 m/s.

Selección de algunos componentes y sistemas de control

Dentro de los componentes que influyen en la disminución de la eficiencia energética de los sistemas activos de climatización se tienen las rejillas de suministro y retorno del aire, los filtros y los dispositivos de control de temperatura, humedad y flujo del aire.

9. Para ello se deberán seleccionar las rejillas de acuerdo con el siguiente procedimiento:
- (i) Seleccionar las rejillas de suministro y de retorno de acuerdo con la menor caída de presión total ya que esto influirá de manera directa en la demanda de energía eléctrica del ventilador interior
 - (ii) Seleccionar el control de volumen de aire de rejillas de suministro o difusores también con la menor caída presión total
 - (iii) Seleccionar los filtros de aire de las unidades evaporadoras con la menor caída de presión total.
10. Seleccionar los dispositivos auxiliares de control. Estos dispositivos de control Carrier (2009) los clasifica en sensores y actuadores. Los primeros controlan el encendido y apagado del compresor mientras que los segundos controlan el paso del aire dentro de los conductos. Para su correcta selección de los sensores se debe seguir el siguiente procedimiento:
- (a) Seleccionar sistemas que cuenten con sensores de detección de luz solar, movimiento de los ocupantes, temperatura y humedad del aire interior.
 - (b) Si se utiliza de un sensor de cuarto de temperatura o de humedad seleccionar el de menor demanda de energía eléctrica.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

11. Para la selección de los actuadores se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- (a) Seleccionar los actuadores que controlarán la apertura o cierre de las compuertas de los conductos del aire principales y secundarios con la menor demanda energética posible.
- (b) Seleccionar los actuadores de las válvulas de 2 y 3 vías que controlaran el paso del agua helada o caliente con la menor demanda de energía eléctrica posible.
- (c) Seleccionar los actuadores de las tuberías de agua caliente o helada de las unidades manejadoras de aire con la menor demanda de energía eléctrica posible.
- (d) Seleccionar los actuadores de las válvulas de 2 y 3 vías que controlan el paso del gas L.P en los sistemas activos (HVAC alta eficiencia energética) de tipo central con la menor demanda de energía eléctrica posible.

Capacidad, tiempo de operación y consumo energético.

Una vez que se ha seleccionado el sistema por eficiencia y desarrollo tecnológico, se han tomado en cuenta las recomendaciones de diseño y se han seleccionado las rejillas de suministro y retorno de aire, los filtros y los dispositivos auxiliares de control se deberán seguir los siguientes pasos:

- 12. Seleccionar la capacidad de enfriamiento y calentamiento en KW térmicos. Seleccionar la capacidad para calentar o enfriar o ambos en kW, si se trata por ejemplo de una bomba de calor de alta eficiencia energética o de un sistema VRV. Esto se podrá hacer de manuales de fabricantes y tomando en cuenta la evaluación térmica del edificio tratada en el apartado 3.2.5 de la etapa de climatización con sistemas pasivos.
- 13. Calcular el tiempo estacional o anual de operación del sistema. Ya con la selección del sistema o los sistemas se deberá establecer el tiempo en operará para climatizar el edificio y el tiempo en que permanecerá sin funcionar para no tener un desgaste prematuro de los componentes mecánicos y eléctricos.

Para ello se empleará el análisis del diagrama de isorequerimientos del apartado 3.2.2 (síntesis y determinación del confort) y descrito en el paso 5 y se observará el día, mes y horario en que se debe calentar o enfriar el edificio con estos sistemas. También se sugiere un periodo de descanso del

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

50 % de horas de operación al día para los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que calienten y enfríen o que solo enfríen y el 33 % de horas de operación para los sistemas que solo calienten.

14. Calcular el consumo de gas y/o electricidad estacional o anual. A partir de seleccionar la capacidad en kW térmicos de los sistemas de ahorro energético se podrá determinar cuántos sistemas se necesitan para climatizar una hora el edificio. Consultando de la literatura comercial o de catálogos del fabricante la demanda de gas o electricidad por equipo. Y con el número de horas calculadas del paso anterior se podrá estimar el consumo de gas o electricidad del edificio en una estación del año o en todo el año.

Si el sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética) no lleva conductos se deberá omitir el paso 7 de la sección de diseño. En la figura 3.7 se resume este procedimiento.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

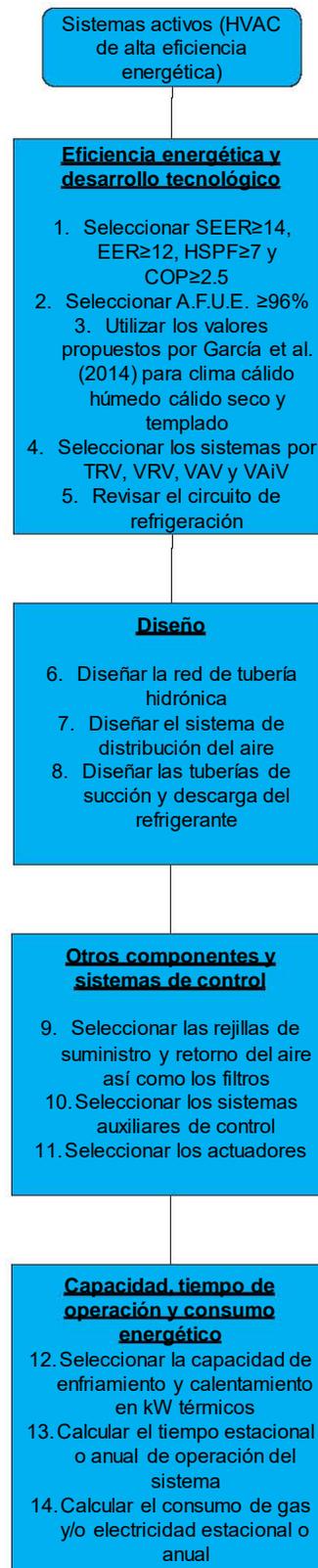


Figura 3.7 Pasos de la segunda etapa con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Para aumentar la sustentabilidad energética, no utilizar energías no renovables y siempre y cuando los recursos económicos lo permitan será necesario pasar a la tercera etapa de la metodología que está basada en la climatización del edificio con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables). Estos sistemas operarán en las horas en que los sistemas pasivos no climatizen el edificio. Esta etapa se describe en el siguiente apartado:

3.4 Sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables)

Los pasos que comprende esta etapa de la metodología se muestran en la figura 3.7.

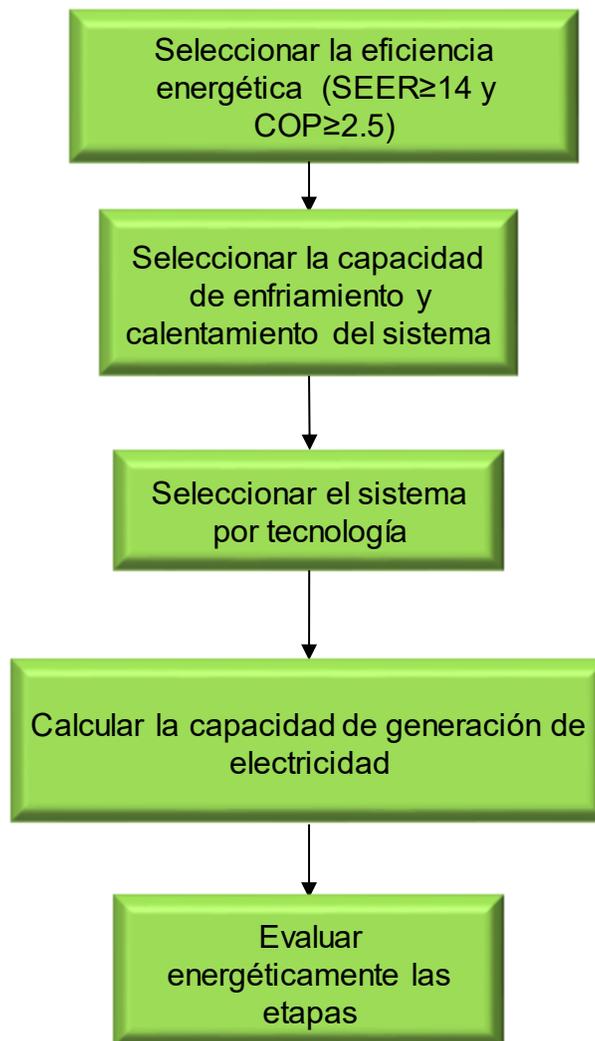


Figura 3.7. Pasos de la tercera etapa con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

3.4.1 Determinar las ganancias o pérdidas de calor del edificio

En este paso se deberá emplear el resultado del cálculo realizado en el apartado 3.2.5 de la etapa de sistemas pasivos.

3.4.2 Seleccionar la eficiencia energética y COP del sistema

Seleccionar sistemas con la razón de eficiencia energética estacional (SEER por sus siglas en inglés) igual o mayor a 14 o con Coeficiente de funcionamiento mayor o igual a 2.5.

3.4.3 Seleccionar la capacidad de calentamiento y enfriamiento del sistema

Una vez que se conocen las ganancias o pérdidas de calor del edificio se definirá la capacidad del sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) en kilowatts. Existen varias opciones de energías renovables que pueden sostener a los sistemas activos HVAC. Entre estas opciones se tienen la energía solar, la energía eólica, la energía geotérmica de baja temperatura y la biomasa. Para ello y a manera de ejemplo se pueden considerar algunas de las siguientes combinaciones de sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energía solar y energía geotérmica de baja temperatura).

1. La bomba de calor y fuente la arena con electricidad generada por paneles fotovoltaicos,
2. El chiller por absorción de ciclo cerrado sostenido por energía solar,
3. Y el chiller por absorción de ciclo abierto sostenido por energía solar.

3.4.4 Seleccionar el sistema por tecnología

De las opciones anteriores se deberán aplicar los mismos criterios empleados en el apartado 3.3.1 de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) para seleccionar los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables). También se deberá prever que los sistemas tengan la capacidad de climatizar uno o varios pisos del edificio al mismo tiempo.

Ejemplos de selección de algunos sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

Bomba de calor

Para seleccionar una bomba de calor se deberá utilizar el siguiente procedimiento:

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

1. Seleccionar sistemas con SEER y COP propuestos en el apartado 3.4.2.
2. Seleccionar la capacidad de calentamiento y enfriamiento en kw térmicos,
3. Seleccionar la demanda eléctrica del compresor y ventilador(es),
4. Seleccionar bombas de calor que utilicen el sistema inversor en vez de flujo continuo de refrigerante,
5. La caída de presión en los serpentines enterrados debe ser menor a 20 kPa,
4. Realizar un estudio analítico de la temperatura y cálculo de la conductividad térmica de la arena,
5. Realizar un estudio experimental de la temperatura, humedad y tamaño de grano de la arena,
6. Diseñar el serpentín,
7. Calcular la demanda eléctrica del sistema de bombeo,
8. Calcular y seleccionar del sistema fotovoltaico,
9. Calcular y seleccionar el banco de baterías.

Chiller por absorción de circuito cerrado y abierto

1. Diseñar sistemas de almacenamiento de calor latente con base en materiales con cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) como el cloruro de calcio hexahidratado en vez de tanques de almacenamiento de agua caliente. Esta estrategia servirá para almacenar en el PCM el calor suministrado por el agua caliente proveniente de calentadores solares de agua e incrementar la potencia para el calentamiento o enfriamiento del sistema en 10 kW en horas pico o durante la noche según lo sugerido por Helm et al. (2009).
2. Diseñar colectores solares de tipo parabólico para el calentamiento del agua que se enviará al intercambio de calor con el PCM en vez de calentadores solares con concentradores de tipo plano o de tubos al vacío de acuerdo con lo propuesto por Mazloumi et al. (2008). Esto para reducir la superficie de colección de la radiación solar en el edificio.
3. Diseñar el sistema de bombeo del agua que circula por los serpentines de climatización del edificio (entre el evaporador y los ventiladores serpentín) con variadores de frecuencia esto para reducir la demanda de energía eléctrica del chiller por absorción y en el sistema de bombeo de la torre de enfriamiento (en los serpentines condensador-absorbedor).
4. Utilizar los valores de eficiencia energética propuestos en la tabla 2.2 del apartado 2.4 para sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energía solar) y con sistema de refrigeración por absorción de ciclo cerrado y condensador enfriado por agua.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

3.4.5 Calcular la capacidad de generación de electricidad

Una vez que se ha seleccionado la capacidad de calentamiento y enfriamiento del sistema y se ha seleccionado por tecnología se calculará el consumo de energía de los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) que servirá de base para calcular la capacidad de generación de electricidad del sistema fotovoltaico y alimentarlo eléctricamente durante el día. Para el caso de sistemas de tipo aislado de la red de suministro eléctrico se deberá estimar el número de baterías que los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) utilizarán para operar cuando no haya Sol.

Para calcular el sistema fotovoltaico de tipo aislado se deberá seguir el procedimiento propuesto por Rangel (2010) citado por Ceballos (2012) y para el caso del banco de baterías se deberá seguir el procedimiento propuesto por Pareja (2010).

Al igual que los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) se deberá analizar primero el diagrama de isorequerimientos del apartado 3.2.2 en su paso 5 para observar el tiempo en que se debe calentar o enfriar el edificio y que no es climatizado con sistemas pasivos.

También se deberá considerar un periodo de operación del sistema de 8 horas como máximo para los sistemas de calentamiento y de 12 horas para los sistemas que calienten y enfríen por día. Dentro de la demanda de energía de cada sistema deberán incluirse todos los componentes externos como son sensores de temperatura y humedad, actuadores y bombas de agua.

Cuando haya calor o frío en el edificio y no se necesite calentar o enfriar los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) dejarán de operar vía señal de mando de los sensores de cuarto instalados por piso. Y la energía generada por los sistemas fotovoltaicos puede ser enviada a la red de suministro eléctrica local.

3.4.6 Evaluar energéticamente las etapas

Para evaluar toda la metodología se estimará el consumo eléctrico, en kWh ó de gas natural o L.P, en kg que tendría el edificio si fuera climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) por estación para el caso del calentamiento o por todo el año en el caso de que el edificio requiera ser climatizado con sistemas que calienten y enfríen.

CAPÍTULO II. CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍA EN EDIFICIOS

Para la primera etapa, se calculará el tiempo por estación o todo el año en que los sistemas pasivos climatizarán el edificio y en el cual los sistemas activos (HVAC convencionales) dejarán de operar. Con esto será posible establecer el consumo de electricidad o gas estacional o anual que tendrá el edificio por el uso de la primera etapa.

En la segunda etapa se estimará el tiempo en que el edificio no es climatizado con sistemas pasivos y cuando este requiera ser climatizado. Con este tiempo se estimará el consumo energético estacional o anual que tendrán los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y se estimarán los kWh o kg de gas natural o L.P.

En la tercera etapa se estimará el tiempo en que el edificio no es climatizado con sistemas pasivos y cuando este requiera ser climatizado con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables). Como estos sistemas no utilizan combustibles fósiles se podrá estimar la energía eléctrica total que se debe generar durante el día en kWh o MWh estacionales o anuales. En esta etapa también se podrá estimar el número de baterías que deberán ser utilizadas en la noche por los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) para climatizar el edificio. Tanto el cálculo del sistema fotovoltaico como el número de baterías es importante porque se podrá estimar el espacio requerido para colocarlos. En esta parte de la metodología se indicarán cuantos kWh/Estacionales y kg/Estacionales de gas natural o L.P. se dejarán de consumir por el uso de sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

CAPÍTULO IV
**CASO DE ESTUDIO: CLIMA-
SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO**

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Se aplica la metodología a un caso de estudio de un edificio residencial multifamiliar alto que se encuentra en un clima semifrío en la ciudad de México. Para ello se aplicaron las tres etapas de la metodología iniciando la climatización del edificio con sistemas pasivos, posteriormente y para disminuir la demanda de energía eléctrica o gas se aplicó la segunda etapa. Finalmente se utilizaron los sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) para alcanzar la sustentabilidad energética.

4.1 Climatización con sistemas pasivos

4.1.1 Información general

Localización geográfica.

El primer paso de la metodología es recopilar la información general de localización geográfica del lugar donde se ubica el edificio. Los datos se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Coordenadas geográficas y altitud de la delegación Cuajimalpa, ciudad de México.

Edificio de uso habitacional	
Latitud	19° 21' 28"
Longitud	99° 18' 05"
Altitud	2,283 m.s.n.m

Fuente: Torres y Morillón (2006b)

Datos climatológicos

El segundo paso es obtener los datos climatológicos del sitio, Morillón et al. (2004) indican que el clima que predomina en la ciudad de México es un clima templado sub-lluvioso. En los mapas de la ciudad de México esta presenta un bioclima promedio semifrío para los meses de diciembre y enero.

Con la latitud del lugar en donde se localiza el edificio, así como las temperaturas máximas y mínimas normales registradas en la estación meteorológica 9016 Cuajimalpa del Sistema Meteorológico Nacional para el periodo que va de 1951 a 2010 y con la hoja de cálculo del programa MARDIA desarrollado por Tejeda (1991) se estimaron las temperaturas horarias medias mensuales.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Posteriormente, con la latitud, estas temperaturas, la temperatura media y el programa HIGROTHERM también desarrollado por Tejeda (1991) se estimaron las humedades relativas horarias medias mensuales. Continuando con los datos climatológicos y leyendo las isohelias de los mapas desarrollado por Estrada y Almanza (2005) para cada uno de los meses del año se estimaron los datos de radiación máxima directa (RMD), máxima difusa (RMDi) y máxima total (RMT) en W/m^2 .

Por otra parte, los datos de la velocidad del viento fueron tomados del Observatorio Central de Tacubaya dependiente de la Comisión Nacional el Agua para el período de 1981 al 2000.

Condiciones de comodidad del edificio

De acuerdo con el apartado 2.2.1 que trata sobre el confort se resumen los parámetros de confort en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros de confort para una persona que esta parada y relajada y que ocupa un edificio residencial con uso habitacional

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	21.3-24	°C
Humedad relativa (%)	50	
Velocidad del aire	0.20	m/s
Índice metabólico	1.20	MET
Razón metabólica	70	W/m^2

Fuente: Elaboración propia

Tipo de actividad realizada por los ocupantes

Es un edificio de habitación individual, urbano, residencial y multifamiliar alto. La actividad desarrollada por los ocupantes del edificio es trabajo ligero. Esta actividad predominante es desarrollada por 8 personas por piso (44 pisos en total). Esto hace que el edificio existente sea ocupado por un promedio de 352 personas. En la figura 4.1 se muestra un modelo tridimensional del edificio residencial que ya existe del caso de estudio. El edificio está integrado por 44 apartamentos.

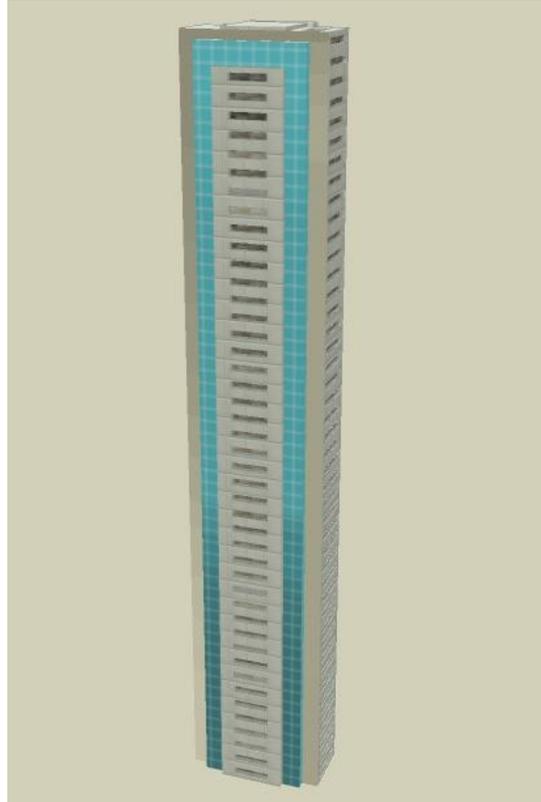


Figura 4.1. Modelo tridimensional del edificio residencial con apartamentos que ya existe.

En la figura 4.2 se muestra una vista en corte del edificio residencial.

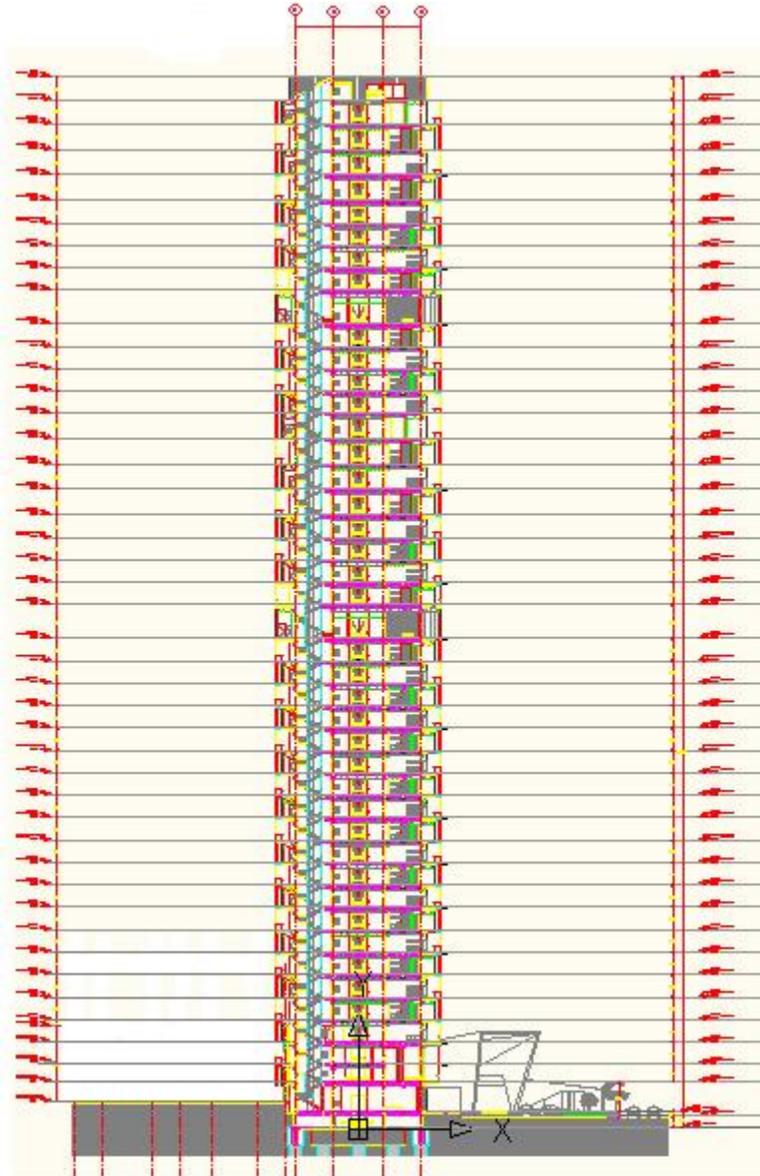


Figura 4.2. Vista lateral del edificio residencial del caso de estudio.

4.1.2 Síntesis y diagnóstico

Recolección de los datos de temperatura, humedad, radiación solar y velocidad del viento.

En las tablas 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se muestran los datos de temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.3 Temperaturas horarias medias mensuales, a partir de medias extremas en °C para Cuajimalpa, ciudad de México.

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00	6.9	7.0	9.0	10.2	10.6	10.1	9.5	10.0	9.5	8.0	7.5	6.8
01:00	6.1	6.3	8.3	9.6	10.0	9.6	9.0	9.5	9.0	7.4	6.8	6.1
02:00	5.5	5.7	7.7	9.0	9.5	9.2	8.7	9.2	8.6	6.9	6.2	5.5
03:00	5.0	5.2	7.2	8.6	9.1	8.9	8.4	8.9	8.3	6.4	5.7	5.0
04:00	4.6	4.7	6.8	8.2	8.8	8.6	8.1	8.6	8.0	6.0	5.3	4.6
05:00	4.3	4.4	6.5	7.9	8.5	8.4	7.9	8.4	7.8	5.7	5.0	4.3
06:00	4.0	4.1	6.2	6.8	7.7	7.8	7.3	7.7	6.9	5.5	4.8	4.0
07:00	3.2	3.6	6.1	8.4	9.6	9.6	8.9	8.9	7.8	5.2	4.0	3.1
08:00	5.2	6.1	9.1	11.5	12.8	12.5	11.5	11.3	10.0	7.5	6.1	5.0
09:00	8.5	9.6	12.9	15.1	16.1	15.3	14.1	13.8	12.6	10.8	9.2	8.2
10:00	11.9	13.1	16.4	18.1	18.9	17.6	16.3	16.0	15.0	13.9	12.5	11.5
11:00	14.7	15.9	19.0	20.3	20.7	19.1	17.7	17.5	16.7	16.3	15.1	14.3
12:00	16.5	17.7	20.5	21.5	21.7	19.9	18.4	18.3	17.7	17.8	16.9	16.2
13:00	17.5	18.5	21.1	21.9	21.8	19.9	18.4	18.5	18.1	18.4	17.7	17.2
14:00	17.6	18.5	20.9	21.5	21.3	19.4	18.0	18.1	17.9	18.3	17.8	17.3
15:00	17.1	17.8	20.1	20.6	20.4	18.6	17.3	17.5	17.3	17.7	17.3	16.9
16:00	16.2	16.8	19.0	19.4	19.3	17.6	16.3	16.6	16.4	16.7	16.4	16.0
17:00	15.0	15.4	17.6	18.1	17.9	16.4	15.3	15.6	15.4	15.6	15.2	14.8
18:00	13.6	14.0	16.1	16.7	16.6	15.3	14.2	14.6	14.4	14.3	13.9	13.5
19:00	12.3	12.6	14.6	15.3	15.3	14.2	13.2	13.6	13.4	13.0	12.6	12.2
20:00	11.0	11.2	13.3	14.0	14.1	13.1	12.3	12.7	12.4	11.8	11.4	10.9
21:00	9.8	10.0	12.0	12.9	13.1	12.2	11.4	11.9	11.6	10.7	10.2	9.7
22:00	8.7	8.8	10.9	11.9	12.1	11.4	10.7	11.2	10.8	9.7	9.2	8.6
23:00	7.7	7.9	9.9	11.0	11.3	10.7	10.1	10.5	10.1	8.8	8.2	7.6

En la tabla anterior se puede observar que la temperatura más alta se tiene en el mes de mayo a las 13:00 h con 21.8 °C, mientras que la temperatura más baja ocurre en el mes de diciembre a las 7:00 h (3.1 °C).

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.4 Humedades relativas horarias medias mensuales, a partir de medias extremas en % para Cuajimalpa, ciudad de México.

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00:00	77	75	71	72	73	76	78	79	78	76	76	77
01:00	79	78	73	73	75	78	80	80	80	78	78	80
02:00	81	80	75	75	76	79	82	82	81	79	80	82
03:00	83	81	76	76	77	81	83	83	83	81	82	83
04:00	84	83	78	77	78	82	84	84	84	82	83	85
05:00	85	84	79	78	79	82	84	85	85	83	84	86
06:00	86	85	79	82	82	85	87	87	88	84	85	87
07:00	89	86	79	77	76	78	81	83	85	85	87	90
08:00	82	78	71	68	66	69	72	74	77	77	80	83
09:00	71	67	60	57	56	59	62	65	67	66	70	72
10:00	59	55	49	48	48	51	54	57	58	56	59	60
11:00	50	46	42	41	42	46	49	51	52	48	50	51
12:00	44	41	37	38	39	43	47	48	48	43	44	45
13:00	41	38	35	37	38	43	46	48	47	41	41	42
14:00	40	38	36	38	40	45	48	49	48	41	41	41
15:00	42	41	38	40	42	47	50	51	50	43	43	43
16:00	45	44	42	44	46	51	54	54	53	46	46	46
17:00	49	48	46	48	50	55	57	58	56	50	50	50
18:00	54	53	50	52	54	59	61	62	60	55	54	54
19:00	59	57	55	56	58	62	65	65	64	59	59	59
20:00	63	62	59	60	62	66	68	69	67	63	63	63
21:00	67	66	62	63	65	69	71	72	71	67	67	67
22:00	71	69	66	67	68	72	74	74	74	70	70	71
23:00	74	73	69	69	71	74	76	77	76	73	74	74

Para el caso de la humedad la tabla anterior se observa que el registro más alto de humedad relativa se tuvo en enero a las 7:00 h, con un valor de 89 % y el valor más bajo se tuvo en marzo a las 13:00 h con 35 %.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.5 Radiación solar directa, difusa y total en la ciudad de México.

RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)													
MES	E	F	M	A	M	J	JUL	A	S	O	N	D	ANUAL
R.M.D	254.6	300.9	277.8	300.9	300.9	254.6	254.6	254.6	231.5	231.5	231.5	208.3	258.5
R.M.Di	115.4	92.4	185.2	185.2	185.2	185.2	185.2	185.2	185.2	162.0	138.9	138.9	162.0
R.M.T	370.0	393.3	463.0	486.1	486.1	439.8	439.8	439.8	416.7	393.5	370.4	347.2	420.5

Fuente: Estrada y Almanza (2005)

En la tabla 4.5 se puede observar que los meses con mayor radiación solar son los meses de abril y mayo con 486.1 W/m², mientras que el mes con menos radiación es el mes de diciembre con 347.2 W/m². Para el viento se muestra la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Magnitud media del viento máximo para Cuajimalpa, ciudad de México (m/s).

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
7.2	8.0	8.7	8.6	9.0	7.6	7.8	8.1	7.5	7.7	6.5	6.2

Fuente: CNA (1981-2000)

El anemómetro de la estación meteorológica realizó un registro histórico de entre 6.2 m/s y 9.0 m/s de velocidad del viento para el este periodo de 1981 al 2000 lo que según la escala de Beaufort se trata de una brisa moderada.

Cálculo del centro de la zona de confort

En la tabla 4.7 se muestran el centro (termopreferendum) y amplitud de la zona de confort para todos los meses del año.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.7 Centro y amplitud de la zona de confort para cada mes, en Cuajimalpa, ciudad de México.

Mes	Centro (°C)	Amplitud ΔT (°C)
Enero	20.74	3.0
Febrero	20.89	3.5
Marzo	21.62	3.5
Abril	21.97	3.5
Mayo	22.08	3.0
Junio	21.80	3.0
Julio	21.51	3.0
Agosto	21.59	3.0
Septiembre	21.42	3.0
Octubre	21.12	3.0
Noviembre	20.89	3.0
Diciembre	20.69	3.0

Fuente: Elaboración propia

Definición de las condiciones del clima

Los 288 valores de la temperatura horaria y los 288 valores de la humedad relativa horaria de los 12 meses del año se procesaron en 12 cartas bioclimáticas de Givoni indicando el centro de la zona de confort. Los centros de la zona de confort también se muestran en la primera columna de tabla 4.7. En la figura 4.3 se muestra un ejemplo de la gráfica de Givoni realizada para el mes de diciembre de la delegación Cuajimalpa, de la ciudad de México.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

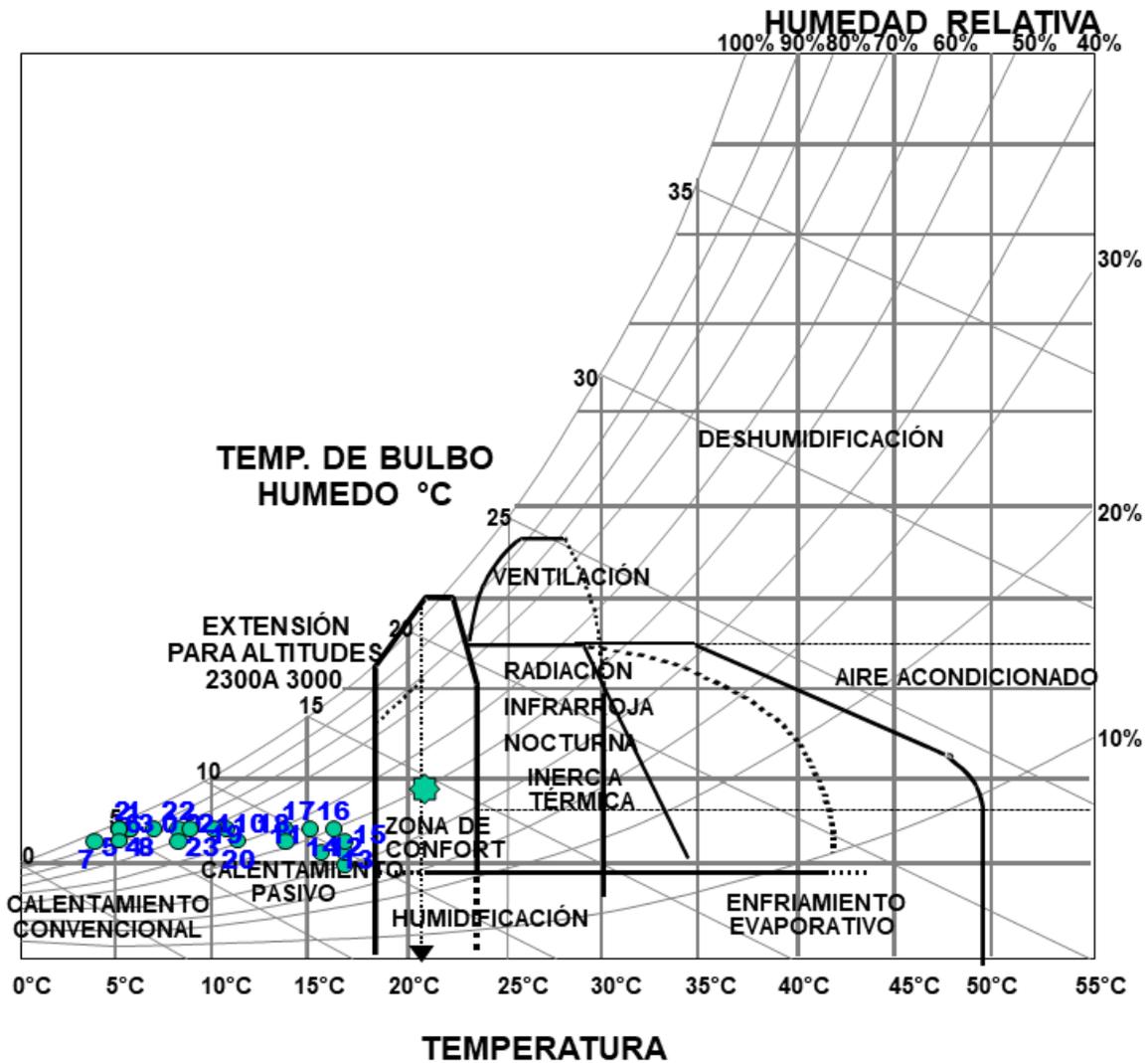


Figura 4.3. Diagrama bioclimático de Givoni adaptado para la delegación Cuajimalpa, ciudad de México, diciembre (Torres y Morillón, 2006b)

En el diagrama bioclimático de Givoni se muestra que para el mes de diciembre, el termopreferendum es de 20.7 °C, sin presentarse el confort en alguna hora por lo que se requiere el calentamiento pasivo en la mayor parte de las horas complementado con calentamiento convencional.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA TEMPLADO- CIUDAD DE MÉXICO

4.1.3 Análisis de los requerimientos de climatización

Una vez que se tiene este las síntesis y diagnóstico del clima y siguiendo con la metodología se concentraron los resultados en el siguiente diagrama de isorrequerimientos tomando en cuenta que el edificio se sitúa en el hemisferio norte. Este diagrama se muestra en la figura 4.4.

ESTACIÓN DEL AÑO	PRIMAVERA			VERANO			OTOÑO			INVIERNO		
Hora/mes	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
00:00 h	FRÍO SIN NEVAR											
01:00 h												
02:00 h				FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR						
03:00 h												
04:00 h												
05:00 h	FRÍO SIN NEVAR					FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR				
06:00 h						FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR				
07:00 h											FRÍO SIN NEVAR	
08:00 h	FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR					FRÍO SIN NEVAR				
09:00 h						FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR	FRÍO SIN NEVAR	FRÍO SIN NEVAR		
10:00 h												
11:00 h												
12:00 h	CONFORT		CONFORT	CONFORT	CONFORT			CONFORT				
13:00 h		CONFORT				CONFORT	CONFORT					
14:00 h	CONFORT		CONFORT	CONFORT		FRÍO		CONFORT	CONFORT	FRÍO SIN NEVAR	CONFORT	CONFORT
15:00 h		CONFORT			FRÍO SIN NEVAR							
16:00 h				FRÍO SIN NEVAR							FRÍO SIN NEVAR	
17:00 h								FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR		
18:00 h	FRÍO SIN NEVAR				FRÍO SIN NEVAR							FRÍO SIN NEVAR
19:00 h			FRÍO SIN NEVAR	FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR	FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR			
20:00 h												
21:00 h		FRÍO SIN NEVAR	FRÍO SIN NEVAR		FRÍO SIN NEVAR							
22:00 h				FRÍO SIN NEVAR							FRÍO SIN NEVAR	
23:00 h									FRÍO SIN NEVAR			FRÍO SIN NEVAR

→ Hora de desocupación del edificio

→ Hora de ocupación del edificio

→ Hora de desocupación del edificio

→ Hora de ocupación del edificio

Figura 4.4. Diagrama de isorrequerimientos para Cuajimalpa, Ciudad de México.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

A partir del diagrama de isorrequerimientos de la figura 4.4 y de acuerdo con lo tratado en el apartado metodológico 3.2.2 punto 5, se puede determinar lo siguiente:

1. Primavera: No se tienen horas de calor y se presenta el confort térmico entre las 11:00 h y las 16:00 h de los meses de marzo, abril y mayo. Las horas restantes son frías.
2. Verano: El confort térmico se presenta entre las 11:00 h y las 14:00 h en el mes de junio, entre las 12:00 h y las 13:00 h en los meses de julio y agosto.
3. Otoño: En esta época del año solo se logra el confort térmico entre el medio día y las 14:00 h en los meses de septiembre y octubre y de las 13:00 h a las 14:00 h en el mes de noviembre. El resto de las horas son con clima frío sin nevar.
4. Invierno: Existe el confort entre las 13:00 h y las 14:00 h en el mes de enero, a partir del medio día y hasta las 15:00 h en el mes de febrero, y no se tiene alguna hora en el mes de diciembre.

De acuerdo con el análisis de los factores climáticos y los requerimientos de climatización requeridos, se concluye que la mayor necesidad de calentamiento se presenta en la época de invierno, mientras que en la estación de verano y otoño se debe propiciar el calentamiento del edificio entre las 15:00 h y las 17:00 h y después de las 20:00 h, ya que en este horario se encuentra ocupado el edificio.

Para la época de primavera se debe propiciar el calentamiento del edificio durante la noche y hasta las 7:00 h y de las 20:00 h en adelante ya que se tiene confort en el horario de ocupación del edificio (entre las 14:00 h y las 17.00 h).

4.1.4 Estrategias de climatización

A partir del diagrama de isorrequerimientos se identificaron las siguientes estrategias particulares de climatización:

Estación de primavera: Propiciar las ganancias de calor por la fachada Oeste entre las 17:00 h y las 18:00 h. Promover el almacenamiento térmico entre las 7:00 h y las 18:00 h para ocupar el calor almacenado durante el día en las horas de noche.

Estación de verano: Propiciar las ganancias de calor entre las 14.00 h y las 15:00 h y evitar la ventilación natural entre las 20:00 h y las 7:00 h. Promover el almacenamiento térmico de la estructura entre las 7:00 h y las 12:00 h y entre las 15:00 h y las 18:00 h.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Estación de otoño: Al igual que en la época anterior se debe propiciar las ganancias de calor entre las 7:00 h y las 12:00 h y entre 15:00 h y las 18:00 h. Evitar la ventilación natural entre las 20:00 h y las 7:00 h.

Estación de invierno: Promover las ganancias de calor por las fachadas Sur, Este y Oeste durante el día en el mes de diciembre. Y por la mañana por la fachada Este entre las 7:00 h y las 12:00 h para el mes de enero y entre las 7:00 h y las 11:00 h para el mes de febrero. Estas ganancias de calor también se deberán captar entre las 15:00 h y las 16:00 h para el mes de enero y a las 16:00 h para el mes de febrero.

4.1.5 Definición del sistema pasivo de climatización

En el diagrama de Givoni de la figura 4.3 se puede observar con claridad que para propiciar el confort en el edificio y meterlo en la zona de confort se debe utilizar el calentamiento pasivo. De acuerdo con esto, con el diagrama de isorrequisitos y las estrategias de climatización se definen los siguientes sistemas pasivos:

Para la estación de primavera. El sistema pasivo deberá promover las ganancias de calor indirectas en la fachada Oeste por la tarde, entre las 17:00 h y las 18:00 h. Este sistema pasivo también deberá calentar de manera rápida el aire durante el día hasta las 18:00 h.

Para obtener ganancias solares indirectas se pueden usar muros Trombe ventilados, sistemas de doble pared ventilada con aperturas que permitan flujo de aire hacia el interior, paredes solares y aislamientos térmicos transparentes con absorbedor integrado y panel tipo abeja con tubos capilares llenos de dióxido de carbono en la fachada Sur.

Estación de verano: Para la estación de verano el sistema pasivo debe calentar entre las 15:00 h y las 16:00 h que es cuando se tiene ocupación en el edificio. El muro Trombe, el sistema de doble pared de vidrio o el aislamiento térmico transparente con absorbedor integrado orientados hacia la fachada Sur, que es la fachada en la que le da más tiempo la radiación solar y pueden ser utilizados.

En las épocas de otoño e invierno se podrá utilizar la fachada con doble pared de vidrio ventilada como sistema pasivo de calentamiento con la recomendación de que la separación entre las placas de vidrio no sea mayor a 20 cm, ya que podría causar sobrecalentamiento en el aire que se desee introducir al edificio en el horario de entre las 7:00 h y las 12:00 h. Se debe diseñar una apertura remota en cada piso del edificio en el muro exterior expuesto a la radiación solar, esto para promover el flujo de aire caliente hacia el interior del edificio.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Para promover el calentamiento pasivo en el tiempo de ocupación del edificio, entre las 20:00 h y las 7:00 h del día siguiente y durante todo el año se podrá también recurrir a la utilización de sistemas pasivos que combinen aislantes térmicos transparentes con absorbedor integrado al muro exterior y paneles de materiales con cambio de fase orgánico a base de parafina colocados en el interior del edificio.

Se definieron tres sistemas pasivos por las siguientes razones:

1. El muro Trombe transfiere el calor absorbido por un muro exterior en color negro a una cámara de aire que por convección natural asciende y se introduce al interior del edificio.
2. El aislante térmico transparente evita además que el calor de la corriente de aire que se genera entre la placa del absorbedor y el muro Trombe fluya hacia el exterior del edificio. El sistema es propuesto para ser llenado con dióxido de carbono en vez de aire a 21 °C ó aerogel, esto por tener una conductividad térmica menor, es decir, $0.0168916 \text{ W/m } ^\circ\text{C}^1 < 0.017 \text{ W/m } ^\circ\text{C}^2 < 0.02476 \text{ W/m } ^\circ\text{C}^3$. Este se colocará en la fachada Sur del edificio, que es la fachada que más tiempo está expuesta a la radiación solar.
3. El aislante térmico transparente con absorbedor adosado al muro exterior y panel de parafina en el interior servirá para suministrar las ganancias de calor en la noche, cuando no se tenga radiación solar. Durante el día el absorbedor del aislante térmico transparente recibirá y transmitirá el calor por conducción hacia el muro exterior y de este hacia el panel de parafina colocado en el interior del edificio. Ahí se acumulará este calor que después de que el Sol se halla ocultado se transmitirá hacia el aire interior del edificio. Estos paneles pueden ser colocados en las fachadas Este y Oeste en la parte interior del muro exterior pero no sobre alguna ventana ya que se puede obstruir la entrada de la iluminación natural del edificio.

Detalles constructivos de los sistemas pasivos seleccionados

Los elementos constructivos del muro Trombe son:

- Un muro de concreto armado de 25 cm de espesor en la fachada Sur del edificio (superficie estimada de 3,553 m²)
- El muro exterior deberá tener dos aberturas de 0.25 m de ancho por 15 m largo en la parte superior e inferior. La distancia de la losa a la parte superior

¹ Valor tomado de Çengel (2004)

² Valor tomado de Çengel (2004)

³ Valor tomado de Baetens et al. (2011)

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

de la abertura será de 15 cm y del piso terminado a la parte baja de la abertura inferior también será de 15 cm

- La distancia (L) entre la placa absorbadora y el muro de concreto será de 15 cm

Los elementos constructivos que componen el sistema pasivo de climatización con aislante térmico transparente lleno con CO₂ son:

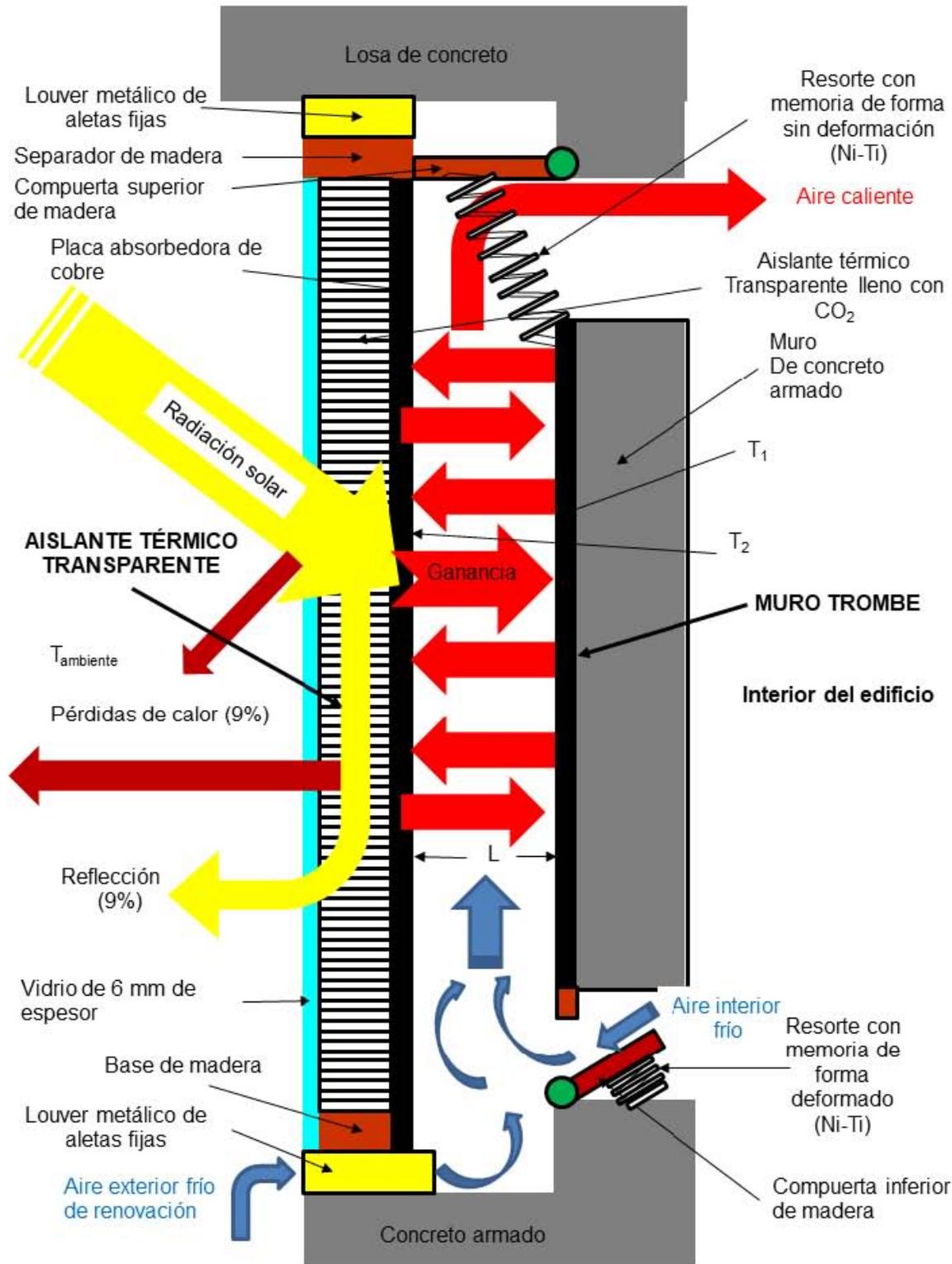
- Tubos capilares llenos con bióxido de carbono con una longitud de 10 cm
- CO₂ contenido en tubos de 5 mm de diámetro a una presión de 0.011 mbar
- Placa absorbadora de cobre de 1 mm de espesor pintada de color negro.
- 88 lovers metálicos hechos de aluminio anodizado de 25 cm de altura por 15 m de largo.
- 4 resortes de niquel-titanio de 2 mm de espesor del alambre y 15 cm de largo en el modo de compresión (aire interior frío).

Los elementos de control. El flujo de aire interior es controlado por dos resortes con memoria de forma hechos de una aleación de niquel-titanio que está diseñado para operar a temperaturas entre 10 °C para contraerse y 24 °C para extenderse.

Los elementos constructivos que componen el sistema pasivo de climatización con aislante térmico transparente lleno con CO₂ y panel de parafina son:

- Tubos capilares llenos con bióxido de carbono con una longitud de 10 cm
- CO₂ contenido en tubos de 5 mm de diámetro a una presión de 0.011 mbar
- Placa de vidrio exterior de 6 mm de espesor
- Lámina de cobre en color negro calibre 24 que funcionará como absorbador
- Parafina contenida en un panel de 60 cm x 40 cm x 0.5 cm
- Pantalla plegable de lona plástica en color aluminio

En la figura 4.5 se muestra la integración del muro Trombe y el aislamiento térmico transparente lleno de CO₂ y en la figura 4.6 se muestra el sistema pasivo de calentamiento que combina un aislante térmico transparente y un panel de parafina.



4.5. Sistema pasivo de calentamiento muro Trombe- aislante térmico transparente lleno con CO₂.

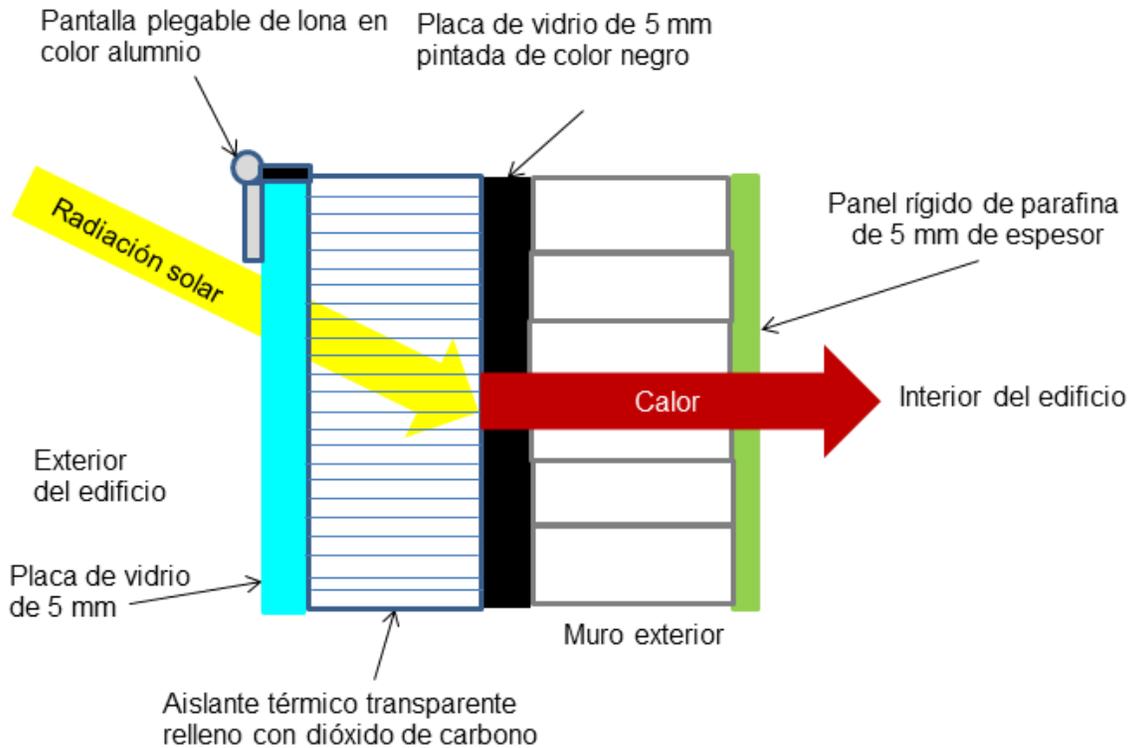


Figura 4.6. Sistema pasivo de calentamiento aislante térmico transparente lleno con CO₂-panel con parafina.

Funcionamiento del sistema pasivo de calentamiento muro Trombe-aislante térmico transparente lleno con CO₂.

La fachada Sur del edificio recibe la radiación solar entre las 9:00 h y las 15:00 h y el aislante térmico transparente transmite una parte de esta radiación hacia la cámara interior de aire formada por la placa absorbidora de cobre y el muro Trombe. El dióxido de carbono al tener una baja conductividad térmica impide que una parte del calor transmitido hacia el ducto de aire se pierda. El aire frío que es introducido por la abertura inferior del ducto al ser calentado por la placa absorbidora sube a la parte superior para ser introducido nuevamente al interior del edificio.

De acuerdo con el diagrama de isorequerimientos y para evitar el sobrecalentamiento del aire interior del edificio en las horas de confort (12:00 h y 13:00 h) en las cuatro estaciones del año la compuerta superior se cierra y ajusta al muro Trombe y el aire caliente interior sale por la rejilla exterior (louver metálico en color amarillo). Estas compuertas serán operadas por resortes con memoria de

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

forma de Niquel-Titanio, que se pueden educar cuando la temperatura disminuya a 10°C o bien extenderse cuando la temperatura supere los 24 °C.

Funcionamiento del sistema pasivo de calentamiento aislante térmico transparente lleno con CO₂-panel de parafina.

Con base en el diagrama de isorrequerimientos que se mostro en la figura 4.3 el edificio es ocupado y permanece ocupado desde las 20:00 h hasta las 7:00 h del día siguiente. En este caso se puede colocar un sistema pasivo de calentamiento que combine un aislamiento térmico transparente lleno con CO₂ y un panel lleno de parafina. Este sistema pasivo se colocará en las fachadas Este y Oeste, esto para captar el calor de la radiación solar que incide sobre la fachada Oeste de las 7:00 h a las 9:00 h y en la fachada Oeste de las 15:00 h de las 17:00 h y utilizarlo durante parte de la noche. En las horas que se tenga confort y no se desee calentar el edificio se podrá desplegar la pantalla de aluminio exterior que cubrirá al sistema pasivo, esto para evitar que siga suministrando ganancia de calor al interior del edificio.

Ahora bien, con la definición de los sistemas pasivos se adecuaron al edificio existente en la fachada Sur del edificio, tratando de modificar lo menos posible la estética del edificio que ya existe. Esta adecuación se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7. Adecuación de los sistemas pasivos de calentamiento a la fachada Sur del edificio existente.

Como se puede observar en la figura 4.7 el sistema pasivo se puede adecuar a la fachada Sur del edificio en todos sus pisos. En la figura 4.8 se muestra el edificio sometido a la radiación solar directa.

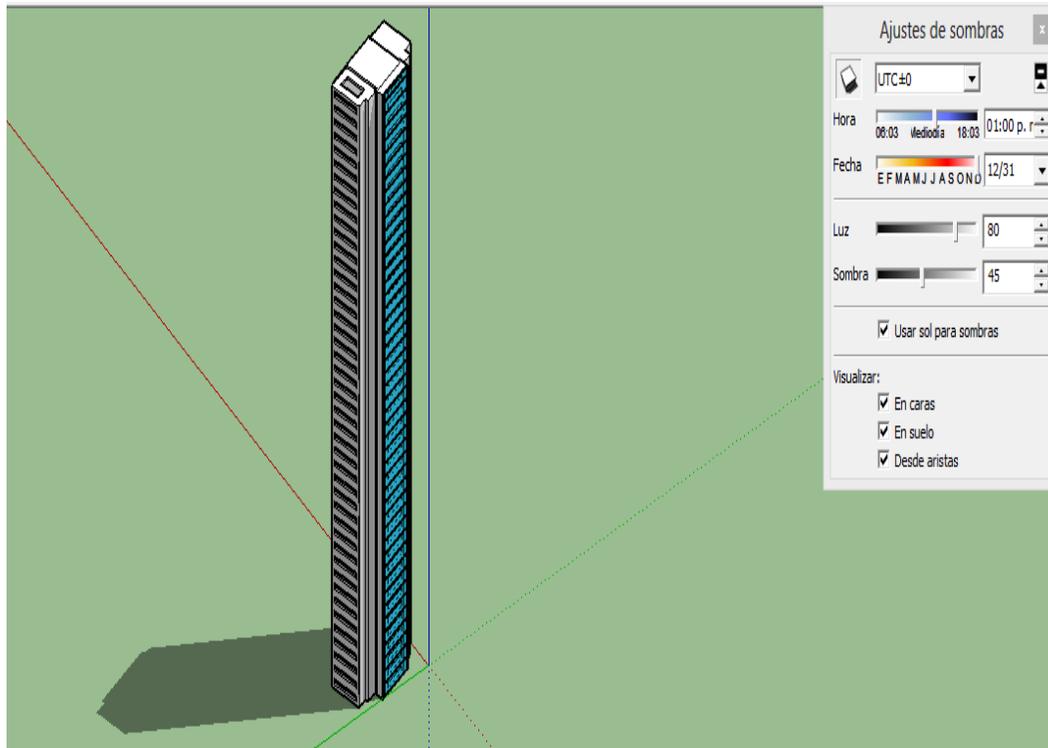


Figura 4.8. Radiación solar incidente sobre la fachada Sur del edificio a las 13:00 h del 31 de diciembre del 2015

De acuerdo con la figura anterior la radiación solar incide de manera directa sobre el sistema pasivo adecuado a la fachada Sur del edificio de acuerdo con la simulación realizada con la combinación de programas TRNSYS 17.0 y Sketch Up versión 2016. Esta simulación fue realizada para el día 31 de diciembre del 2015 a las 13:00 h.

4.1.6 Evaluación térmica

Las ganancias de calor calculadas por el sistema pasivo muro Trombe-aislante térmico transparente con el procedimiento descrito en el apartado 3.2.5 (evaluación térmica) en un horario de las 7:00 h a las 18:00 h se resumen en la tabla 4.8. En la figura 4.9 se muestra en detalle la estimación de las ganancias de calor con la hoja de cálculo adaptada con las ecuaciones de Cengel (2004).

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.8 Ganancias y pérdidas de calor del muro Trombe-aislante térmico transparente⁴

Hora del día	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Temp. del aire en el ducto (°C)	q _{solar} (W/m ²)	Q (W)
07:00	18.0	21.9	3.4	2.64	-25,324.73
08:00	18.8	22.3	11.0	2.30	-4,602.05
09:00	19.0	22.5	16.0	2.30	10,364.55
10:00	19.5	22.0	18.9	1.51	42,597.42
11:00	19.8	22.2	19.3	1.43	197,135.44
12:00	21.0	22.5	19.5	0.80	495,558.30
13:00	22.0	23.0	22.0	0.48	1,041,468.18
14:00	23.1	25.0	23.1	1.07	1,466,509.23
15:00	22.8	24.6	22.8	1.00	1,313,111.43
16:00	22.5	23.0	22.77	0.20	1,063,309.86
17:00	22.15	22.5	15.7	0.13	1,000,279.01
18:00	22.13	22.3	15.5	0.05	547,343.07

⁴k_{concreto} = 1.74 (W/m °C), ρ_{concreto} = 2,300 kg/m³, CE_{concreto} = 0840 (J/kg °C), α = 9 x10⁻⁷ (m²/s), h_{int} = 8.1 (W/m² K)

Absortividad solar del concreto = 0.6, T_{interior} = 20.69 °C, k_{aire} = 0.02476 (W/m °C), Pr = 0.7323, ν = 1.47x10⁻⁵ (m²/s), β = 0.0035, A_{Aislante Térmico Transparente} = 1 m², A_{muro Trombe} = 3,553 m², L = 0.15 m FCS = 0.82, Número total de nodos = 5, Distancia entre nodo y nodo = 0.25 y Δt = 1 h.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
1	$e_{\text{muro ext.}}$ (m)	$k_{\text{concreto armado}}$ (W/m K)	ρ_{concreto} (kg/m ³)	CE (J/kg°C)	α (m ² /s)	Hora	$T_{\text{aire entre placas}}$ (°C)	T_{ext} (K)	Abortividad solar	Radiación solar en diciembre (q_{solar}) (W/m ²)	Radiación solar en diciembre (q_{solar}) corregido (W/m ²)	T_{int} (K)	h_{int} (W/m ² K) NOM-020-ENER-2011	Δx (m)	Area del muro (2.43 m x 15m)+(10 m x 4.43m) x 44 pisos	No. total de nodos	Δt (h)	τ	i	Diferencia nodal	T_2 (°C)	T_0 (°C)	T_0 (K)	T_1 (°C)	T_1 (K)	T_2 (°C)	T_2 (K)	T_3 (°C)	T_3 (K)	T_4 (°C)	T_4 (K)	T_5 (°C)	T_5 (K)	Q_{int} (Wh)
2	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	07:00	18	291.15	0.6	4.40	2.64	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	1	1.4E-05	1	0.54	21.90	127.00	400.15	21.36	294.51	41.11	314.26	40.03	313.18	38.96	312.11	19.21	292.36	-25,324.73
3	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	08:00	18.8	291.95	0.6	3.84	2.30	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	2	2.9E-05	2	0.38	22.30	127.00	400.15	21.92	295.07	42.71	315.86	41.95	315.10	41.20	314.35	20.41	293.56	-4,602.05
4	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	09:00	19	292.15	0.6	3.84	2.30	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	3	4.3E-05	3	0.34	22.50	127.00	400.15	22.16	295.31	43.31	316.46	42.63	315.78	41.96	315.11	20.81	293.96	10,364.55
5	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	10:00	19.5	292.65	0.6	2.51	1.51	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	4	5.8E-05	4	0.24	22.00	127.00	400.15	21.76	294.91	42.81	315.96	42.33	315.48	41.86	315.01	20.81	293.96	42,597.42
6	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	11:00	19.8	292.95	0.6	2.39	1.43	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	5	7.2E-05	5	0.18	22.20	127.00	400.15	22.02	295.17	43.51	316.66	43.15	316.30	42.80	315.95	21.31	294.46	197,135.44
7	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	12:00	21	294.15	0.6	1.33	0.80	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	6	8.6E-05	6	-0.06	22.50	127.00	400.15	22.56	295.71	45.31	318.46	45.43	318.58	45.56	318.71	22.81	295.96	495,558.30
8	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	13:00	22	295.15	0.6	0.80	0.48	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	7	0.0001	7	-0.26	23.00	127.00	400.15	23.26	296.41	47.31	320.46	47.83	320.98	48.36	321.51	24.31	297.46	1,041,468.18
9	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	14:00	23.1	296.25	0.6	1.78	1.07	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	8	0.00012	8	-0.48	25.00	126.99	400.14	25.48	298.63	52.41	325.56	53.37	326.52	54.33	327.48	27.41	300.56	1,466,509.23
10	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	15:00	22.8	295.95	0.6	1.66	1.00	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	9	0.00013	9	-0.42	24.60	126.99	400.14	25.02	298.17	51.31	324.46	52.15	325.30	52.99	326.14	26.71	299.86	1,313,111.43
11	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	16:00	22.5	295.65	0.6	0.34	0.20	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	10	0.00014	10	-0.36	23.00	126.99	400.14	23.36	296.51	47.81	320.96	48.53	321.68	49.25	322.40	24.81	297.96	1,063,309.86
12	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	17:00	22.15	295.3	0.6	0.22	0.13	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	11	0.00016	11	-0.29	22.50	126.99	400.14	22.79	295.94	46.46	319.61	47.04	320.19	47.62	320.77	23.96	297.11	1,000,279.01
13	0.25	1.74	2300	840	9.01E-07	18:00	22.13	295.28	0.6	0.09	0.05	293.84	8.1	0.25	3,553.00	5	12	0.00017	12	-0.29	22.30	126.99	400.14	22.59	295.74	46.04	319.19	46.61	319.76	47.19	320.34	23.74	296.89	547,343.07

Figura 4.9. Ganancias y pérdidas de calor del muro Trombe-aislante térmico transparente estimadas con una hoja adaptada con las ecuaciones propuestas por Cengel (2004).

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Para el sistema pasivo de calentamiento del aislante térmico transparente y el panel de parafina se utilizó la ecuación propuesta por Platzler (1999) citado por Ochs et al. (2000) con los valores mostrados en la tabla 4.9 para una superficie de concreto de 3,131.21 m².

Tabla 4.9 Parámetros para el cálculo de las ganancias de calor del sistema pasivo (aislante térmico transparente- panel de parafina).

$g_{h,B}$	0.43	
$g_{n,B}$	0.62	
RB	3.12	m ² K/W
RSE	0.08	m ² K/W
RS	0	m ² K/W
$a_{Ene,Sur}$	-0.105	
$a_{Feb,Sur}$	-0.067	
$a_{Mar,Sur}$	-0.023	
$a_{Dic,Sur}$	-0.105	
$\sum a_{Mensual,Sur}$	-0.3	
$I_{s,Ener,Sur}$	1.60×10^7	J/m ²
$I_{s,Feb,Sur}$	1.70×10^7	J/m ²
$I_{s,Mar,Sur}$	2.00×10^7	J/m ²
$I_{s,Dic,Sur}$	1.50×10^7	J/m ²
$\sum I_{s,Mensual,Sur}$	6.8×10^7	J/m ²
$ahp_{Enero,Sur}$	-0.07	
$ahp_{Feb,Sur}$	-0.08	
$ahp_{Mar,Sur}$	-0.09	
$ahp_{Dic,Sur}$	-0.07	
$ahp_{promedio,Sur}$	-0.075	
$g_{ATT,h}$	0.43	
$g_{ATT,hpZ,Sur}$	0.45	
$g_{ATT,n}$	0.62	
$g_{ATT,hp,S}$	0.49	
Rse+RB+Rs	3.03	m ² K/W
Rse+RB+Rs+Rw+Rsi	3.33	m ² K/W
$(Rse+RB+Rs)/(Rse+RB+Rs+Rw+Rsi)$	0.91	
$g_{swh,hp,S}$	0.45	
$A_{swh,Sur}$	3,131.21	m ²
F_z	1.04	
F_F	0.86	
F_s	1	
F_c	1	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Resultados de la evaluación térmica

Después de realizar la definición de los sistemas pasivos se efectuó el cálculo térmico en estado estacionario para un día de diseño con mas horas de frío y se comparó con el edificio sin climatización pasiva. Esto para estimar el horario en que las condiciones del clima del lugar y los sistemas pasivos calientan el edificio. Para ello se diseñó una hoja de cálculo en donde se estimaron las siguientes pérdidas de calor en todo el edificio entre las 7:00 h y las 18:00 h:

- Pérdidas de calor por conducción en techo, muros exteriores, particiones, ventanas, puertas, entresijos ventilados y piso.
- Pérdidas de calor por infiltración en puertas y ventanas
- Y pérdidas de calor por renovación de aire exterior.

En la figura 4.10 se muestra la hoja de cálculo de las pérdidas de calor del edificio sin sistemas pasivos de climatización a las 7:00 h para un día del mes de diciembre.

A	B	C	D	E	F
260	4.- Cálculo de las pérdidas de calor				
261	Porción de la envolvente	Coficiente global de transferencia de calor (K)	Area	ti- t_{mp}	Pérdidas por conducción y convección
262		(W/m ² K)	m ²	°C	W
263					
264	Techo	3.06	639	17.59	34,374.78
265					
266	Muros exteriores	2.31	3,194.46	17.59	470,067.66
267					
268	Particiones	1.37	5082	6.63	66,391.59
269					
270	Ventanas	5.16	6380	17.59	578,764.05
271					
272	Puertas	4.34	440	17.59	36,259.56
273					
274	Entresijos ventilados	4.38	0	17.59	0.00
275					
276	Piso	2.24	639	6.63	3,569.80
277					
278					
279	Nota: Para el caso de las particiones y el piso se utilizará la temperatura media del periodo invernal				
280			Subtotal		1,198,027.44
281					
282	5.- Pérdidas por infiltración				
283					
284	Porción	Metros lineales	m ³ /h	ti- t_{mp}	Factor
285					Pérdidas (W)
286	Ventana*	44	3.6	17.59	0.047
287					
288	Puerta**	880	14.5	17.59	0.047
289					
290					
291			Subtotal		10,898.29
292	* Se considera una ventana tipo quillotina con burete de estanqueidad				
293	** Se considera una pequeña puerta de fábrica para una vivienda con utilización poco frecuente				
294	***Se considera una pequeña puerta de fábrica para una vivienda de una o dos plantas para mas plantas y una utilización media seran los siguientes valores:				
295	15m	284			
296	30m	320			
297	60m	393			
298	6.- Renovación de aire				
299		Número de personas	m ³ /h	ti- t_{mp}	Factor
300					Pérdidas (W)
301		352	13	17.59	0.3
302					
303	*13 m ³ /h es el mínimo de aire exterior requerido correspondiente a una altura de la vivienda de 2.40 metros y una densidad de ocupación media de una persona por 4.5 a 7 m ²				
304	Se consideran 2 renovaciones/h				
305			PÉRDIDAS DE CALOR TOTALES		1,233,073.28
306			W		

Figura 4.10. Hoja de cálculo de las pérdidas de calor en estado estacionario de todo el edificio a las 7:00 h para un día del mes de diciembre.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

En la tabla 4.10 se muestra el comparativo entre las pérdidas y ganancias de calor en el edificio en un horario de las 7:00 h a las 18:00 h para un día de diseño del mes de diciembre.

Tabla 4.10 Comparativo entre las ganancias y pérdidas de calor de todo el edificio para el mes de diciembre, (W).

Horario	Pérdidas de calor	Ganancias y pérdidas de calor con sistemas pasivos de calentamiento
7:00 h	-1,233,073.28	-25,324.73
8:00 h	-1,108,151.59	-4,602.05
9:00 h	-897,757.15	10,364.55
10:00 h	-680,787.90	42,597.42
11:00 h	-496,692.77	197,135.44
12:00 h	-371,771.08	495,558.30
13:00 h	-306,022.82	1,041,468.18
14:00 h	-299,447.99	1,466,509.23
15:00 h	-325,747.30	1,313,111.43
16:00 h	-384,920.73	1,063,309.86
17:00 h	-463,818.64	1,000,279.01
18:00 h	-549,291.38	547,343.07

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 4.9 los sistemas pasivos permiten calentar todo el edificio entre las 12:00 h y las 17:00 h. El confort solo se alcanza a las 12:00 h que es cuando las ganancias de calor son muy similares tanto en el edificio existente como en la simulación con los sistemas pasivos de climatización (-372 kW de pérdidas de calor con 496 kW de ganancias de calor). En las primeras dos horas el edificio tiene un clima interior frío, aunque ya que se dejan de tener pérdidas de calor por 2.37 MW. Entre las 13:00 h y las 17:00 h el edificio es muy caliente alcanzando ganancias de calor por 1.47 MW (a las 14:00 h) por lo que los resortes con memoria de forma de niquel-titanio deberán de hacer que el aire caliente del sistema pasivo fluya hacia el amedio ambiente exterior.

Para el caso del sistema pasivo de climatización que combina el aislamiento térmico transparente y el panel de parafina la evaluación térmica dió los resultados

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

presentados en la tabla 4.11 para el periodo de invierno en las fachadas Este y Oeste.

Tabla 4.11 Ganancias de calor mensuales suministradas por el sistema pasivo de calentamiento aislante térmico transparente-panel de parafina en las fachadas del edificio para el periodo de invierno, W.

Mes	Ganancias de calor en la fachada Este del edificio	Ganancias de calor en la fachada Oeste del edificio
Enero	57,827.75	57,827.75
Febrero	68,025.05	68,025.05
Marzo	72,284.68	72,284.68
Diciembre	54,213.51	54,213.51

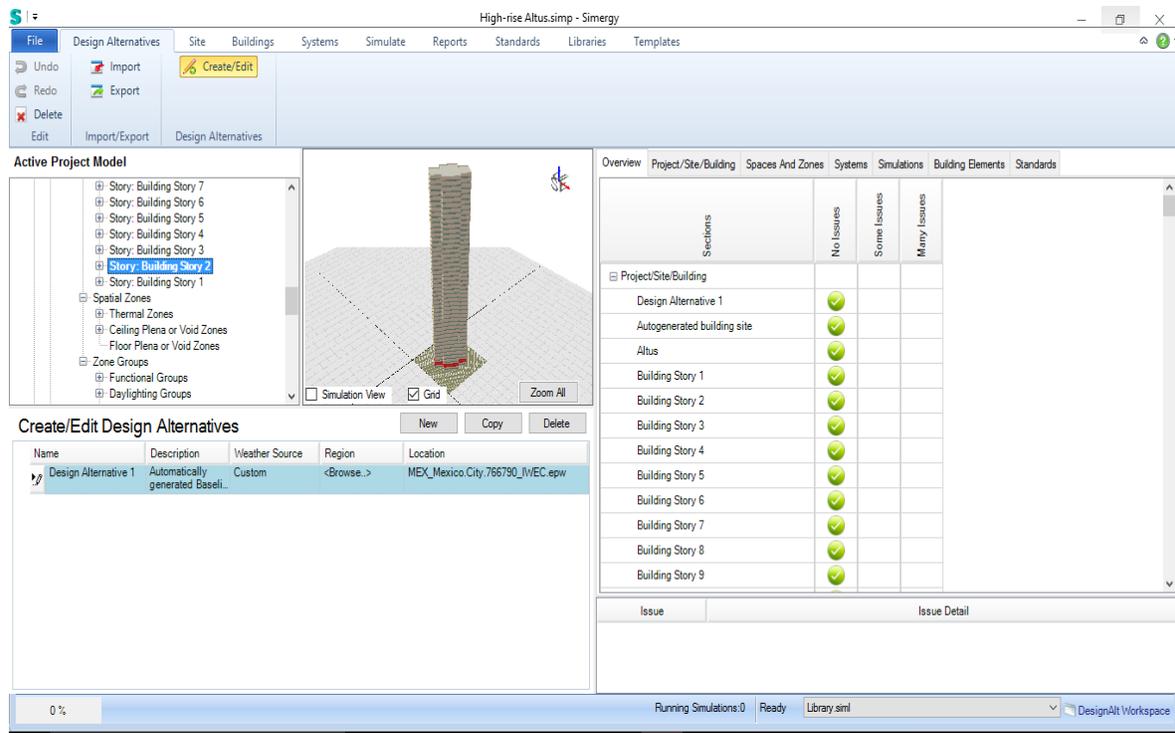
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de calor acumulado en las dos fachadas del edificio de las 7:00 h a las 10:00 h y entre las 15:00 h y las 18:00 h asciendió a 252.35 kW/estacional. Esto indica que el sistema pasivo es capaz de suministrar 1,165.88 W en cada hora durante las primeras horas de la mañana o bien en las primeras horas de la tarde-noche. Aunque las ganancias de calor no serán suficientes para cubrir los 1,233,073.28 W del mes de diciembre que se tienen como pérdidas de calor a las 7:00 h si serán suficientes para disminuir las pérdidas de calor que el sistema muro Tromble-aislamiento térmico transparente tiene entre las 7:00 h y las 8:00 h hora pasando de -25,324.73 W a -24,158.85 W.

4.1.7 Modelación energética

Para la simulación energética se seleccionó el programa ENERGY PLUS 8.5.0 y la interface gráfica SIMERGY versión 2.2. Los resultados de esta simulación muestran que el piso 2 incrementó las pérdidas de calor en 800 W más que el primer piso, es decir, paso de 27.50 kW a 28.30 kW. En la figura 4.11 muestra la simulación realizada con estos programas.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO



Fuente: DOE et al. (2016) y TRANE et al. (2016).

Figura 4.11. Simulación energética del edificio con los programas ENERGY PLUS 8.5.0 y SIMERGY 2.2.

Paso hacia la segunda etapa de climatización

Los sistemas pasivos de climatización de acuerdo con las tablas 4.9 y 4.10 solo pueden calentar el edificio entre las 12:00 h y las 17:00 h. Por lo que de acuerdo el diagrama bioclimático de Givoni de la figura 4.3 y el análisis del diagrama de isorrequerimientos de la figura 4.4 entre las 19:00 h y las 7:00 h del día siguiente el edificio permanece ocupado y requiere de calentamiento convencional para tener confort dentro del edificio. Para ello se pasará a la segunda etapa de la metodología que es climatizar el edificio con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

4.2 Climatización con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética)

Selección por eficiencia y desarrollo tecnológico

En el primer paso se seleccionará el sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética) con bomba de calor y fuente el aire, tipo divididas, SEER ≥ 14 , EER ≥ 12 y COP ≥ 2.5 .

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

En el segundo paso de la selección por eficiencia energética y desarrollo tecnológico también se tiene la opción de seleccionar sistemas activos que utilizan electricidad y gas L.P. La eficiencia por el uso de combustible anual de estos sistemas será del 96 %. Estos sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) también son una opción de climatización porque el costo por el uso del combustible de gas L.P y electricidad esta individualizado y cada propietario de cada piso del edificio paga lo que su sistema de climatización demanda.

En el tercer paso el consumo de energía de los sistemas no deberá exceder el 37.55 % del consumo total de energía del edificio, ya que el clima que predomina en el lugar donde se ubica el edificio es clima semifrío por lo que se utilizará la columna de clima templado de la tabla 3.1 por ser el clima más parecido.

Los primeros sistemas no requieren de sistemas de distribución de aire, tubería hidráulica y actuadores. Y con ello se evita que si se avería un sistema no se quede sin calentamiento todo el edificio. En el caso de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) con bomba de calor si se avería una unidad central exterior, 4 pisos del edificio se quedarán sin climatización.

El cuarto paso se tomó en cuenta que los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) tipo bomba de calor y fuente el aire, utilizarán tecnología VRV. El sistema activo de calentamiento central altamente eficiente que usa electricidad y gas L.P. no cuenta con un circuito de refrigeración por lo que no puede operar de acuerdo con la variación de la temperatura del refrigerante ni puede variar el volumen del aire.

En el quinto paso los sistemas con bomba de calor tienen circuitos de refrigeración sin aplastamientos u obstrucciones. Para el caso de la segunda opción los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central no tienen circuitos de refrigeración.

El sexto paso tampoco se aplicará porque los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo bomba de calor no requieren de una tubería hidráulica. Y aunque en el caso de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central requieren de una pequeña tubería de agua para alimentar el humidificador, el flujo del agua depende de la columna de presión de los tanques de almacenamiento de agua del edificio y no requieren de bombas centrífugas.

En el séptimo paso los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia) de tipo bomba de calor no utilizan ductos, por lo que no es necesario diseñar sistemas de distribución

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

de aire. En el caso de que se opte por utilizar sistemas activos (HVAC de alta eficiencia) de tipo central se consideró que los sistemas tengan una caja plenum para suministrar el aire caliente sin necesidad de conductos de aire.

En el octavo paso se diseñaron para los sistemas con bomba de calor tuberías de descarga y succión de refrigerante con una caída de presión en el recorrido principal y secundario de 20 kPa, la velocidad fue estimada en 3 m/s para la tubería de descarga de refrigerante y 6 m/s en la tubería de retorno.

El noveno paso no se utiliza ni en el sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética) con bomba de calor ni en el sistema de tipo central ya que no cuentan con sistemas de distribución de aire.

Para el décimo paso cada unidad interior de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo bomba de calor tendrán un sensor de temperatura. De igual manera cada sistema de (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central solo tendrá un control de temperatura por sistema.

En el décimo primer paso los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) no tienen actuadores. Para el caso de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central no se consideraron las válvulas solenoides de 2 vías.

Capacidad, tiempo de operación y consumo energético

Capacidad de calentamiento y enfriamiento

En el décimo segundo paso y de acuerdo con la tabla 4.9 las pérdidas de calor calculadas del edificio (-1 233,073.28 W a las 7:00 h) se seleccionaron 11 sistemas VRV de Mitsubishi electric (2015a) que suministraran una capacidad total de calentamiento de 1,291.29 kW y una capacidad total de enfriamiento de 1,147.85 kW para todo el edificio.

En la tabla 4.12 se presentan las especificaciones eléctricas y mecánicas de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) y en la figura 4.12 se muestra un ejemplo del arreglo que tendría un sistema.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.12 Especificaciones técnicas del sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética) tipo bomba de calor y fuente el aire.

Especificaciones de la unidad exterior	
Capacidad de enfriamiento (kW)	104.35
Capacidad de calentamiento (kW)	117.39
COP _{BC}	3.22
EER	12
SEER	17.2
Voltaje (V)	208
Demanda eléctrica en calefacción (kW) con tecnología de inversor	36.59
Conexión en línea de líquido del refrigerante (mm)	19
Conexión en línea de gas del refrigerante (mm)	41.27
Número de unidades interiores conectables	50 al 130 % de la capacidad de la unidad exterior
Controlador (kW)	0.157
Especificaciones técnicas de cada unidad interior	
Capacidad de calentamiento (kW)	4.93
Demanda eléctrica del ventilador interior en calefacción(kW)	0.03
Demanda eléctrica del sensor de cuarto (termostato) (W)	0.023

Fuente: Mitsubishi electric (2015a)

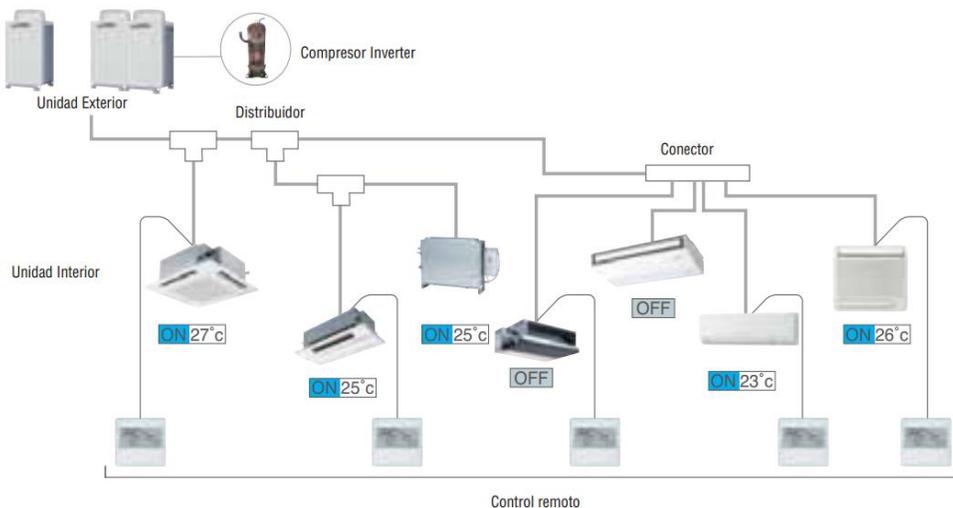


Figura 4.12 Arreglo de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) tipo bomba de calor y fuente el aire.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Si se selecciona la segunda opción que es con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central que demandan electricidad y gas L.P solo se podrá calentar un piso del edificio. Por lo que se necesitaran 44 sistemas con capacidad de 28.72 kW para climatizar todo el edificio y proporcionar ganancias de calor totales por 1,263.68 kW. En la tabla 4.13 se muestran las especificaciones técnicas de estos sistemas.

Tabla 4.13 Especificaciones técnicas del sistema activo (HVAC de alta eficiencia energética) que demanda electricidad y gas L.P.

Especificaciones	Valor
Capacidad de calentamiento (kW)	28.72
A.F.U.E. (%)	96
Demanda eléctrica del ventilador (W)	559
Máxima caída de presión estática (kPa)	0.249
Flujo volumétrico de aire en calentamiento (L/s)	807
Flujo volumétrico de aire en ventilación (L/s)	826
Voltaje (V)	115
Frecuencia (Hz)	60
Diámetro de conexión del gas (mm)	13
Demanda de gas propano (kg/h)	2.075

Fuente: RHEEM (2013)

En el décimo tercer paso se calculó el tiempo estacional o anual que operarán los sistemas. Como los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) deberán climatizar de las 20:00 h a las 7:00 h (11 horas) que de acuerdo con el diagrama de isorrequerimientos de la figura 4.3 es el tiempo en que permanecerá ocupado el edificio y con lo sugerido en el apartado 3.3.1 para sistemas que solo calientan se estimó que solo operarán una tercera parte de las 11 horas, es decir, 4 horas. Se consideró el periodo de invierno por ser la estación del año con menos horas de confort (178 horas) de acuerdo con el diagrama de isorrequerimientos de la sección 4.1.3 (análisis de los requerimientos de climatización). Por lo que tomando en cuenta que los sistemas solo operarán 4 horas diarias durante 91 días de la estación invernal se tiene un total de 364 h/Estacionales.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

En el décimo cuarto paso se cálculo el consumo de electricidad estacional. Por cada unidad exterior se tiene una capacidad en calentamiento de 117.39 kW y once unidades exteriores incrementarían la capacidad de calentamiento del sistema hasta 1,291.29 kW, suficientes para cubrir los -1 233,073.28 W que requiere el edificio. Si se consideraran 23 unidades interiores conectadas a cada unidad exterior se tendrían 275 unidades interiores. Si cada unidad interior puede proporcionar una velocidad de ganancias de calor de 4.93 kW entonces la capacidad de calentamiento de todas las unidades interiores ascendería a 1,247.29 kW. En la tabla 4.14 se resume la capacidad de calentamiento y la demanda eléctrica de las 11 unidades exteriores y las 253 unidades interiores.

Tabla 4.14 Demanda eléctrica de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) (kW).

11 unidades exteriores	
Capacidad de calentamiento (kW)	1,291.29
Demanda eléctrica en calefacción (kW)	402.49
253 unidades interiores	
Capacidad de calentamiento (kW)	1,247.29
Consumo eléctrico del ventilador interior (kW)	7.59
Sensor de cuarto (termostato) (kW)	5.82
11 controladores (kW)	1.73
Demanda eléctrica de las unidades interiores (kW)	15.14
Demanda eléctrica total de los 11 sistemas de ahorro de energía (kW)	417.63

Fuente: Mitsubishi electric (2015a)

Con los datos de la tabla anterior el consumo que se tendrá en el edificio si este fuera climatizado con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo bomba de calor y fuente el aire sería de 152.02 MWh/estacionales, es decir, 417.63 kW de los 11 sistemas que climatizaran el edificio multiplicado por 364 h/Estacionales de operación en la estación invernal.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Y si fuera climatizado con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central que demandan electricidad y gas L.P el consumo estimado sería de 8,952.94 kWh/ estacionales que se obtienen de multiplicar 0.559 kW por 44 sistemas y lo que resulte por 364 h/ estacionales.

Para estimar el consumo de gas L.P de un sistema, en kg, CEPESA (2001) propone dividir la capacidad de calentamiento, en J/h, entre el poder calorífico superior del gas propano (49 825,300 J/kg). Este valor para el caso de estudio es de 2.075 kg/h que deberá ser multiplicado por el número total de sistemas a utilizar en el edificio (44 sistemas) y el número de horas de operación durante el periodo invernal (364 h). Esta multiplicación dará por resultado un valor de 33,233.20 kg/estacionales de gas L.P.

Paso hacia la tercera etapa de climatización

Se procederá a la siguiente etapa de climatización del edificio con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) por las siguientes razones:

1. El edificio sigue siendo climatizado con los sistemas pasivos que combinan el muro Trombe y el aislamiento térmico transparente lleno de dióxido de carbono entre las 12:00 h y las 17:00 h.
2. Si el edificio es climatizado en el horario que los sistemas pasivos no climatizan el edificio los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo bomba de calor consumirán según lo estimado en la sección anterior 152.02 MWh/Estacionales (consumo de electricidad calculado para 11 unidades exteriores y 253 unidades que operen en el interior del edificio). Si se utilizarán 44 sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que demandan electricidad y gas L.P. se consumirían 8,952.94 kWh/Estacionales de electricidad y 33,233.20 kg/Estacionales de gas L.P. Por lo que para evitar el uso de estos combustibles fósiles se deberán utilizar sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).
3. Para climatizar el edificio en el horario de las 20:00 h y las 7:00 h del día siguiente que es cuando está ocupado, los sistemas pasivos no lo climatizan y no se deseen utilizar sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que demanden electricidad o electricidad y gas L.P.

4.3 Climatización con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables)

4.3.1 Pérdidas de calor del edificio

El primer paso de la climatización del edificio con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) consistió en determinar las pérdidas de calor. Para ello se tomaron como referencia las pérdidas de calor estimadas en la tabla 4.9 del apartado 4.1.6 (evaluación térmica) sin sistemas pasivos de climatización.

4.3.2 Selección del SEER y COP

Se seleccionaron sistemas con bomba de calor con SEER igual a 14 y el Coeficiente de Funcionamiento en el modo de calentamiento de 7.5. El sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) es el tipo VRV.

4.3.3 Selección de la capacidad de enfriamiento y calentamiento

El segundo paso del método consistió en seleccionar la capacidad de calentamiento del sistema. Con las pérdidas del edificio descritas en el párrafo anterior la capacidad de calentamiento del sistema deberá no ser menor a 28.1 kW, capacidad de calentamiento que se obtiene de dividir las pérdidas de calor a las 7:00 h entre los 44 pisos del edificio (1 233,073.28/ 44 pisos).

4.3.4 Selección del sistema por tecnología

En este apartado se seleccionaron los siguientes sistemas sobre las demás alternativas por las siguientes razones:

1. Si la temperatura del aire exterior en donde se encuentra el edificio cae por debajo de 0 °C, su eficiencia no cae como en el caso de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo bomba de calor (Cengel y Boles, 2003).
2. Estos sistemas solo requieren de un serpentín enterrado a una profundidad máxima de 2 m.
3. De acuerdo con las especificaciones técnicas presentadas en la tabla 4.15 las bombas de calor con energía geotermia de baja temperatura y circuito cerrado y alimentadas eléctricamente con sistemas fotovoltaicos tienen un coeficiente de funcionamiento en el modo de enfriamiento igual a 6, coeficiente superior al que tiene los chillers por absorción de circuito cerrado y abierto y a las bombas de calor y geotermia con serpentín abierto (Stuart et al., 2013). Tienen un coeficiente de funcionamiento en el modo de calentamiento igual a 4.4

que esta solo por debajo de las bombas de calor con fuente la tierra y serpentín abierto, esto cuando son asistidos por energía solar fotovoltaica (Chua et al., 2010).

4. Estos sistemas no requieren de estudios especializados de los mantos acuíferos, de las propiedades hidrogeológicas, de la dirección del flujo agua-tierra, del gradiente hidráulico, de las propiedades hidrodinámicas (transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenaje y dispersividad) como en el caso de sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energía geotérmica) tipo bomba de calor con fuente la tierra y serpentín abierto (Lo Russo y Civita, 2009).
5. Pueden climatizar el edificio por medio del enfriamiento si a si se requiriera en algun horario en el año. A diferencia de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central, esto solo disponen de ventilación mecánica para el enfriamiento del edificio y no de enfriamiento por ciclo de compresión de vapor.
6. No requieren de grandes equipos auxiliares que puedan incrementar el consumo energético del edificio como son torres de enfriamiento, grandes bombas centrífugas como en el caso de los chiller por absorción de circuito abierto.
7. La selección también se sustentó en las especificaciones técnicas de los coeficientes de operación y capacidades de diversos sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) mostrados en la tabla 4.15.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.15 COP y capacidad de climatización de diferentes sistemas híbridos (kW).

Sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables)	COP	Capacidad de enfriamiento	Capacidad de calentamiento
Chiller por absorción que usa agua y silica gel como líquidos absorbentes	$CDF_{solar}=0.3-0.50^5$	$5-10^5$	Sin calentamiento
Chiller por absorción que usa agua-amoniaco como solución absorbente	$CDF_{solar}=0.4^5$	$1.5-17^5$	Sin calentamiento
Chiller por absorción con desecante líquido (agua-LiCl)	$CDF_{solar}=5.42^{14}$	$3-16^5$	Sin calentamiento
Chiller por absorción con desecante sólido ⁵ (LiCl o silica gel)	$CDF_{solar}=1.1^5$	11^5	Sin calentamiento
Chiller por absorción que usa agua-bromuro de litio como sustancia absorbente	De un solo efecto $CDF_{solar}=0.6-0.7^5$ $CDF_{BC}=0.86-0.92^7$ De doble efecto ¹² $CDF_{solar}=1.1-1.4$	Para un solo efecto ⁷ $15-2 \times 10^4$ Para doble efecto ¹³ $175-1400$	Para un solo efecto ⁷ $58-4.4 \times 10^3$
Bomba de calor con geotermia y serpentín abierto	$CDF_{AA}=3.5-5.0^6$ $CDF_{BC}=4.76^{15}$	$2.31^{10}-59.13^{11}$	$1.65^{10}-50.03^{11}$
Bomba de calor con geotermia de baja temperatura, con serpentín cerrado ⁶ y asistida por energía solar ⁸	$CDF_{AA}=3.0-6.0^9$ $CDF_{BC}=1.3-4.4^8$	$2.31^{10}-59.13^{11}$	$1.65^{10}-50.03^{11}$

Fuentes: ⁵Wang et al. (2009b), ⁶Mustafa (2008b), ⁷Riffat y Qiu (2004), ⁸Chua et al. (2010) y ⁹Stuart et al. (2013) y ¹⁰TRANE (2015b), ¹¹TRANE (2015c), ¹²Eicker y Pietruschka (2009), ¹³Mateus y Oliveira (2009), ¹⁴Tan y Liu (2010) citado por Yin et al. (2014) y ¹⁵Lo Russo y Civita (2009).

Cabe señalar que los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energía solar) representados en la tabla anterior usan diferentes tipos de colectores solares (Wang et al., 2009b).

- Como se puede observar en la tabla 4.14, aunque el sistema híbrido (HVAC sostenido con energía solar y con sistema de refrigeración por absorción y desecante líquido (agua-LiCl)) tiene el segundo coeficiente de funcionamiento más alto ($CDF=5.42$) este no fue seleccionado ya

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

que no cuenta con un sistema de calentamiento, por lo que se tendría que usar en conjunto con un sistema de bomba de calor y serpentín abierto.

Componentes del sistema híbrido (HVAC sostenidos con energías renovables)

Los principales componentes mecánicos y eléctricos que componen el sistema son:

1. Sistema de refrigeración mecánica con bomba de calor
2. Serpentín de politereftalato de etileno reforzado con una capa de aluminio tipo horizontal cerrado
3. Inversor de corriente
4. Sistema de aspersion
5. Bomba de agua
6. Paneles fotovoltaicos
7. Cubierta de ETFE
8. Tablero eléctrico principal y sensor de temperatura
9. Depósito de arena

En la figura 4.13 se muestra el arreglo general del sistema.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA TEMPLADO-CIUDAD DE MÉXICO

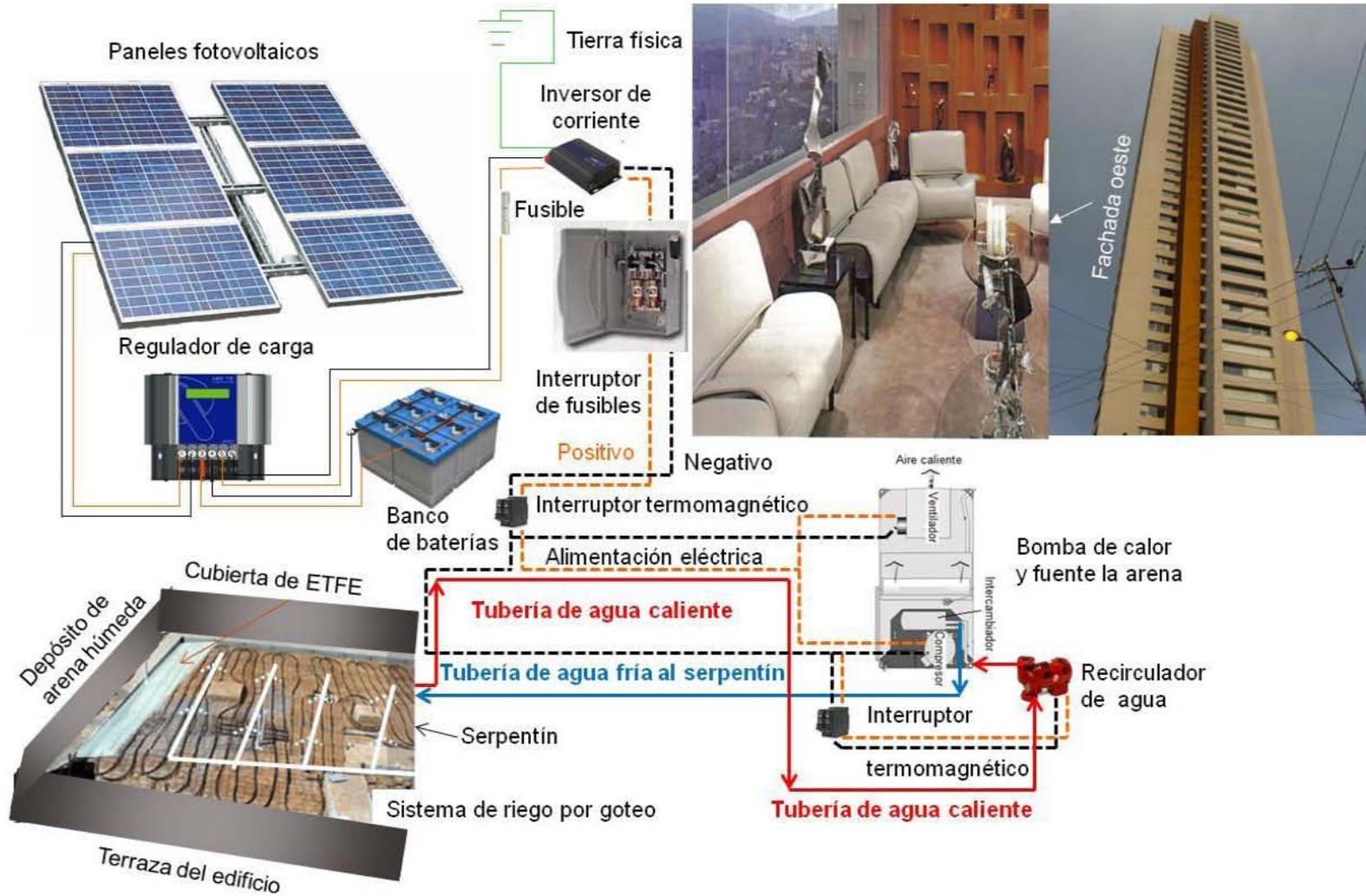


Figura 4.13. Arreglo del sistema híbrido de tipo bomba de calor y fuente la arena.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

El sistema operará en el caso de estudio de la siguiente forma:

Al inicio del serpentín enterrado en el talud de arena circulará agua fría y al final agua caliente. El talud de arena estará cubierto con plástico ETFE de alta resistencia al viento y al calor del sol con lo que se evitara que la arena se vuele con las corrientes del viento que se tienen en el edificio. Para mantener húmeda la arena se dispondrá de un sistema de aspersión y para controlar el encendido y paro del sistema se dispondrá de un sensor de temperatura.

Tanto el compresor como el motor eléctrico de la bomba de agua y el ventilador interior serán alimentados por la electricidad proveniente de los paneles fotovoltaicos. El sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) en su modo de calentamiento tomará el calor de la fuente que es el depósito de arena y lo transmitirá al refrigerante que circula por el intercambiador de calor. Finalmente, este calor será transmitido del refrigerante al aire interior del edificio a través de un serpentín.

Una vez que se ha seleccionado la bomba de calor y fuente la arena como sistema híbrido (HVAC sostenidos con energías renovables) y continuando con el procedimiento descrito en el apartado 3.4.4 (selección por tecnología) se describen los siguientes parámetros importantes dentro del proceso de selección por tecnología. De acuerdo con las especificaciones técnicas presentadas en la tabla 4.16 el sistema con bomba de calor tiene un SEER de 14, un EER de 22.5 y un coeficiente de funcionamiento en el modo de calentamiento de 7.5.

Selección de la demanda eléctrica del compresor, ventilador y bomba centrífuga

Para completar la selección del sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables), TRANE (2011) sugiere que un sistema de bomba de calor que proporciona 28.15 kW para enfriar y 37.45 kW puede climatizar un solo piso del edificio. La tabla 4.16 muestra un resumen de los detalles técnicos más importantes del sistema seleccionado. Aquí se puede observar que la demanda de electricidad del compresor y ventilador asciende a 6 kW y la bomba centrífuga es de 1.09 kW.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.16 Especificaciones mecánicas y eléctricas de la bomba de calor y fuente la arena

Descripción	Cantidad	Unidad
Capacidad en el modo de enfriamiento	28.15	kW
Capacidad en el modo de calentamiento	37.45	kW
Demanda eléctrica del compresor y ventilador interior	6	kW
Demanda eléctrica de la bomba de agua	1.09	kW
SEER	14	
EER	22.5	
Coefficiente de Funcionamiento en el modo de calefacción	7.5	
Temperatura del agua que entrará al intercambiador de calor y el serpentín evaporador	21.1	°C
Temperatura del agua que saldrá del intercambiador de calor y el serpentín evaporador	15.5	°C
Flujo volumétrico del agua que deberá circular dentro del serpentín	1.45×10^{-3}	m ³ /s
Flujo volumétrico del aire de suministro al interior del edificio	5,667.32	m ³ /h
Temperatura del aire de retorno	15	°C
Tipo de refrigerante	R410A	
Perdida de presión en los serpentines condensador y evaporador	1.40	m.c.de H ₂ O

Fuente: TRANE (2011)

Estudio analítico de la temperatura de la arena

Para simular el comportamiento de la temperatura se usó el modelo matemático derivado en el apéndice A con una profundidad de 0 m, 0.05 m, 0.10 m y 0.15 m, en una muestra de 1 L de arena con tamaño de grano de 1.18 mm para los 91 días del período invernal. La figura 4.14 muestra una comparación del perfil de temperaturas de la arena y el modelo matemático derivado del 12 de marzo al 16 de marzo del 2016.

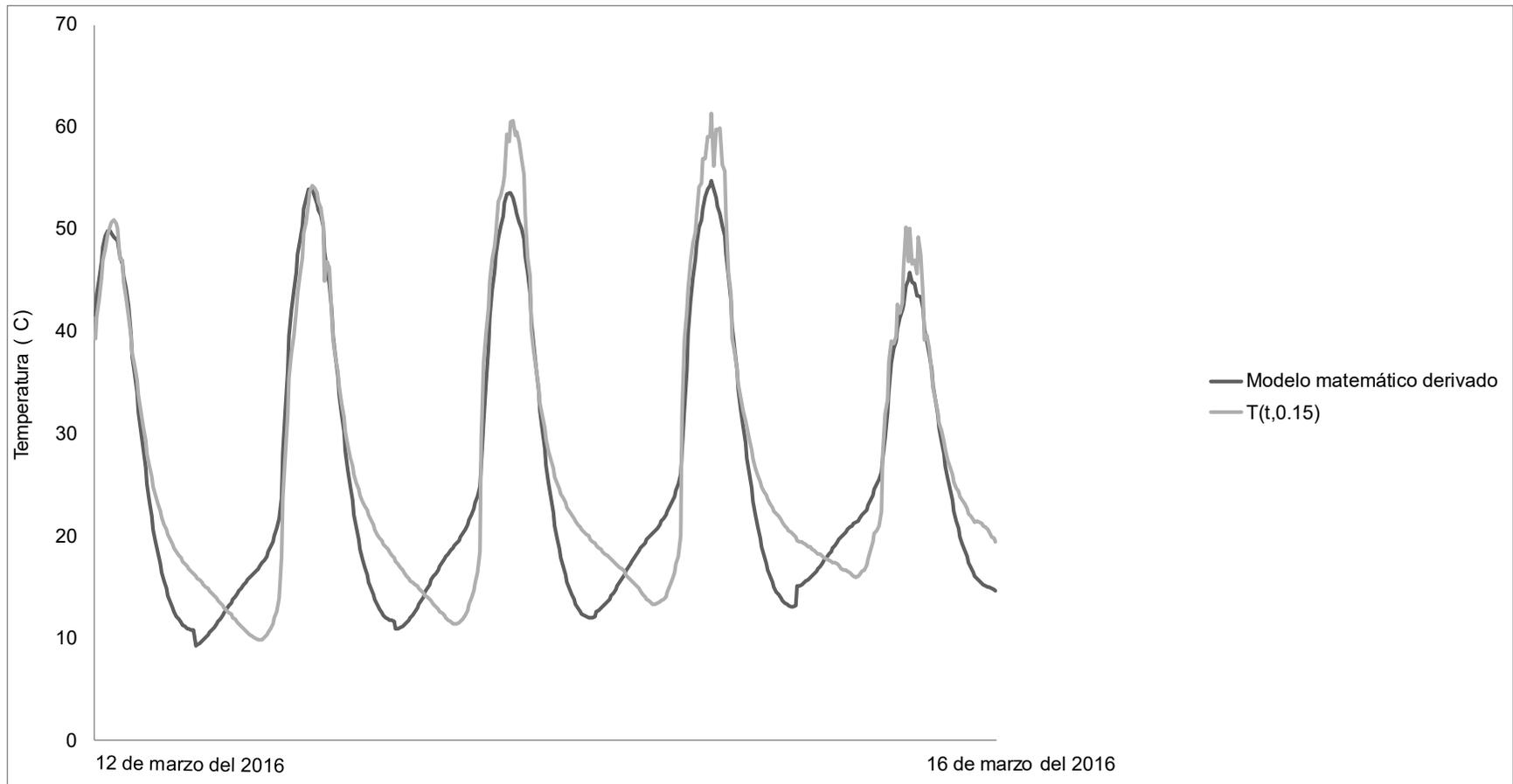


Figura 4.14. Comparativo entre las curvas del perfil de temperatura de la arena con tamaño de grano de 1.18 mm y el modelo matemático derivado.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Cálculo de la conductividad térmica de la arena

Con los datos de la masa de agua y de la arena seca de la tabla 2 y la ecuación 49 de anexo A se estimó el calor específico de la mezcla arena-agua que fue de 635.23 J/kg °C.

La figura 4.15 muestra las temperaturas de la curva de enfriamiento de la arena para el día 22 de diciembre del 2011. Esto fue necesario para poder calcular el coeficiente de conductividad térmica de la arena.

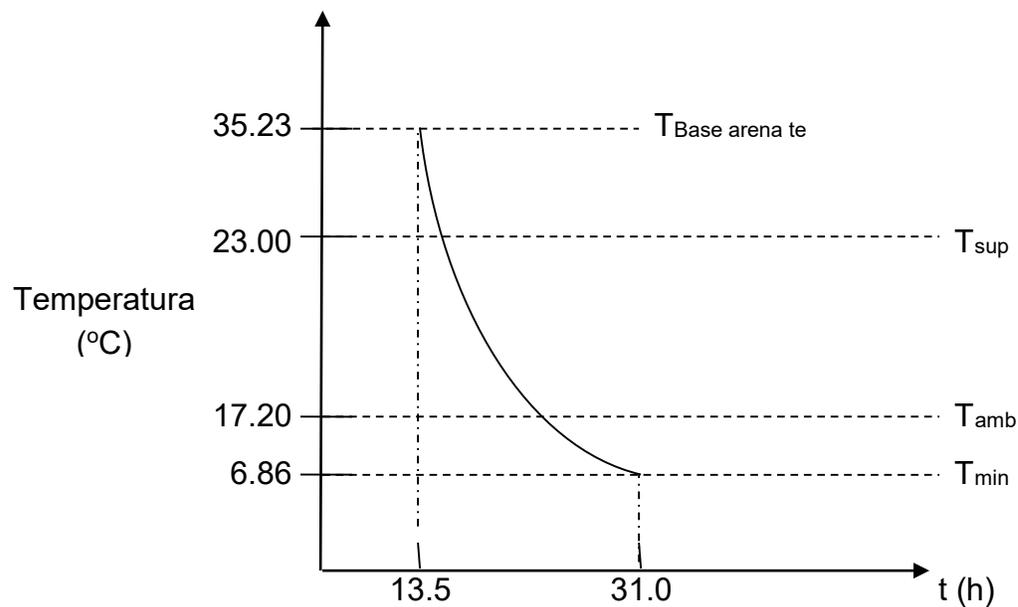


Figura 4.15. Curva de enfriamiento en la base de la muestra para el 22 de diciembre de 2011.

Con las temperaturas de la superficie, ambiente y de la base de la arena de la figura 50.65°C, el valor de 259.43 J/°C ($\sum m_{mezcla} C E_{mezcla}$), un área de la muestra de arena de $3.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, un tiempo de 63,000 s, una profundidad de 2 m y con la ecuación 55 del anexo A se calculó el coeficiente convectivo de transferencia de calor (-1.80 W/m² °C).

Con este coeficiente convectivo, los valores de temperatura anteriores y la ecuación 53 se obtuvo el coeficiente de conductividad térmica de 1.73 W/m °C.

Se simuló el comportamiento de la conductividad térmica con la ecuación 52 para el día en que se registró una temperatura de 50.65 °C (26 de febrero del 2012 a las 15:15 h) y variando la profundidad de 0.065 m hasta 2.00 m en intervalos de 0.5 m comenzando con 0.065 m que fue la profundidad de una muestra contenida en un

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

vaso de precipitado hasta un valor máximo de 2 m, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.17.

Tabla 4.17 Coeficientes de conductividad térmica de la arena (k_{arena}) a diferentes profundidades¹⁶

Prof. (m)	k_{arena} (W/m °C)
0.065	0.06
0.50	0.43
1.00	0.90
1.50	1.30
2.00	1.73

$${}^{16}m_{\text{mezcla}}C_{p_{\text{mezcla}}} = 259.43 \text{ J/}^{\circ}\text{C}, T_{\text{Base arena}} = 50.64 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_{\text{amb}} = 17.80 \text{ }^{\circ}\text{C}, \\ T_{\text{min}} = 7.24 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_{\text{sup}} = 28.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ y } t = 55,400 \text{ s } \rho_{\text{arena}} = 1,630 \text{ kg/m}^3$$

De acuerdo con los dos valores de conductividad obtenidos para los dos días se puede realizar el siguiente análisis:

- El coeficiente de conductividad térmica puede ser estimado con la ecuación 52 del anexo A
- Se puede tomar como coeficiente de conductividad térmica 1.72 W/m °C como valor medio de las dos estimaciones

Estudio experimental de la temperatura, humedad y tamaño de grano de la arena

En el estudio experimental de la fuente de calor que es el talud de arena del sistema HVAC asistido por energías renovables se estudio el comportamiento del perfil de temperaturas en el periodo de invierno del 20 de diciembre de 2011 al 20 de marzo del 2012. También se tomarón lecturas del 12 de marzo del 2016 al 30 de noviembre del 2016 en una muestra de arena. El 26 de febrero del 2012 a la 15:15 h se midió una temperatura máxima de 50.64 °C mientras que para el año 2016 la máxima temperatura alcanzada por la arena fue de 61.35 °C medida a las 13:45 h del mes de marzo. En esta segunda medición se utilizó un vaso de precipitados de 1 L de volumen que contenía 1,475 kg de arena seca y 275 mL de agua. El estudio del periodo invernal se muestra en el anexo A. El contenido de agua y tamaño de grano estimado para la primera muestra fue de 28.79 % y 600 μm y para la segunda muestra fue de 1.18 mm. El contenido de humedad de la primera muestra se estimó con la ecuación 55 del anexo A. El tamaño de grano fue determinado mediante el

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

análisis granulométrico de las muestras de arena. En el anexo A se describe el proceso de análisis granulométrico para la primera muestra.

El modelo matemático y las temperaturas mostradas en la figura 4.12 presentan un perfil de temperaturas de la arena en el día por encima de los 10 °C, lo que favorece la captación de calor del serpentín, ya que a mayor temperatura de la fuente de calor mayor será la cantidad que pueda captar el serpentín enterrado. Una vez que se realizaron los estudios experimentales y analíticos se procedió con el diseño del serpentín que será enterrado en la arena. Este diseño estuvo enfocado principalmente en determinar el diámetro y longitud del serpentín ya que estos parámetros influyen en el aumento o disminución de la demanda energética del sistema de bombeo que hace circular el agua.

Diseño del serpentín

Empleando las ecuaciones 56, 57, 58 y 59 del anexo A y con el caudal de $1.45 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ valor tomado de la tabla 4.15 se obtuvo un diámetro de 50 mm y una longitud de 180 m para una velocidad de entrada del agua en el serpentín de 0.74 m/s. El número de Reynolds se calculó en 34,480 para ello se utilizó la ecuación 58 tomando en cuenta las siguientes propiedades físicas del agua a una temperatura promedio de 18.30 °C:

- $\mu = 1.21 \times 10^{-3} \text{ kg/m s}$,
- $\rho_f = 998.27 \text{ kg/m}^3$
- y $k_{\text{agua}} = 0.589 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$

La temperatura de 18.30 °C se calculó con las temperaturas de la tabla 4.15, que indican que la temperatura del agua de entrada al serpentín debe de ser de 15.5 °C y la temperatura de salida de 21.1 °C. En la tabla 4.18 se muestran las dimensiones de diámetro y longitud del serpentín además de otros valores que fueron necesarios tomar en consideración para el cálculo.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.18 Variables físicas y dimensiones del serpentín.

Variables físicas y dimensiones	Cantidad	Unidad
Gasto del agua	1.45×10^{-3}	m ³ /s
Velocidad estimada del agua	0.74	m/s
S	2.01	Adimensional
Número de vueltas	45	Adimensional
Longitud característica por vuelta	4	m
Separación entre cada vuelta	0.15	m
k_arena	1.72	W/m °C
Profundidad a la cual se debe enterrar el serpentín	0.20	m
Temperatura de la arena a la profundidad de 2 m	50.65	°C
Temperatura de la superficie de arena	49.10	°C
Tiempo en que gana calor	55	s
Diámetro interior del serpentín	50	mm
Longitud total del serpentín	180	m
Ganancias de calor	362.76	W

Fuente: Elaboración propia

Con estos valores se estimaron las ganancias de calor que ascendieron en 363 W en 55 s por lo que en 1 h y 11 min se suministrarán 28 kW a la bomba de calor a través del serpentín. Con las dimensiones de 4 m de longitud y una separación de 0.15 m por vuelta del serpentín mostradas en la tabla 4.18 se propuso que el edificio cuente con terrazas en cada piso en donde sea depositada la arena. Las dimensiones pueden ser de 4 m de longitud por 4 m de ancho y 2 m de profundidad para que se pueda enterrar el serpentín.

El horario de operación del sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) fue el mismo que para los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética), es decir, de las 20:00 h a las 7:00 h del otro día.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Cálculo de la demanda eléctrica del sistema de bombeo

Con las dimensiones del diámetro y longitud del serpentín y una hoja de cálculo de elaboración propia se calcularon 42.94 W como potencia teórica de la bomba. Los valores utilizados para el cálculo de esta potencia son mostrados en la tabla 4.19.

Tabla 4.19 Potencia eléctrica de la bomba.

Variables físicas y dimensiones	Cantidad	Unidad
Gasto	5.22	m ³ /h
Pérdidas por fricción estáticas y dinámicas en el serpentín	0.64	m. c. H ₂ O
Pérdidas por fricción estáticas y dinámicas en los serpentines condensador y evaporador	1.40	m. c. H ₂ O
Altura de carga total de la bomba	2.04	m. c. H ₂ O
Densidad del agua	998.27	kg/m ³
Aceleración de la gravedad	9.81	m/s ²
Eficiencia de la bomba	60	%
Potencia eléctrica de la bomba ¹⁷	62.17	W

Fuente: Elaboración propia y ¹⁷Bell and Gossett (2015)

TRANE (2011) indicó que el sistema con bomba de calor trae conectada de fábrica una bomba de agua centrífuga cuya demanda eléctrica es de 1,088 W por lo que puede ser utilizada una bomba de tipo comercial de 62.17 W de acuerdo con el gasto y altura de carga total presentados en la tabla 4.18.

En resumen, el sistema con bomba de calor sostenida con energías renovables demandará 6,000 W y 62.17 W de la bomba de agua darán un valor total de 6,062.17 W. De acuerdo con Honeywell (2009) un termostato de cuarto demandará 23 W para controlar la temperatura de cada sistema con bomba de calor. Lo que sumado a la demanda eléctrica del sistema dará un total de 6,085.17 W por sistema. Si esta demanda eléctrica es multiplicada por 44 sistemas que climatizarán todo el edificio y que operarán 364 h/estacionales se tendrá un consumo eléctrico de 97.46 MWh.

El siguiente paso de esta etapa fue calcular y seleccionar el sistema fotovoltaico y banco de baterías, para ello se siguió el siguiente procedimiento:

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

4.3.5 Cálculo de la capacidad de generación de electricidad

Cálculo y selección del sistema fotovoltaico

De acuerdo con paso 13 del apartado 3.3.1 se consideró que el sistema operará 4 h de las 11 h (de 20:00 h a 7:00 h del día siguiente). El horario de las 20:00 h a las 0:00 h y de las 0:00 h hasta las 7:00 h es el tiempo que se supuso que el sistema permanecería aislado del suministro de energía eléctrica local (11 horas en total). No se considero el horario de las 7:00 h hasta las 12:00 h porque de acuerdo con el diagrama de isorequerimientos de la figura 4.3 el edificio está desocupado. En la tabla 4.20 se muestra el consumo de energía eléctrica estacional estimada para un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) cuando climatiza un piso.

Tabla 4.20 Consumo estimado de energía eléctrica estacional de un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables), kWh/Estacional.

Época del año	Invierno		
	Potencia (W)	Tiempo de utilización (h/día)	Consumo diario (Wh/día)
Compresor y ventilador interior ¹⁸	6,000	4	24,000
Bomba de agua ¹⁹	62.17	4	248.68
Termostato ²⁰	23	4	92.00
Consumo total en corriente alterna(Wh/día)			24,340.68
Eficiencia del inversor ²¹			96.20%
Consumo total con pérdidas (Wh/día)			25,302.16

Fuentes: ¹⁸TRANE (2011), ¹⁹Bell and Gosset (2015), ²⁰Honeywell (2009) y ²¹Fronius (2013)

El Consumo Eléctrico Total Diario (CETD) se incrementará en un 10% por concepto del factor de seguridad. Es decir, 25,302.16 Wh/ día más 2,530.22 kWh/ día dará como resultado 27,832.38 Wh/ día.

Ahora se dividirá el CETD entre la irradiación global/diaria para conocer el mes menos favorable. Esto se presenta en la tabla 4.21.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.21 Cálculo del mes menos favorable.

Concepto	Enero	Febrero	Marzo	Diciembre
Irradiación global (kW/m ² día)	4.44	4.72	5.56	4.17
CETD (Wh/ día)	27,832.38	27,832.38	27,832.38	27,832.38
CETD/Irrad. Global (Wh m ² /kW)	6,268.55	5,896.69	5,005.82	6,674.43

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla 4.20 el menos favorable fue el mes de diciembre con 6,674.43 Whm²/kW. Posteriormente se seleccionó un módulo de silicio policristalino rodeado por capas ultra delgadas de silicio amorfo y que tiene una eficiencia del 15.6 %. La tabla 4.22 resume las especificaciones técnicas del panel.

Tabla 4.22 Especificaciones eléctricas del módulo fotovoltaico

Especificación	Valor
La potencia total (W)	300
El voltaje máximo, (V)	36.10
La corriente máxima (A)	8.31
La corriente en corto circuito (A)	8.85
Voltaje en circuito abierto (V)	44.70
Dimensiones en cm	195.40 x 98.20 x 4.50

Fuente: Catálogo solar (2015)

Ahora bien, el número de módulos se obtuvo de dividir el resultado del mes menos favorable entre la potencia del panel seleccionado.

$$(6,674.43) / (300 \text{ W}) = 23 \text{ módulos}$$

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

El número de módulos en serie que se pueden conectar se obtiene dividiendo el voltaje del módulo entre el voltaje del sistema (24 V para sistemas de más de 3,000 W).

$$(36.10 \text{ V}/24 \text{ V}) = 1.50$$

Por lo que son dos módulos en serie. El número de módulos en paralelo se obtiene dividiendo el número total de módulos entre el número de módulos en serie.

$$23 \text{ módulos}/ 2 \text{ módulos en serie} = 12 \text{ módulos en paralelo}$$

Es decir, se deben tener 11 ramales conectados en paralelo con 2 módulos por ramal conectados en serie y un último ramal en paralelo con un solo módulo. La potencia total del sistema es igual a:

$$\text{Potencia total (W)} = (23 \text{ módulos}) (300 \text{ W}) = 6,900 \text{ W}$$

En la tabla 4.23 se resumen las características técnicas del sistema fotovoltaico:

Tabla 4.23 Especificaciones eléctricas del sistema fotovoltaico

Especificación	
Potencia total del sistema fotovoltaico (W)	6,900
El voltaje máximo, (V)	72.20
La corriente máxima (A)	99.72
Corriente total de corto circuito (A)	106.20
Voltaje en circuito abierto (V)	89.40
Voltaje generación (V)	48

Fuente: Elaboración propia

La energía generada por cada sistema fotovoltaico para el mes de enero fue calculada de la siguiente manera:

$$\text{Energía neta generada (día)} = (6.90 \text{ kW}) (4.44 \text{ kWdía/m}^2) (0.962) = 29.47 \text{ kWh/ día}$$

El resultado se multiplica por 31 días del mes de enero.

$$(29.47 \text{ kWh/día}) (31 \text{ días del mes de enero}) = 913.57 \text{ kWh/mes}$$

La tabla 4.24 muestra la energía neta generada en cada piso en el periodo de invierno.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Tabla 4.24 Cálculo de la energía generada estacionalmente para un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) que climatizará un piso del edificio.

Concepto	Enero (31 días)	Febrero (29 días)	Marzo (20 días)	Diciembre (11 días)
Energía generada (kWh/ mes)	913.57	908.58	738.12	304.48
TOTAL				2,864.75 kWh/Estacional

Fuente: Elaboración propia

La energía que será necesario generar para todo el edificio en la estación de invierno es de 126.05 MWh/Estacional que se obtiene de multiplicar la energía generada para alimentar al sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) de un piso por 44 pisos que tiene el edificio. El sistema fotovoltaico abre la posibilidad de utilizar los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) si así se requiriera en el horario de desocupación del edificio, es decir, de 7:00 h a 12:00 h.

De acuerdo con los datos de las dimensiones presentados en la tabla 4.21 cada modulo fotovoltaico ocupa una superficie de 1.92 m² por lo que acomodándolos de forma inclinada se puede reducir la superficie de exposición a la radiación solar a 1.5 m². Como son 23 módulos y 44 pisos se necesitan 1,012 módulos, que ocuparán una superficie de 1,518 m². Por lo que se sugiere tener una superficie de esta magnitud contigua al edificio para colocarlos y suministrar la energía eléctrica a través de cables conductores y dentro del ducto central de instalaciones del edificio. Posteriormente se calculó el banco de baterías, sistema necesario para suministrar la energía eléctrica a los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) durante la noche.

Cálculo y selección del banco de baterías

Cálculo de la potencia máxima diaria

El cálculo de la potencia máxima diaria de un solo sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) es el siguiente:

$$E_{\text{pot max diaria}} = 4 \text{ h/diarias} \times 6,085.17 \text{ W} = 24,340.68 \text{ [Ahd]}$$

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Cálculo de la energía máxima de instalación

Para el cálculo de la potencia máxima de instalación se utilizó la ecuación (3.2)

$$E_{\text{inst_max}} = \frac{24,340.68[\text{Ahd}]}{220} = 110.64[\text{Ahd}]$$

Incremento por factor de seguridad

Al valor obtenido se incrementó en un 20%

$$E_{\text{max diaria}} = 1.2 \times 110.64 [\text{Ahd}] = 132.77 [\text{Ahd}]$$

Cálculo de las pérdidas totales

Las pérdidas totales fueron calculadas como se muestra a continuación:

$$K_T = 0.7 - (0.0058 \times 30 \text{ días}) = 0.526$$

Cálculo del consumo de energía máxima.

$$E_{\text{max}} = \frac{132.77[\text{Ahd}]}{0.526} = 252.41[\text{Ahd}]$$

Cálculo de la capacidad de la batería.

$$\frac{252.41[\text{Ahd}] \times 30 \text{ días}}{0.70} = 10,817.76[\text{Ah}]$$

Número de baterías conectadas en paralelo

Para este cálculo se tomó el valor propuesto por CONERMEX (2015) que es de 115 [Ah] y se sustituyó en la ecuación (3.7). Obteniéndose el siguiente resultado:

$$\text{Número}_{\text{Batería_paralelo}} = \frac{10,817.76 [\text{Ah}]}{115 [\text{Ah}]} = 95 \text{ baterías}$$

Considerando baterías a 100 horas de descarga.

Número de baterías conectadas en serie

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Para este cálculo se utilizó el valor de 48 V de la tabla 4.23 del voltaje que generan 2 módulos fotovoltaicos conectados en serie.

$$\text{NúmeroBatería_serie} = \frac{48 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 4 \text{ baterías}$$

Es decir, se pueden tener 23 ramales conectados en paralelo con 4 baterías conectadas en serie y un último ramal con 3 baterías conectadas en serie para hacer un total de 95 baterías y poner a funcionar un solo sistema que climatice un solo piso. Para 44 sistemas que suministrarán la energía necesaria para que funcionen todos los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) del edificio durante la noche y parte de la mañana se tendrán que utilizar 4,180 baterías con los arreglos de conexión en paralelo y serie.

Otra opción sería eliminar los bancos de baterías mediante el sistema de interconexión a la red eléctrica. En este sistema se utilizará el sistema de respaldo de la red eléctrica local, en el cual durante el día se generará electricidad, se consumirá por el edificio y el restante se venderá al suministrador, que para el caso de estudio será la Comisión Federal de Electricidad (CFE). En la noche se utilizará electricidad de CFE y al final del mes se evaluará la ganancia generada que deberá ser mayor que la demandada.

4.3.6 Evaluación energética de las etapas.

Los resultados alcanzados en cada etapa de climatización fueron los siguientes:

Con la primera etapa: Climatización del edificio con sistemas pasivos.

Con el método propuesto en el apartado 3.2.5 de la metodología (evaluación térmica) y el cálculo de las ganancias y pérdidas de calor de un sistema pasivo muro Trombe-aislamiento térmico transparente mostradas en la tabla 4.8 se logró climatizar el edificio entre las 12:00 h y las 17:00 h cubriendo las horas de ocupación del edificio entre las 15:00 h y las 16:00 h para los meses de diciembre, enero y febrero como se muestra en el diagrama de isorrequerimientos de la figura 4.3. Las ganancias y pérdidas de calor fueron estimadas con la hoja de cálculo mostrada en la figura 4.9 y que tomo en cuenta los datos descritos en el apartado 3.2.5. Como el edificio será calentado con sistemas pasivos no consumirá energía eléctrica y gas natural o L.P.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO: CLIMA SEMIFRÍO-CIUDAD DE MÉXICO

Con la primera y segunda etapas: Climatización con sistemas pasivos y activos (HVAC de alta eficiencia energética).

De acuerdo con las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 4.11 y lo descrito en el quinto paso del método del apartado 4.2.1 los 11 sistemas VRV seleccionados como primera opción pueden suministrar 1,291 kW de ganancias de calor a todo el edificio. Con lo que se logró climatizar el edificio entre las 20:00 h y las 7:00 h del día siguiente. Siguiendo con el método descrito en el apartado anterior en su séptimo paso los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) consumirán 152.02 MWh/estacionales en la época de invierno.

Si se selecciona la segunda opción que es con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central que demandan electricidad y gas L.P. se consumirán 8,952.94 kWh/estacionales y 33,233.20 kg de gas L.P/estacionales según el cálculo mostrado en el décimo cuarto párrafo del método descrito en el apartado 4.2.

Con la primera y tercera etapas: Climatización con sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

Con los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) de tipo bombas de calor y fuente la arena se evitó el uso de energías no renovables como la electricidad y el gas. Se calcularon sistemas fotovoltaicos que generan electricidad por 126.05 MWh/estacionales en 1,102 módulos conectados en ramales paralelo-serie. El banco de baterías calculado ascendió a 4,180 baterías con 100 horas de descarga conectadas en arreglos paralelo-serie. Con esto se evitó consumir los 152.02 MWh/estacionales de electricidad que demanda la primera opción que son los sistemas pasivos y activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo bomba de calor y fuente de calor el aire.

También se evita consumir 8,952.94 kWh/estacionales de electricidad y 33,233.20 kg/ estacionales de gas L.P. demandados por los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo central.

Con la primera y tercera etapas se logró la sustentabilidad energética en la climatización del edificio sin afectar el confort. En cada etapa de la metodología el consumo de energía del edificio fue disminuyendo hasta en estas etapas no se utilizan combustibles fósiles.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1 Comparativo entre los beneficios energéticos por la aplicación de la metodología y los sistemas activos (HVAC convencionales)

Descripción de los sistemas activos (HVAC convencionales) que solo demandan electricidad.

Dentro de los sistemas activos (HVAC convencionales) con los cuales es climatizado el edificio están los sistemas todo-agua de circuito cerrado. Las partes que componen estos sistemas son las siguientes:

1. La unidad central con bomba de calor para enfriamiento o calentamiento del agua
2. Las unidades interiores ventilador-serpentín
3. Tanque de expansión
4. Sistema de tuberías de agua helada o agua caliente
5. Válvulas solenoides de tres vías
6. Bomba centrífuga
7. Y termostátos.

En la figura 5.1 se muestran estas partes.

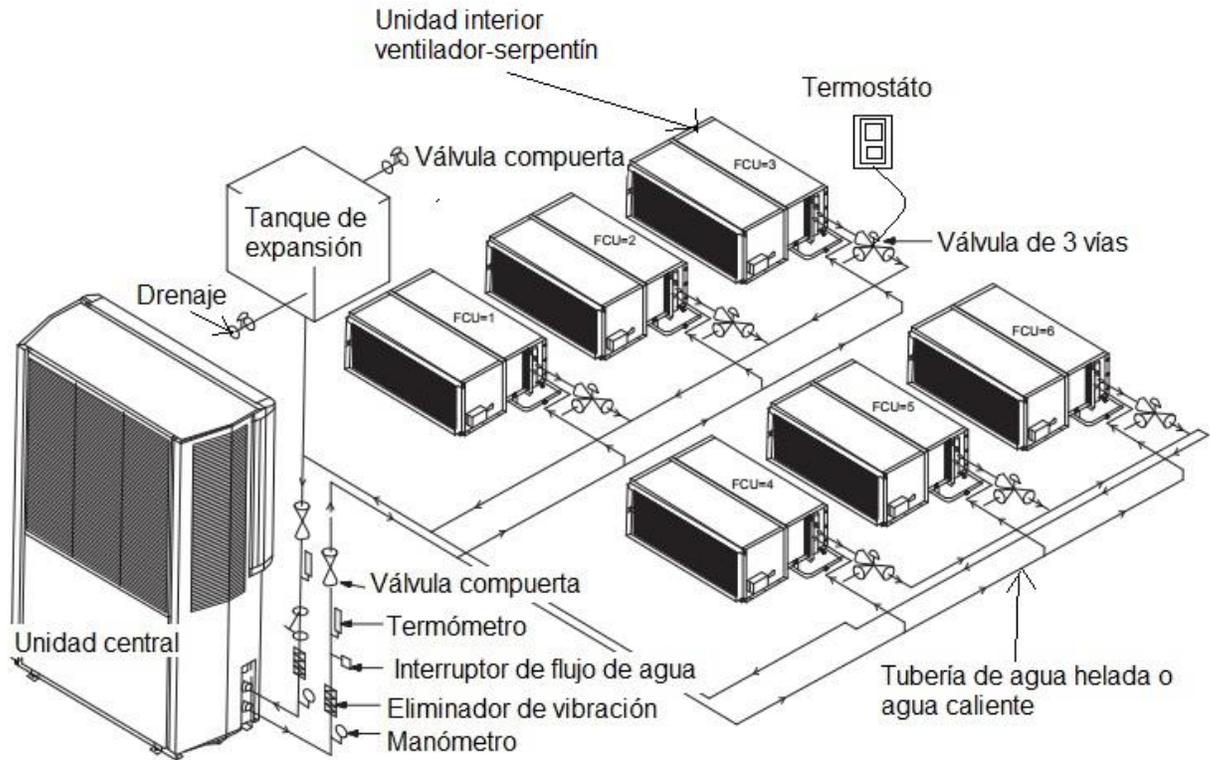


Figura 5.1. Sistema activo (HVAC convencional) con circuito de agua cerrado.

Funcionamiento

La unidad central o generadora de agua helada o caliente la envía a las unidades interiores de serpentín-ventilador por medio de una bomba centrífuga que viene instalada dentro del gabinete de la unidad central. Esta bomba de agua envía el agua fría o caliente a cada una de las unidades interiores ventilador-serpentin. Cuando se alcanza el confort el termostáto envía una señal eléctrica que hace que un actuador que forma parte de la válvula solenoide de tres vías cierre el paso de agua fría o caliente y esta sea enviada a la tubería de retorno de la unidad central. La bomba de recirculación de agua siempre esta funcionando, aunque el agua fría o caliente este depositada dentro de la unidad ventilador-serpentin sin circulación. Cada unidad ventilador-serpentin tiene un par de ventiladores centrífugos que forzan el paso del aire interior del piso del edificio entre las aletas y superficie exterior de los tubos del serpentín de cobre. Aquí se efectúa la transferencia de calor ente las paredes exteriores del tubo de cobre y el aire interior que es calentado

CAPÍTULO V. RESULTADOS

o enfriado y posteriormente enviado al interior de las habitaciones del piso del edificio.

Las especificaciones técnicas de los sistemas activos (HVAC convencionales) que demandarán solo electricidad son las siguientes:

Tabla 5.1 Especificaciones técnicas de los sistemas activos (HVAC convencionales) que solo demandan electricidad.

Características	Valor
Capacidad de enfriamiento (kW) ¹	30.90
Capacidad de calentamiento (kW) ¹	33.90
Demanda eléctrica del compresor (kW)	9.80
Demanda eléctrica del ventilador axial (kW)	0.60
Demanda eléctrica de la bomba de agua (kW)	1.27
Demanda eléctrica de cada unidad ventilador-serpentín(kW) ²	0.25
Demanda eléctrica de un sensor de temperatura(kW) ³	0.023
Demanda eléctrica de un actuador de válvula de 3 vías (kW) ⁴	0.54
Demanda eléctrica total del sistema con 5 ventiladores serpentín conectados cada hora (kW)	15.74

Fuente: ¹TRANE (2003), ²TRANE (1999), ³HONEYWELL (2009), ⁴ERIE (1998)

Descripción de los sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P.

El edificio también puede ser climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que utilizan energía eléctrica y gas L.P.

Las partes que componen estos sistemas son las siguientes:

1. El control electrónico del sistema
2. El intercambiador de calor

CAPÍTULO V. RESULTADOS

3. El ventilador
4. Los quemadores de gas L.P.
5. El piloto con encendido remoto
6. Y el gabinete metálico.

En la figura 5.2 se muestran estas partes.

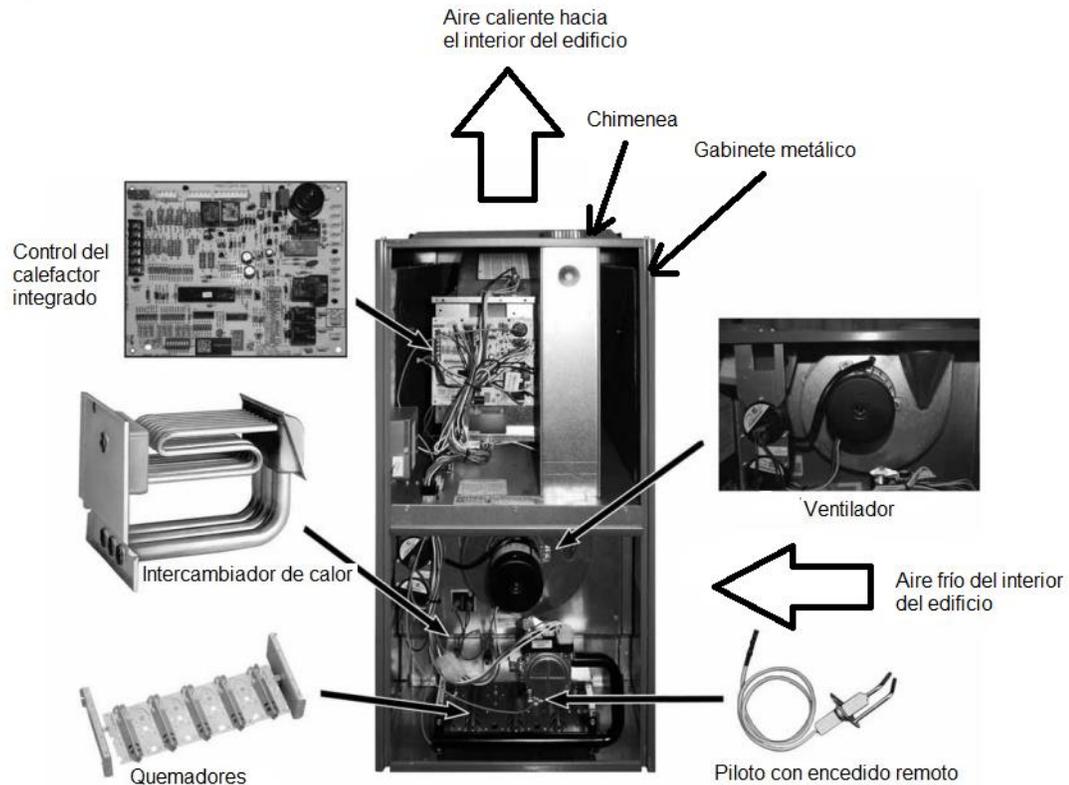


Figura 5.2. Partes de un sistema activo (HVAC convencional) que usa electricidad y gas L.P.

Funcionamiento

En un gabinete metálico de lámina galvanizada calibre 22 se encuentran todas las partes del sistema activo (HVAC convencional) que demanda electricidad y gas L.P. Un termostato localizado en el interior del piso del edificio manda una señal eléctrica que hace que el ventilador del sistema funcione. Inmediatamente una válvula solenoide de dos vías hace que el gas L.P fluya hacia los quemadores los cuales calentarán una placa de acero calibre 20. Los gases de escape del proceso de

CAPÍTULO V. RESULTADOS

combustión saldrán por la parte interior de un intercambiador de calor por el cual en su exterior circula el aire interior del piso del edificio. Este aire es calentado y enviado por el ventilador nuevamente hacia el interior del edificio. Cuando el confort es alcanzado el termostato manda nuevamente una señal eléctrica que hace que la válvula solenoide de dos vías cierre el paso del gas y el quemador se apague. Los gases de combustión que fluyen por el interior del intercambiador de calor son expulsados a través de una chimenea que los envía hacia el medio ambiente exterior. El ventilador siempre este recirculando el aire caliente del interior del edificio y nunca para su operación. El piloto siempre demanda gas L.P y está encendido para cuando el quemador requiera de ser encendido. En la tabla 5.2 se muestran las especificaciones técnicas de un sistema de este tipo.

Tabla 5.2 Especificaciones técnicas de un sistema activo (HVAC convencional) que demanda electricidad y gas L.P.

Especificaciones	Valor
Capacidad de calentamiento (kW)	29
Eficiencia de uso de combustible anual (%)	80
Demanda eléctrica del ventilador (W)	746
Demanda eléctrica del termostato (W)	23
Demanda eléctrica del actuador de la válvula de dos vías (W)	540
Máxima caída de presión estática (kPa)	0.20
Flujo volumétrico de aire en ventilación (L/s)	566
Voltaje (V)	115
Frecuencia (Hz)	60
Diámetro de conexión del gas (mm)	13
Demanda de gas propano (kg/h)	2.095

Fuente: RHEEM (2013)

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1.1 Estimación del consumo energético de los sistemas activos (HVAC convencionales) que solo demandan electricidad.

El edificio del estudio de caso es climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que solo demandan electricidad. Cada sistema tiene una unidad central con 5 unidades ventilador-serpentin por piso. La unidad central operará 8 horas diarias y el actuador 9.5 horas, ya que solo abre o cierra el paso del agua fría o caliente. El sensor de termostato de cada unidad ventilador-serpentin al igual que la bomba de agua opera las 24 horas, los 91 días de la estación de invierno.

Esto daría como resultado que la unidad central y cinco unidades interiores ventilador-serpentin operaran 728 h/estacionales, el actuador 9.5 h/estacionales, los cinco termostatos y la bomba de agua 2,184 h/estacionales.

Estos valores darán por resultado que cada unidad central consumiera 7,571.20 kWh/estacionales, las cinco unidades ventilador-serpentin, 910 kWh los cinco actuadores, 25.65 kWh/estacionales, los 5 termostatos, 251.16 kWh/estacionales, y la bomba de agua consumirá 2,273.68 kWh/estacionales. Estos consumos hacen un total de 11,031.69 kWh/estacional por sistema. Cada sistema activo (HVAC convencional) esta instalado en cada piso del edificio y los 44 sistemas de todo el edificio consumen 485,394.36 kWh durante la estación de invierno en la ciudad de México.

5.1.2 Estimación del consumo energético de los sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P.

Si el edificio utilizará sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P se tendría un consumo estacional de electricidad de 18,482.46 kWh/estacionales. Este resultado se obtuvo de multiplicar 0.746 kW por 44 sistemas que operan 364 h en la estación de invierno mas el consumo de 44 termostátos (44 termóstátos que consumen 0.023 kW cada uno que operan 24 horas diarias durante 91 días) y el consumo de las válvulas solenoides de dos vías que controlan el paso del gas L.P. (44 válvulas que consumen 0.540 kW cada una y que operan 2 horas diarias durante 91 días). Es decir, cada sistema consume 420.06 kWh/estacionales que resulta de dividir 18,482.46 kWh/estacionales entre 44 sistemas. Para el caso del gas L.P el cálculo estimado asciende a 33,553.52 kg/estacionales que resultó de multiplicar 44 sistemas, 364 h de operación de los sistemas activos (HVAC convencionales) y 2.095 kg/h de consumo de gas L.P. Es decir, cada sistema consumirá 762.58 kg/h estacionales de gas L.P., que resultó de dividir 33,553.32 kg/estacionales entre 44 sistemas.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1.3 Logro de la sustentabilidad energética en la climatización del edificio del caso de estudio.

Con los sistemas pasivos y los sistemas activos (HVAC convencionales) que solo demandan electricidad.

De acuerdo con el comparativo entre las pérdidas y ganancias de calor mostradas en las tablas 4.7 y 4.9 los sistemas pasivos pueden climatizar en su totalidad el edificio del caso de estudio entre las 15:00 h y las 16:00 h cuando está ocupado por lo que esto equivale solo a utilizar 0.67 horas los sistemas activos (HVAC convencionales) (una tercera parte de 2 horas). Por lo que en este tiempo el edificio del caso de estudio dejaría de consumir 42,225.38 kWh/estacionales, valor que fue obtenido de multiplicar 15.74 kW/sistema por 44 sistemas utilizados 0.67 horas durante 91 días. Por lo que el edificio pasará de consumir 485,394.36 kWh/estacionales a 443,168.98 kWh/estacionales. Esto representa una disminución del consumo de energía eléctrica en el edificio del 8.70 %, porcentaje que fue calculado de la siguiente manera:

$$\left(1 - \frac{443,168.98 \text{ kWh / estacionales}}{485,394.36 \text{ kWh / estacionales}}\right) \times 100 = 8.70\%$$

Con los sistemas pasivos y los sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P.

De acuerdo con el tiempo de 0.67 horas estimado en el apartado anterior, el edificio del caso de estudio dejaría de utilizar los sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan gas y electricidad por lo que la disminución del consumo de energía eléctrica ascendería a 3,511.63 kWh/estacionales. Esto resultó de multiplicar la demanda de energía eléctrica de un sistema, que es de 1,309 kW (suma de 0.746 kW que consume el ventilador del sistema, 0.023 kW de consumo eléctrico del termostato y 0.54 kW de consumo eléctrico de una válvula solenoide) por 44 sistemas que operarán 0.67 h durante 91 días. Ahora el edificio tendrá un consumo promedio de 14,970.83 kWh/estacionales. Aplicando la misma fórmula anterior esto representaría la siguiente disminución del consumo de energía eléctrica:

$$\left(1 - \frac{14,970.83 \text{ kWh / estacionales}}{18,482.46 \text{ kWh / estacionales}}\right) \times 100 = 19\%$$

CAPÍTULO V. RESULTADOS

El gas L.P disminuiría 5,620.21 kg/estacionales, valor que se obtuvo de multiplicar 44 sistemas que consumen 2.095 k/h de gas L.P, operando 0.67 horas durante 91 días. Por lo que el porcentaje de disminución del consumo de gas L.P calculado fue de:

$$\left(1 - \frac{27,932.98\text{kg / estacionales}}{33,553.20\text{kg / estacionales}}\right) \times 100 = 16.75\%$$

Con los sistemas pasivos y los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que solo demandan electricidad.

En la segunda etapa de la metodología, se alcanzó un porcentaje de consumo eléctrico estacional calculado fue 68.68 % comparando los sistemas HVAC convencionales que demandan electricidad y los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que también demandan electricidad. Por lo que el consumo de electricidad paso de 485,394.36 kWh/estacionales a 152,020.00 kWh/estacionales calculados en el apartado 4.3.4. Cabe destacar que esta disminución del consumo energético incluye la disminución de consumo de energía eléctrica por la aplicación de la primera etapa que es con sistemas pasivos de climatización y la segunda etapa que es con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética). El porcentaje de consumo de electricidad fue calculado de la siguiente manera:

$$\left(1 - \frac{152,020\text{kWh / estacionales}}{485,394.36\text{kWh / estacionales}}\right) \times 100 = 68.68\%$$

De acuerdo con lo propuesto por García et al. (2014), 152.02 MWh consumirá el edificio con los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) lo que representa una disminución del 31.32 % del consumo de los 485.39 MWh que es la electricidad total consumida por el edificio en la estación de invierno si fuera climatizado solo con sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad. Este porcentaje es menor al porcentaje al presentado en la tabla 3.1 de la metodología, que es del 37.55 % y que sugieren García et al. (2014) para edificios como los hoteles localizados en clima templado. Se aplicó este porcentaje por ser el tipo de edificio más parecido al del caso de estudio.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

Con los sistemas pasivos y los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que demandan electricidad y gas L.P.

El gas L.P disminuiría 5,566.56 kg/estacionales, valor que se obtuvo de multiplicar 44 sistemas que consumen 2.075 k/h de gas L.P, operando 0.67 horas durante 91 días. Por lo que el porcentaje de disminución del consumo de gas L.P calculado fue de:

$$\left(1 - \frac{27,666.64\text{kg / estacionales}}{33,233.20\text{kg / estacionales}}\right) \times 100 = 16.75\%$$

Para el caso de los sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P comparados con los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que también demandan electricidad y gas L.P se calcularon los siguientes porcentajes de consumo:

En electricidad

$$\left(1 - \frac{8,952.94\text{kWh / estacionales}}{18,482.46\text{kWh / estacionales}}\right) \times 100 = 51.56\%$$

En el gas L.P.

$$\left(1 - \frac{27,666.64\text{kg / estacionales}}{27,932.98\text{kg / estacionales}}\right) \times 100 = 0.95\%$$

Con los sistemas pasivos y los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

Con la tercera etapa, que consistió en aplicar al caso de estudio los sistemas activos (HVAC sostenidos por energías renovables) para climatizar el edificio sin usar energías no renovables el consumo de energía eléctrica fue del 0 %. Para ello se tuvo que recurrir a la generación de energía eléctrica por 126.05 MWh/ estacionales y el almacenaje de esta por medio de 4,180 baterías con capacidad de 100 horas de descarga profunda.

En las figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6,5.7, 5.8 y 5.9 se muestran cada uno de los diferentes comparativos descritos anteriormente. Es conveniente mencionar que la disminución en el consumo de kilogramos de gas L.P. del edificio cuando es climatizado con sistemas pasivos y activos (HVAC convencionales) y sistemas

CAPÍTULO V. RESULTADOS

pasivos y activos (HVAC de alta eficiencia energética) que demandan electricidad y gas L.P. es de 266.34 kg, por lo que estos sistemas se deberán seleccionar como segunda opción y después de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que solo demandan electricidad.

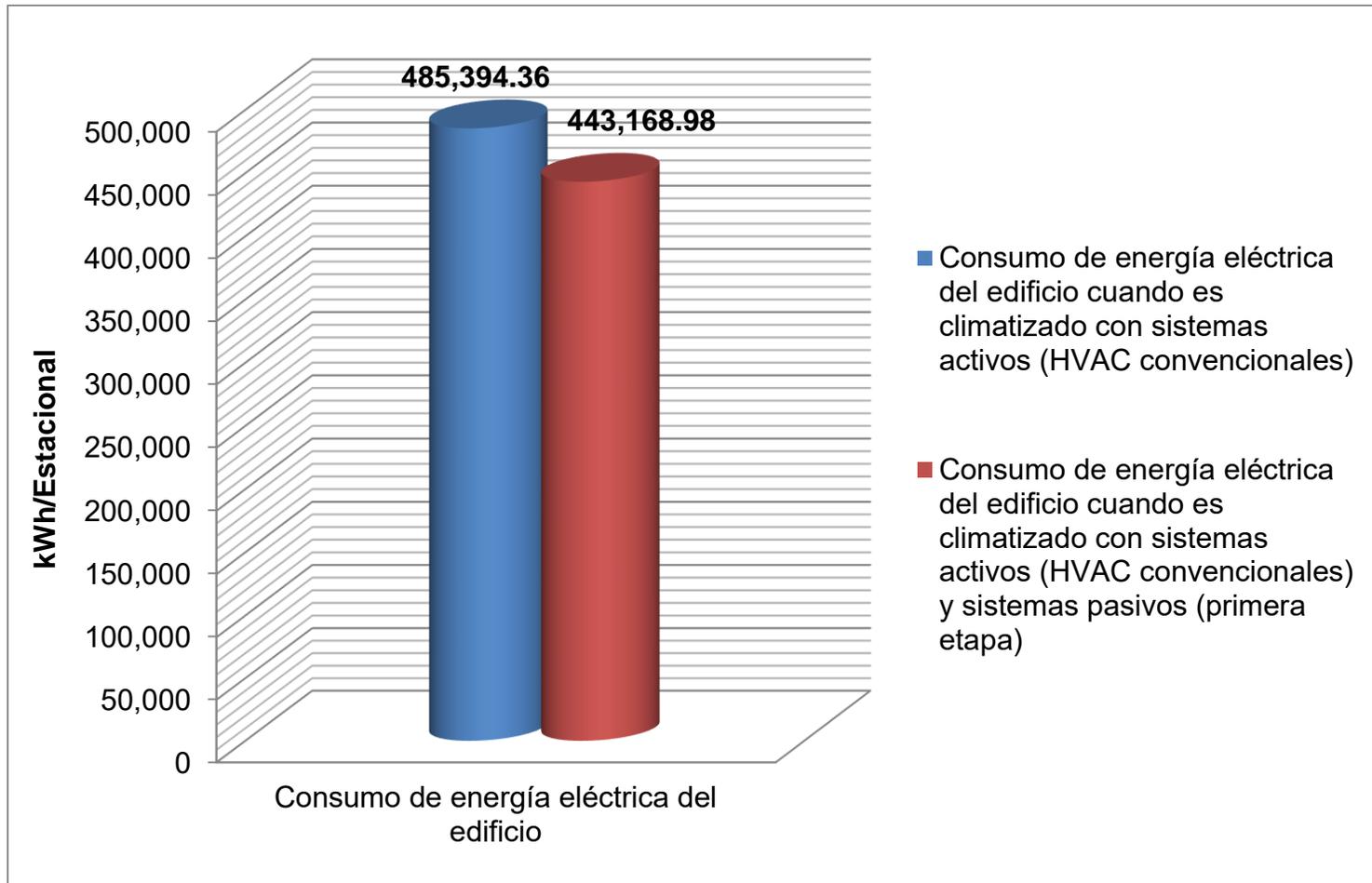


Figura 5.1. Comparativo del consumo de electricidad estacional del edificio cuando es climatizado con sistemas activos que solo demandan electricidad (HVAC convencionales) y sistemas pasivos.

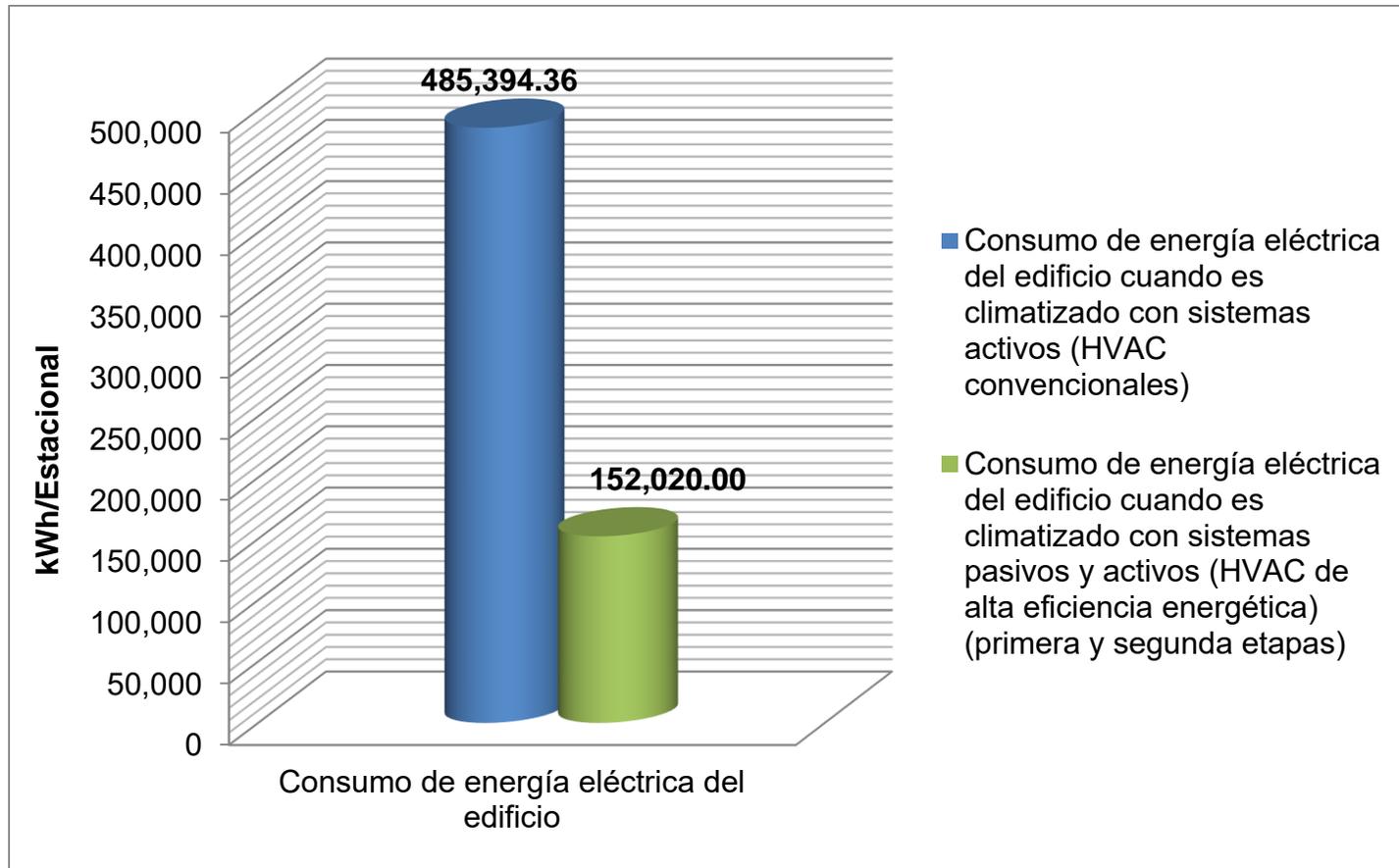


Figura 5.2. Comparativo del consumo de electricidad estacional del edificio cuando es climatizado con sistemas activos que solo demandan electricidad (HVAC convencionales) y sistemas pasivos y activos (HVAC de alta eficiencia energética).

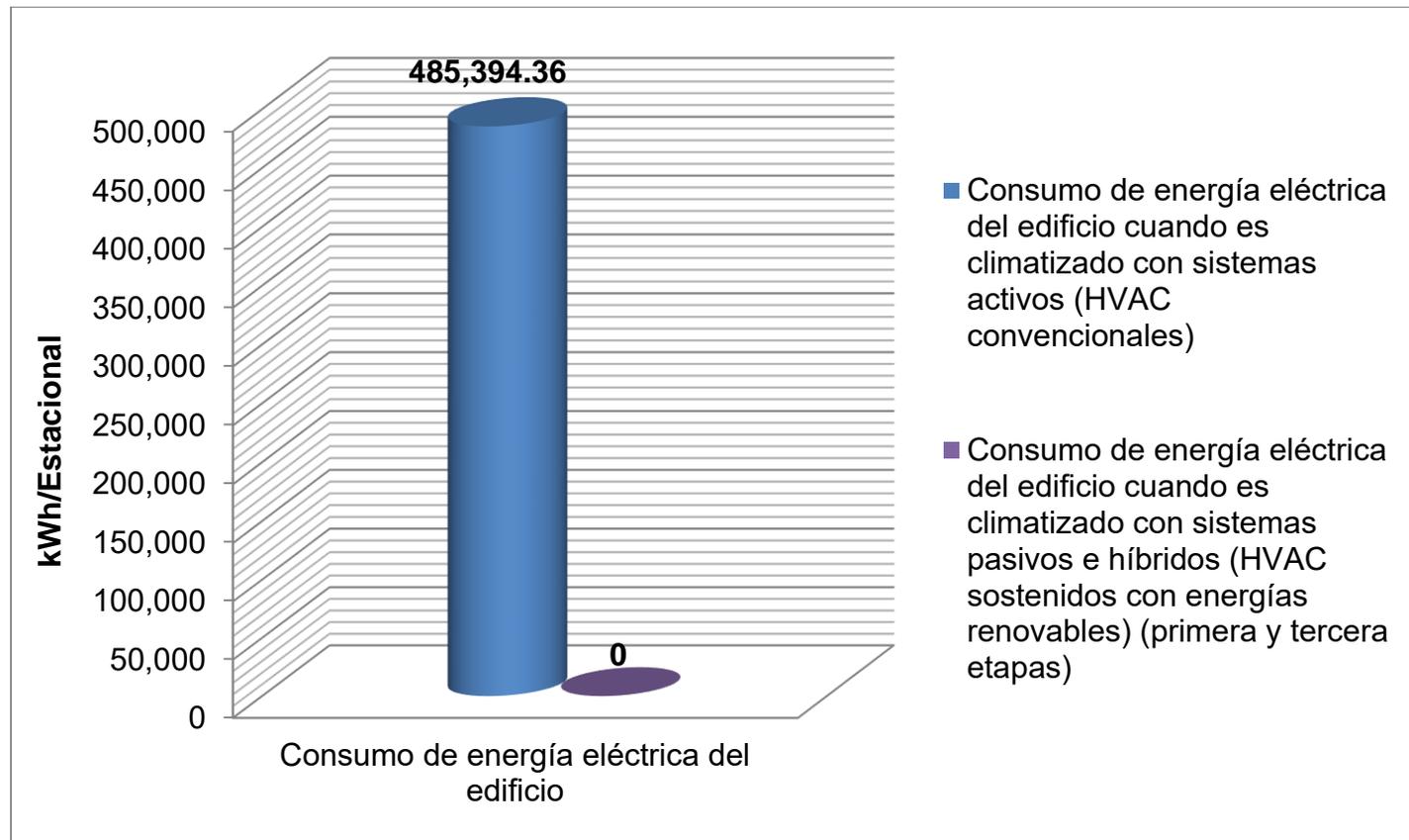


Figura 5.3. Comparativo del consumo de electricidad estacional del edificio cuando es climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que solo demandan electricidad y sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

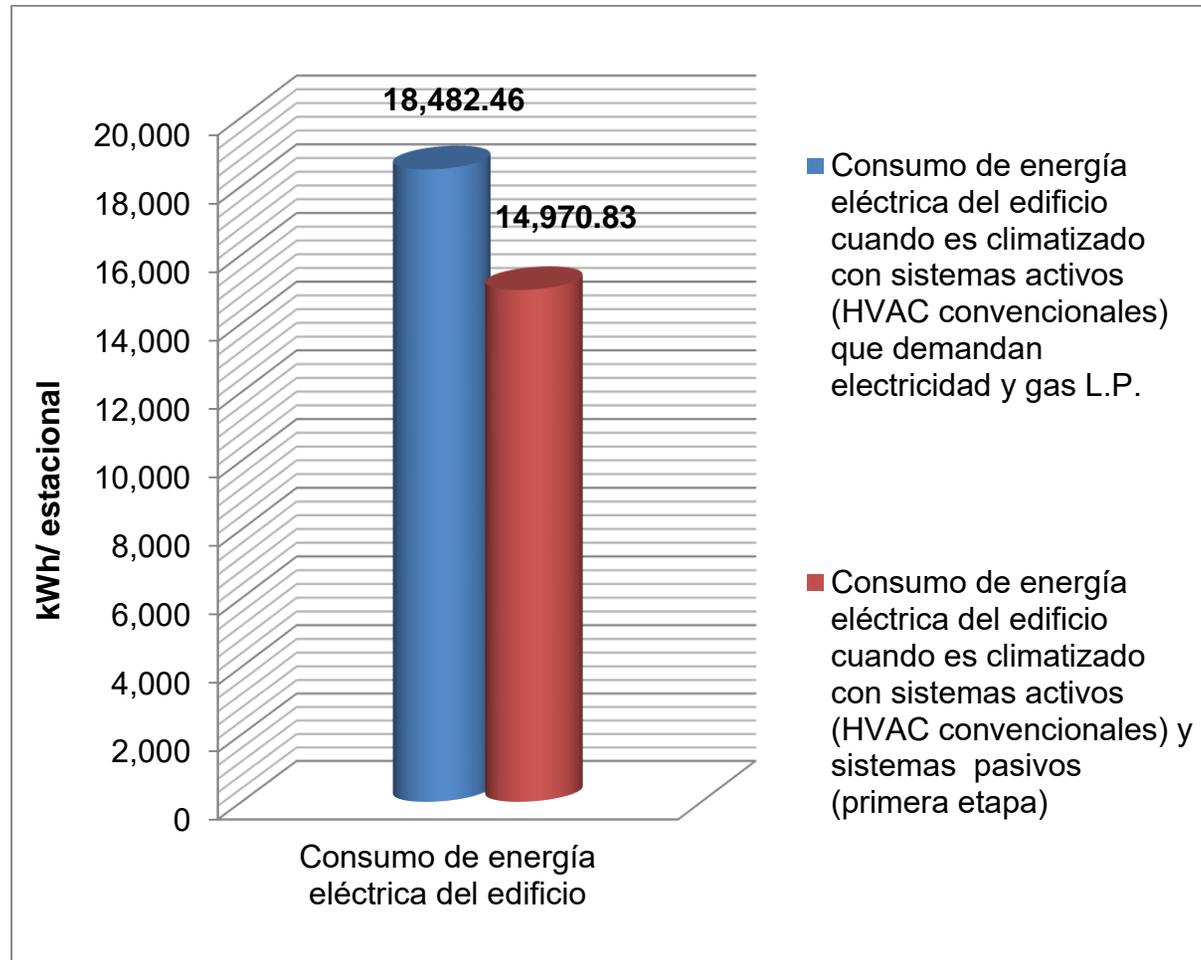


Figura 5.4. Comparativo del consumo de electricidad estacional del edificio cuando es solo climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P y con sistemas activos (HVAC convencionales) y sistemas pasivos.

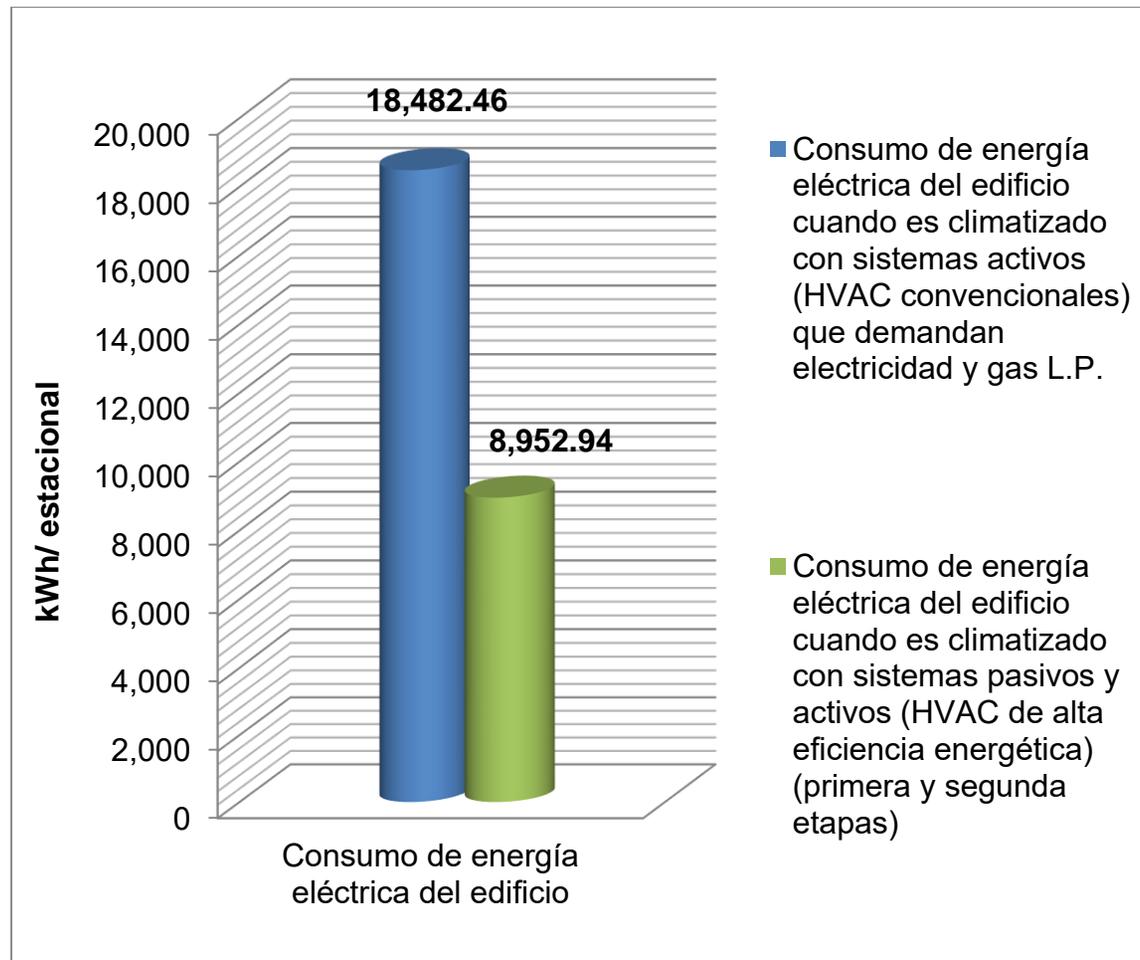


Figura 5.5. Comparativo del consumo de electricidad estacional del edificio cuando es climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P y con sistemas pasivos y sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

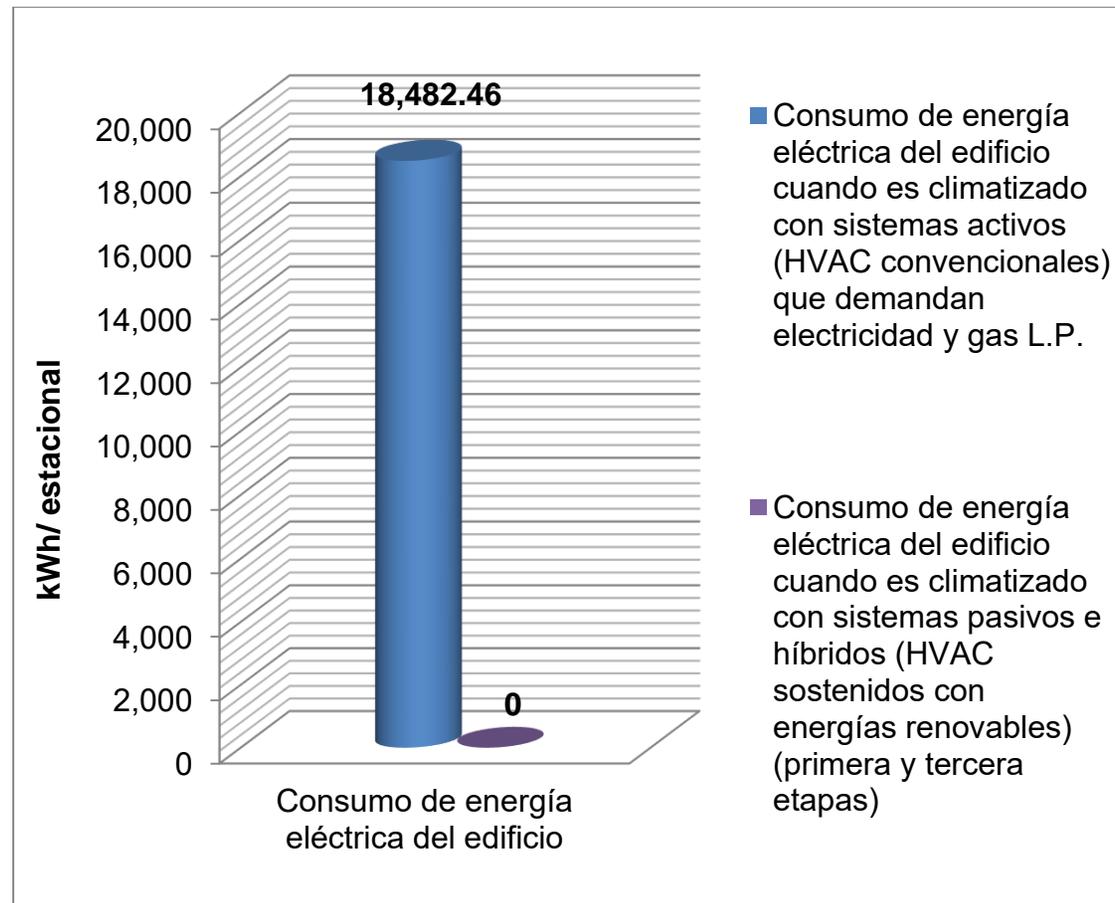


Figura 5.6. Comparativo del consumo de electricidad estacional del edificio cuando es climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P y con sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

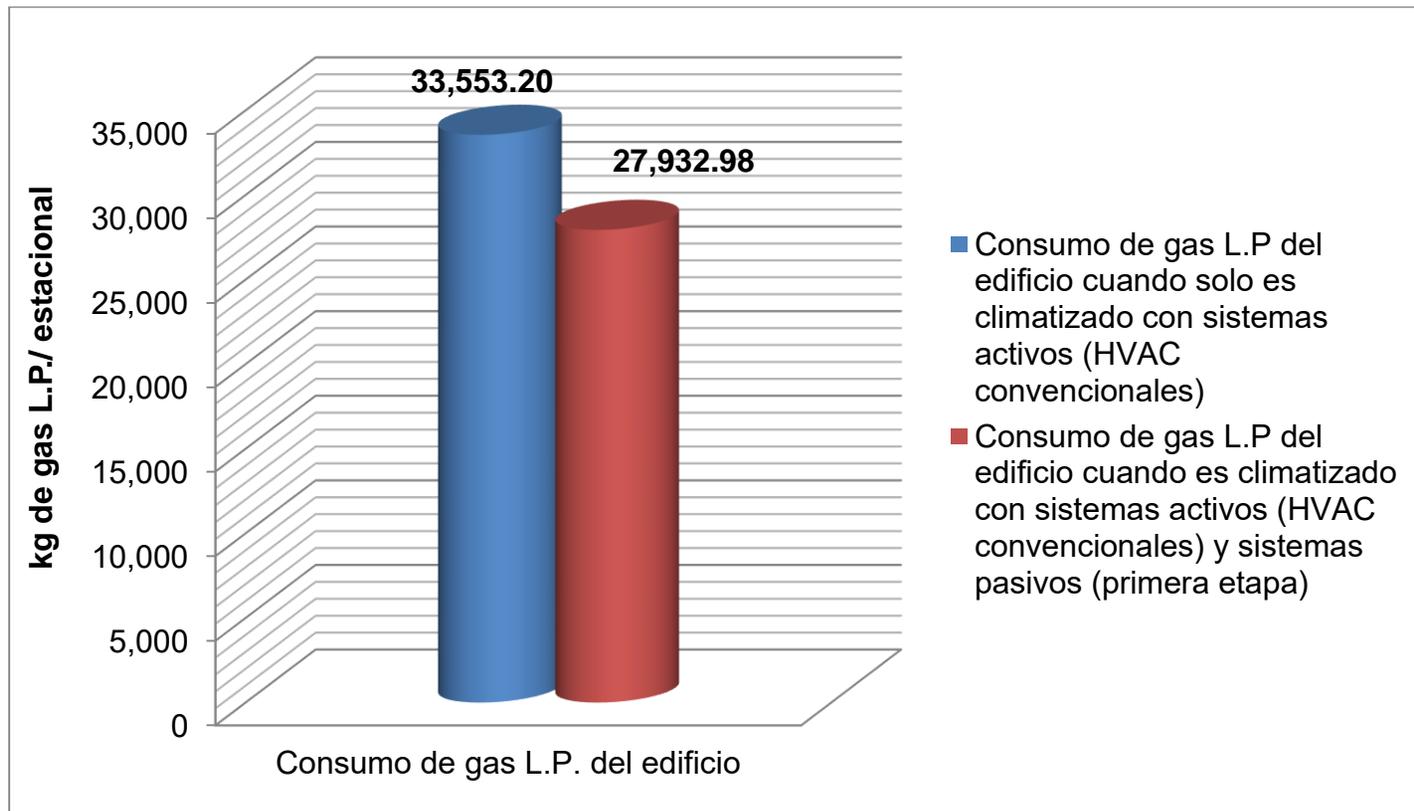


Figura 5.7. Comparativo del consumo de gas L.P. estacional del edificio cuando es climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P. y sistemas pasivos y activos (HVAC convencionales).

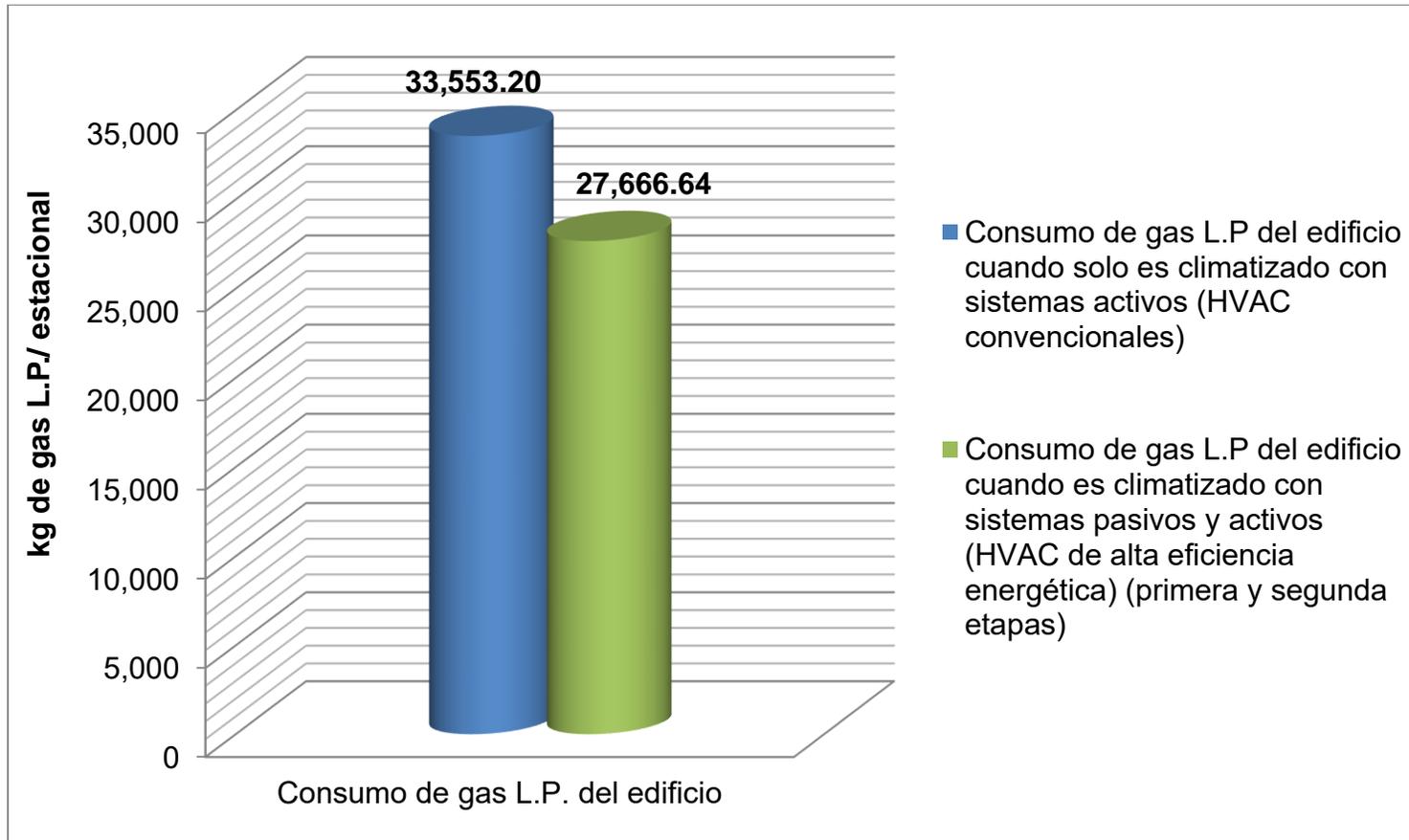


Figura 5.8. Comparativo del consumo de gas L.P. estacional del edificio cuando es climatizado con sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P. y sistemas pasivos y activos (HVAC de alta eficiencia energética).

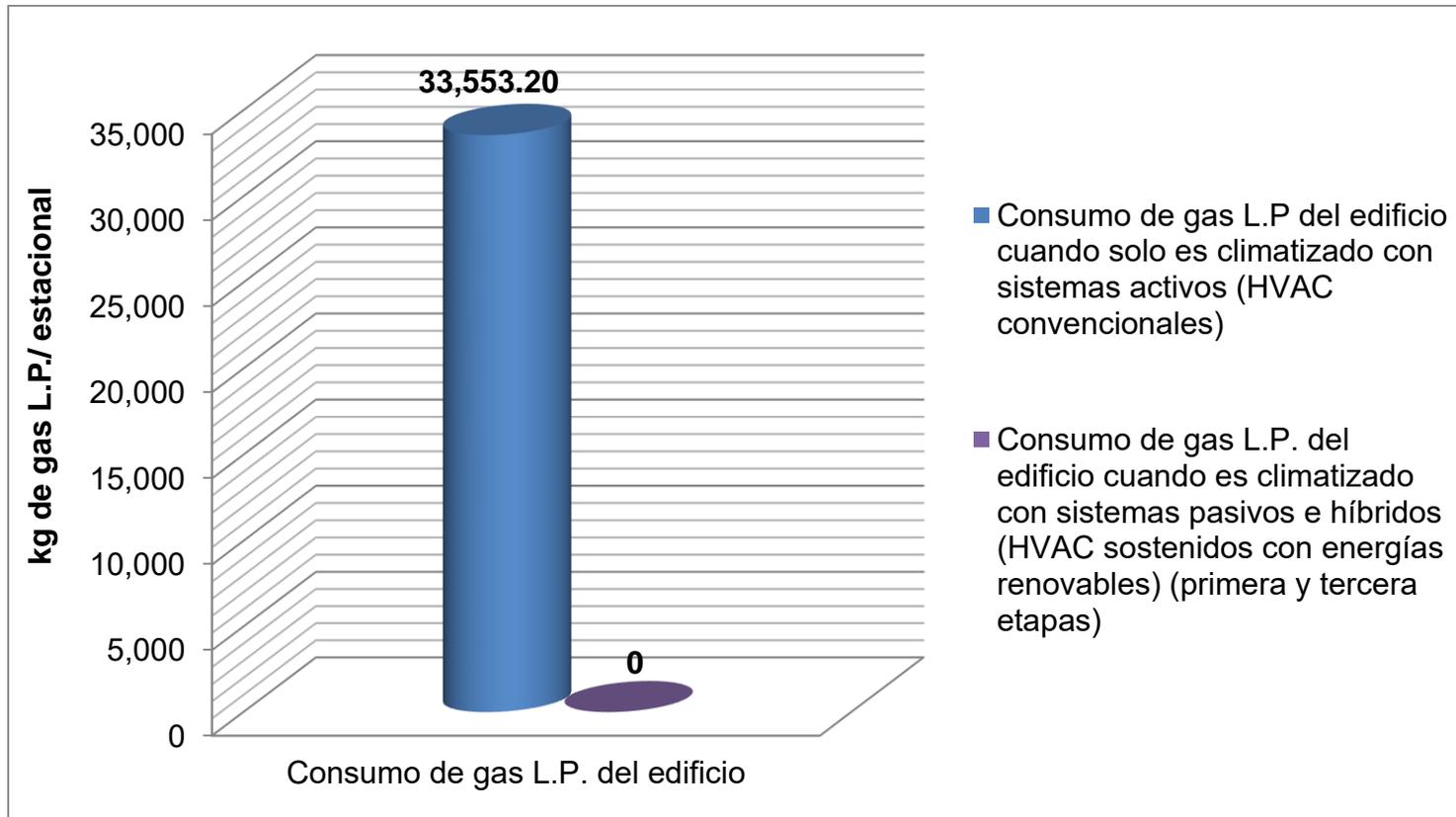


Figura 5.9. Comparativo del consumo de gas L.P. estacional del edificio cuando es climatizado solo sistemas activos (HVAC convencionales) que demandan electricidad y gas L.P. y sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables).

CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.2 Comparativo entre la metodología desarrollada y otras utilizadas para la climatización de edificios.

En el siguiente apartado se detallan las propuestas utilizadas por diversos autores para disminuir el consumo de combustibles fósiles del edificio con base en sus resultados reportados.

La propuesta de climatización de Wang, Gwilliam, y Jones.

Wang et al. (2009a) desarrollaron una propuesta metodológica para climatizar una casa en Cardiff, Reino Unido. Su propuesta metodológica estaba basada en un análisis de la velocidad y dirección del viento, un análisis de la radiación solar directa y difusa del sitio, un estudio de la temperatura de bulbo seco, un estudio de los grados día de enfriamiento y calentamiento. Estos datos y los datos de los sistemas constructivos de las fachadas del edificio fueron simulados con el programa Energy Plus. Este programa también sirvió para estimar las cargas de calentamiento y enfriamiento con un punto fijo de 20 °C en el calentamiento y 24 °C en el enfriamiento. Reducir el coeficiente global de transferencia de calor en las ventanas de 1.78 W/m² K a 1.367 W/m² K y del techo del edificio 4.298 W/m² K (techo ventilado) a 0.2 W/m² K (techo aislado) reduciría el consumo de electricidad del edificio hasta un 31 %. Con el programa TRNSYS 16.0 un sistema activo (HVAC convencional) de tipo piso radiante y una bomba de calor fueron simulados. La bomba de calor que tenía un COP de 3.0 era utilizada para simular el calentamiento del agua que circularía a través del piso radiante. Con esto se reduciría el consumo de electricidad hasta un 53 %. 31 % con ventilación natural y reducción del coeficiente global de transferencia de calor "U" en ventanas y techo y 16 % con el uso de sistemas activos (HVAC convencionales).

La propuesta de climatización de Fasiuddin y Budaiwi

Fasiuddin and Budaiwi (2011) presentan una propuesta para climatizar el centro comercial Al-Waha que tiene una superficie de 37,500 m² y que está localizado en la zona Este de Arabia Saudita. Su propuesta se dividía en dos fases, la primera fase se llamaba formulación del modelo de rendimiento energético. A su vez la primera fase se subdividía en dos partes, la colección de datos y la formación del modelo. La segunda parte la formaba la verificación del modelo, la cual se llamaba implementación de las medidas de conservación de la energía. Esta fase estaba integrada por la investigación de todas aquellas medidas que provocaban ahorro de energía en el centro comercial y que no afectaban el confort de los ocupantes. La investigación iniciaba con la aplicación de encuestas a los usuarios del edificio y

CAPÍTULO V. RESULTADOS

servía para alimentar el programa Visual DOE, en el cual se simulaba el comportamiento energético del edificio del centro comercial.

Se analizaron 82 medidas de conservación de la energía de las cuales la que mayor porcentaje alcanzó fue la combinación de los sistemas VAV que usaban economizadores entálpicos. Esta combinación disminuyó el consumo energético hasta un 74.50 %.

La propuesta de climatización de Ouyang, Wang, Li y Hokao.

Ouyang et al. (2011) desarrollaron una propuesta para climatizar un edificio residencial en Hangzhou, China. Su propuesta estaba dividida en ocho pasos los cuales se describen a continuación:

1. Seleccionar un edificio residencial existente.
2. A partir de un análisis del clima se establecían estrategias para disminuir el consumo de energía del edificio. Estas estrategias tomaban en cuenta la carga de calentamiento, la carga de enfriamiento y la educación de los ocupantes del edificio. El consumo de energía del edificio disminuyó en un 20 % cuando se mejoraron 6 variables de la envolvente del edificio. Estas variables consistían en mantener las puertas de las escaleras que daban al exterior del edificio cerradas, sustituir los marcos de las ventanas de aluminio por marcos de otros materiales, usar persianas para reducir el coeficiente solar en verano, agregar poliestireno extruido de 40 mm en el techo, agregar poliestireno extruido de 15 mm en las paredes exteriores, y aplicar pintura de color claro en las superficies exteriores de la envolvente para alterar los coeficientes de absortividad.
3. Con un análisis del estilo de vida y la educación de los ocupantes para usar menos la electricidad se podía calcular la disminución del consumo de energía en el edificio. Esta educación reportada por Ouyang et al. (2011) causó una disminución del consumo energético del 10 %.
4. Mediante un proceso de comparación entre los resultados del cálculo anterior y el consumo de energía actual se estimaba que medidas producían la mayor disminución de consumo energético.
5. Mediante un análisis del ciclo de vida del dióxido de carbono, se calculaban los efectos en la reducción del dióxido de carbono que provocaban las medidas de reducción del consumo energético.
6. Con estas medidas se elaboraba un plan efectivo de reducción energética.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

7. A través de métodos de evaluación, procesos de revisión, y efectos de conservación de energía se calcula la disminución de la energía mediante la aplicación del plan.
8. Con la combinación del plan y la educación de lo ocupantes se evaluaba la cantidad de disminución de energía.

La propuesta de climatización de Santoli, Mancini, y Rossetti

En 2014, Santoli et al (2014) presentan una propuesta para climatizar el edificio llamado Palacio de Italia, un edificio con 12,000 m² de construcción y el cual está localizado en Milan, Italia. El tercer paso de su propuesta mostraba que el pabellón italiano podía ser climatizado primero con vidrios oscuros de bajo coeficiente global de transferencia de calor "U" (0.167-0.227 W/m²W), los vidrios claros debían tener un U= 1.3 W/m²K, se proyectaron techos verdes para reducir la carga de enfriamiento en verano y como sistemas complementarios de climatización se sugirieron los sistemas activos (HVAC convencionales) de tipo bomba de calor. Con la protección de la envolvente del edificio a la radiación solar y el uso de los sistemas activos (HVAC convencionales) se disminuía el consumo del edificio hasta un 60 % en los periodos de verano e invierno.

La propuesta de climatización de Cho, Shin, Kim y Hong.

Cho et al. (2014) simulaban climatizar un edificio de oficinas de 1,500 m² mediante el programa TRNSYS y utilizando una propuesta que incluía tres etapas. La primera etapa era el diseño pasivo de edificio, la segunda etapa consistía en utilizar equipo de alta eficiencia energética y la tercera etapa era diseñar el sistema de control óptimo. La segunda etapa Cho et al. (2014) la subdividieron en los siguientes pasos: el cálculo de carga térmica del edificio, el cálculo del consumo de energía, el cálculo de la demanda de energía, la evaluación del consumo de energía, la conversión de la energía primaria y el costo de esta energía. Cho et al. (2014) indicaron que con el diseño pasivo del edificio se puede reducir el consumo energético hasta en un 40% y con el uso de sistemas de control óptimos en los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) un 20 % adicional. Cho et al. (2014) simulaban con el programa TRNSYS 960 posibles combinaciones de sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) aunque solo 33 combinaciones fueron analizadas. De acuerdo con un análisis de sensibilidad, Cho et al. (2014) utilizaron una combinación de sistemas de calentamiento distrital con los sistemas activos (HVAC convencionales) de tipo enfriador de líquido centrífugo para reducir el consumo de energía del edificio de oficinas hasta un 67 %.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

La propuesta de climatización de Abdul, Mofarhi, Abdulwahab, Ali, ElBorombali y Milyani.

Abdul et al. (2016) describieron una propuesta de climatización del hospital de 4,647 m² en el condado de Kiowa, en Kansas en Estados Unidos de América. La propuesta de climatización estaba integrada por tres pasos y solo contemplaba la combinación de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo aire preacondicionado con ruedas recuperadoras de energía y sistemas de VAV. La disminución del consumo de energía del edificio fue del 68% con el uso de estos sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética).

En la tabla 5.3 se muestran un comparativo entre la metodología desarrollada y las propuestas de climatización de otros autores, las combinaciones de sistemas, la disminución del consumo energético por propuesta y el porcentaje de consumo total que se logra con una de estas propuestas.

En la figura 5.10 se muestra una comparación de los diferentes porcentajes del consumo energético total de edificio cuando es climatizado con las diferentes propuestas.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

Tabla 5.3 Propuestas metodológicas para climatizar un edificio.

Propuesta	Combinación de sistemas de climatización	Disminución del consumo energético (%)	Consumo energético total (%)
Metod.	Primer paso: Climatización del edificio con sistemas pasivos (Muro Trombe y aislamiento térmico transparente lleno con CO ₂)	8.65	91.35
	Segundo paso: Climatización del edificio con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) con base en la utilización de unidades de bomba de calor y fuente de calor el aire.	31.31	60.04
	Tercer paso: Usar sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) a base de unidades de bomba de calor y fuente la arena alimentados eléctricamente con sistemas fotovoltaicos y bancos de baterías	100	0
Wang et al. (2009a)	Incrementar el aislamiento térmico de la casa usando coeficientes globales de transferencia de calor de 0.4 W/m ² °C en las paredes exteriores, 1.78 W/m ² °C en las ventanas con doble vidrio, 0.71 W/m ² °C en las paredes divisorias y 4.298 W/m ² °C en el techo.	31	53.00
	Utilizar sistemas activos (HVAC convencionales) de tipo bomba de calor y fuente el aire acoplada a una tubería de piso radiante y ajustar su punto de apagado a 20 °C para el modo de calentamiento y 24 °C para modo de enfriamiento de la casa.	16	
Ouyang et al. (2011)	Aumento de la resistencia térmica de la envolvente y pintado de fachadas de colores claros para modificar los coeficientes de absorción del calor de los materiales.	24	66.00
	Educación de los ocupantes del edificio para reducir el uso de la electricidad y apagar los sistemas activos (HVAC convencionales).	10	
Fasiuddin y Budaiwi (2011)	Sistemas activos (HVAC convencionales) con VAV y economizador entálpico	25.50	74.50
Cho et al. (2014)	Utilizar sistemas de calentamiento distrital y sistemas activos (HVAC convencionales) de tipo enfriador de líquido centrífugos	33	67.00
Santoli et al. (2014)	Techo verdes y sistemas activos (HVAC convencionales) de tipo bomba de calor con fuente agua-tierra.	60	60.00
Abdul et al. (2016)	Sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) de tipo aire preacondicionado con ruedas recuperadoras de energía y sistemas de VAV.	32	68.00

Fuente: Elaboración propia

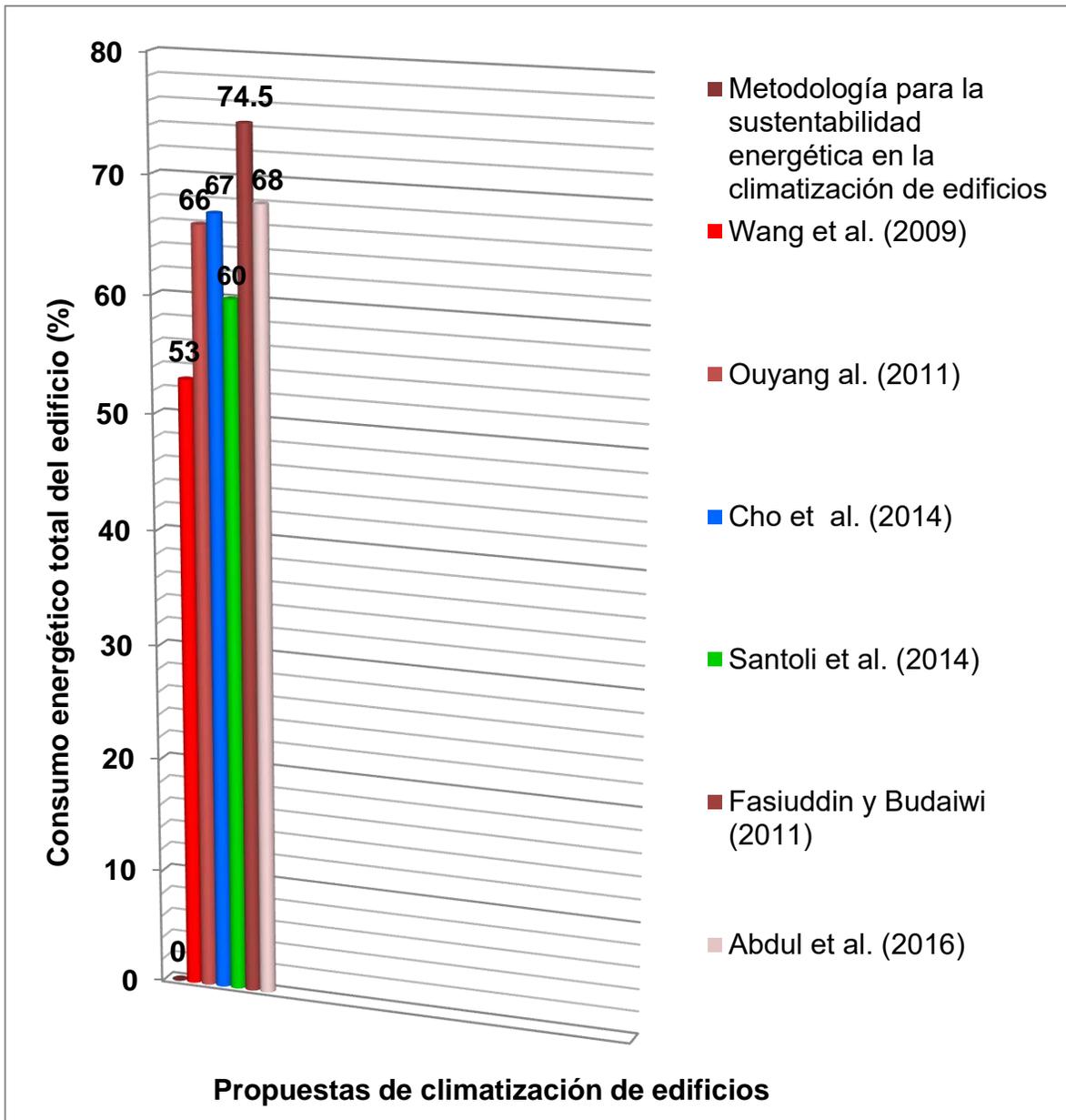


Figura 5.10. Consumo energético total del edificio con la metodología desarrollada y otras utilizadas para la climatización de edificios (%).

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

De acuerdo con lo publicado en el reporte de mercado de eficiencia energética 2016 de la OCDE y la IEA en 2015 se habían invertido 76 billones de dólares en incrementar la eficiencia energética de los sistemas activos (HVAC convencionales) y sus sistemas de control para hacerlos de alta eficiencia energética (OCDE y IEA, 2016a). Esto representó un incremento en la inversión por 27 billones de dólares con respecto al año 2014. En el mismo reporte se hace mención que en el sector de edificios se invirtieron 237 billones de dólares para mejorar la eficiencia energética en la envolvente de los edificios existentes en 2015. Por lo que la metodología desarrollada considera la climatización de edificios tanto nuevos como algunos existentes primero con sistemas pasivos y después con sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) o con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) y no sugiere solo aislar la envolvente del edificio con mejores materiales de alta resistencia térmica como algunos diseñadores e investigadores en el mundo sugieren. En países con clima frío extremo como en los Estados Unidos de América la climatización en la actualidad se ha centrado principalmente en la combinación de diferentes sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) con sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) más que en el desarrollo de una metodología que se fundamente en el uso de los sistemas pasivos.

La metodología propone la climatización de un edificio nuevo o algunos existentes teniendo siempre como base a los sistemas pasivos que no usan combustibles fósiles como la electricidad o el gas natural o L.P. Por lo que los actuales y futuros recursos financieros deben ser enfocados más en la investigación y desarrollo de sistemas pasivos que disminuyan el consumo energético del edificio ya que estos sistemas pueden suministrar las ganancias o pérdidas de calor necesarias para climatizar algunos edificios existentes por horas sin necesidad de utilizar sistemas de climatización activos (HVAC convencional o de alta eficiencia energética).

Cuando el clima o el diseño de los sistemas pasivos no permiten climatizar el edificio se deberán utilizar los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética). El trabajo mostró que se pueden climatizar algunos edificios existentes con sistemas pasivos y sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) pero siempre se tendrá un consumo de electricidad o de electricidad y gas L.P. En las gráficas de las figuras 5.7 y 5.8 se puede observar que la cantidad de gas L.P. que un edificio existente puede dejar de consumir con la utilización de sistemas pasivos y activos (HVAC de alta eficiencia energética) puede ser poca. Esto se debe principalmente a que estos sistemas de climatización demandan grandes cantidades de gas L.P o natural y a que han tenido poco desarrollo tecnológico. Por lo que esta opción debe

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

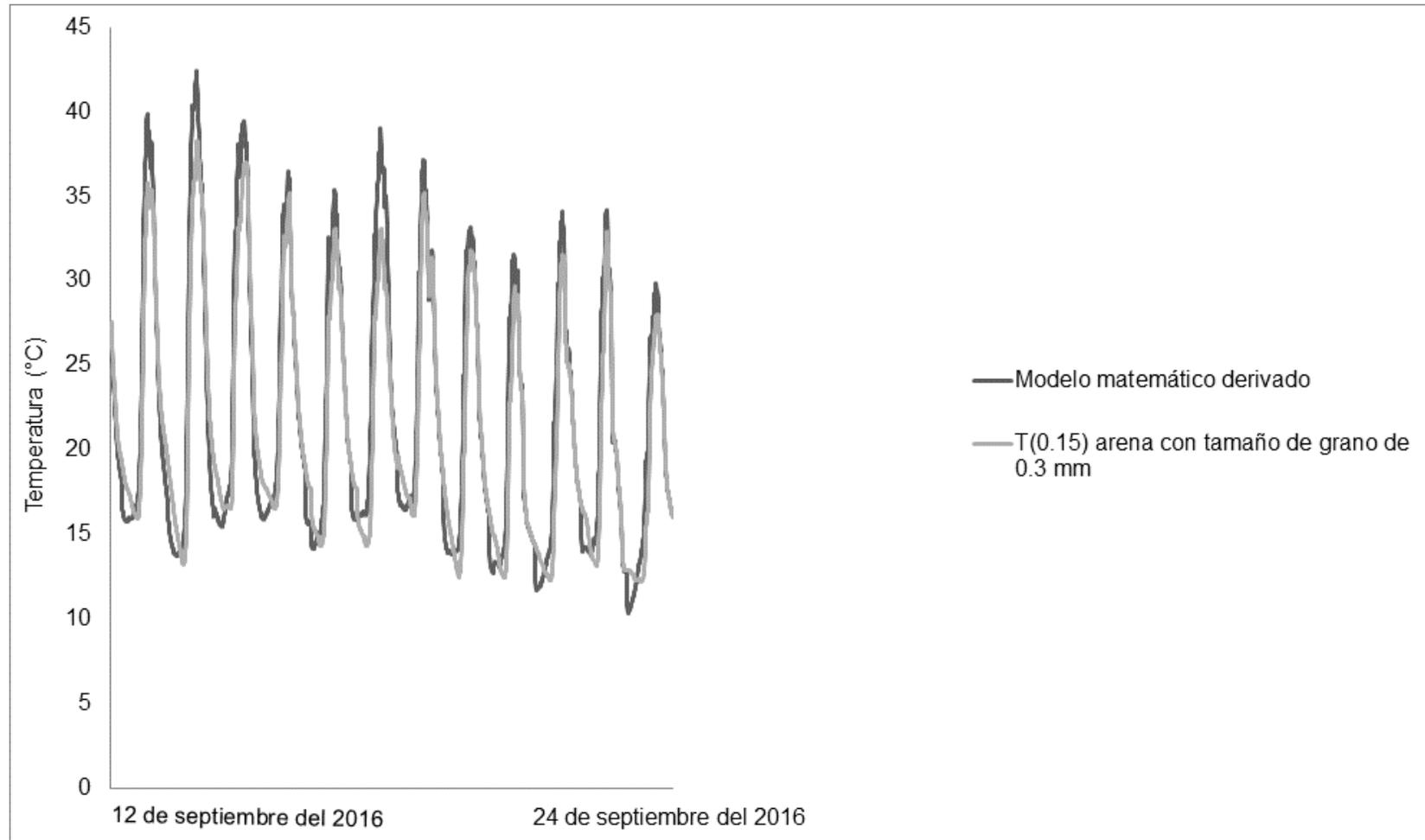
ser colocada detrás de los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) que solo demandan electricidad.

De la literatura revisada la propuesta de Wang et al. (2009a) es la que menos consumo energético reportó (53 %) después de la metodología desarrollada. Esta opción y la propuesta de Abdul et al. (2016) muestran que los sistemas activos de climatización que demandan electricidad y gas L.P siguen siendo tomados en cuenta como primera opción de climatización en los edificios nuevos y existentes en países como los Estados Unidos de América y Gales en Reino Unido.

Para no consumir combustibles fósiles, climatizar edificios nuevos o algunos existentes, alcanzar el confort y lograr la sustentabilidad energética se deberá utilizar la primera y tercera etapas de la metodología que es con sistemas pasivos e híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables). Los sistemas híbridos fueron colocados en esta posición porque la inversión inicial es mayor que la inversión en los sistemas pasivos y activos (HVAC de alta eficiencia energética).

El modelo matemático que se muestra en el anexo A y que simula el perfil de temperaturas de la arena puede ser aplicado a diferentes tamaños de grano como se muestra en la figura 4.14 (tamaño de grano de 1.18 mm) y en la figura 6.1 (tamaño de grano de 300 μm). Ya que se ajusta bien al perfil de temperaturas de estos dos tamaños de grano.

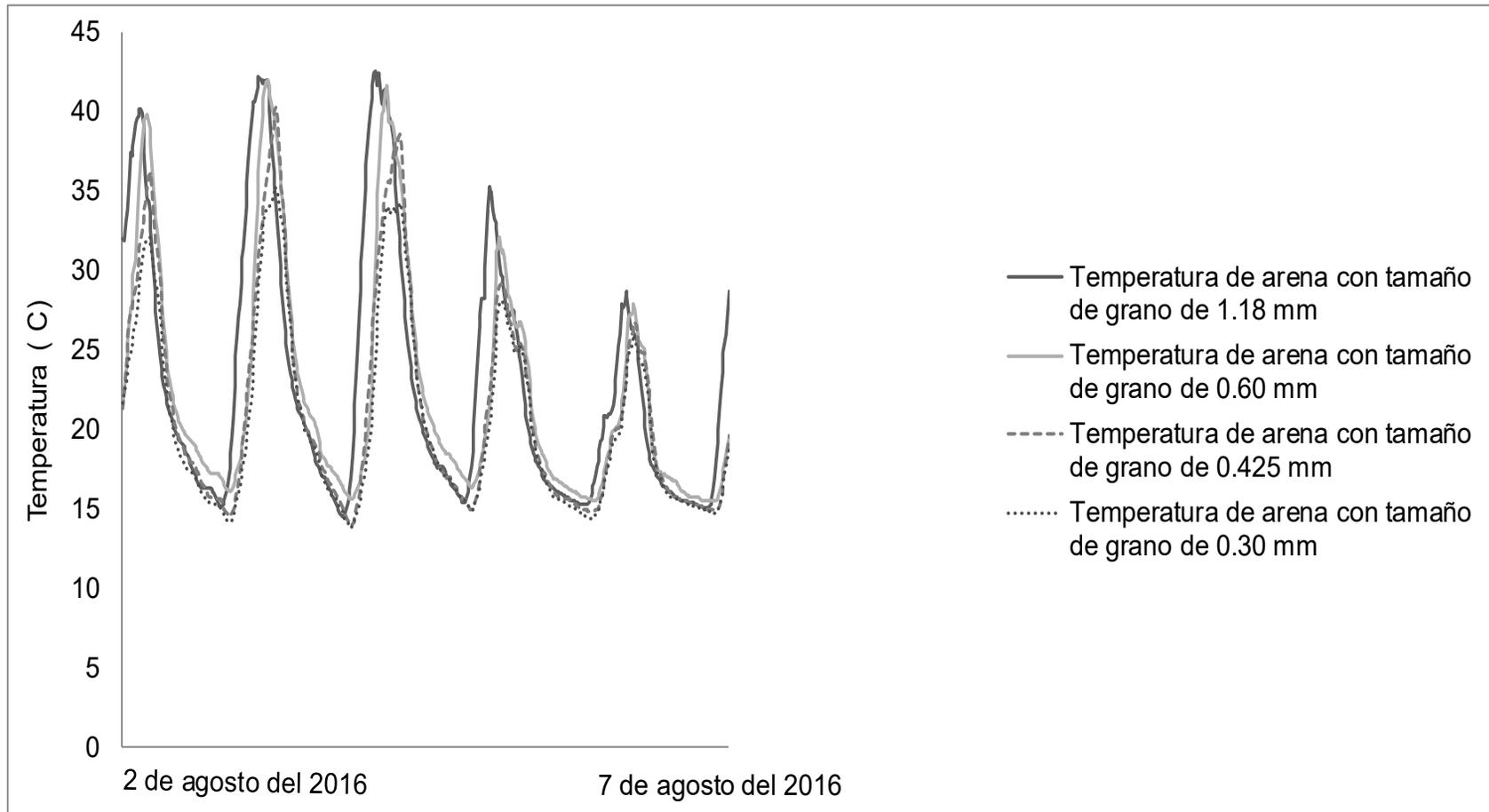
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES



6.1. Comparación entre el perfil de temperaturas de arena con tamaño de grano de 300 μm y el modelo matemático derivado en el anexo A del 12 al 24 de septiembre del 2016.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Un revisor de la revista Investigación del suelo sugirió que el tamaño de grano afecta la temperatura. La figura 6.2 muestra el cambio de temperatura con el tamaño de grano (Cameron, 2017).



6.2. Temperaturas medidas para cuatro diferentes tamaños de grano de la arena entre el 2 de agosto y el 7 de agosto del 2016.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Por lo que se puede concluir que el tamaño de grano afecta la temperatura de la arena. Cuando se emplean programas comerciales como GeoTSOL Básico en donde se pueden simular sistemas híbridos HVAC sostenidos con energía geotérmica de baja temperatura y sus consumos de electricidad sin un sistema fotovoltaico de tipo aislado se pueden estimar los resultados presentados en la tabla 6.1 y al final del anexo A. En esta tabla también se muestra como el incremento en la humedad de la arena influye en la disminución del consumo energético, ya que un sistema híbrido con capacidad de 17.54 kW, arena saturada a 20 °C, tamaño de grano de 300 μm y 69 % humedad consumirá 1,916 kWh/año mientras que el mismo sistema con arena seca a 10 °C, 250 μm y 20 % de humedad consumirá 2,274 kWh/año.

Por otra parte, las temperaturas medidas en las muestras de arena húmeda de 50.65 °C para la arena de 600 μm (figura A3) del perfil de temperaturas del anexo A y 61.352 °C de la arena de 1.18 mm (figura 4.3) fueron superiores a los 32 °C registrados y predichos por Saito et al. (2014) a 50 m y 48 h en el subsuelo de la región japonesa de Kanto. Por lo que se pueden utilizar sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) con fuentes de calor superiores a los 20 °C lo que contribuirá a realizar perforaciones menos profundas en el suelo. Si se tienen perforaciones menos profundas también se tendrán serpentines enterrados menos largos y el recorrido del agua también será menor. Esto finalmente contribuirá con una disminución de la capacidad y tamaño del sistema fotovoltaico debido a que disminuirá el consumo de electricidad de las bombas centrifugas que hacen circular el agua por el interior de los serpentines enterrados.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Tabla 6.1. Simulación del consumo de electricidad de un sistema híbrido con diferentes tipos de arena.

Suelo	Cons. elect. del sist. HVAC (kWh/año)	Cons. elect. bomba calor (kWh/año)	Capac. calent. (kW)	Área serpentín colector (m ²)	Separ. (m)	Prof. del la zanja (m)	Capacidad de calor específico (MJ/m ³ K)	Temp. de la fuente de calor (°C)	Cond. (W/m K)	Hum. (%)	Flujo de calor extraído (W/m ²)
Arena saturada (300 μm)	1,916	117	17.54	120	0.5	2.5	2.7	20	2.0	69	115
Arena saturada (250 μm)	2,000	124	17.54	120	0.5	2.5	2.7	10	2.4	60	115
Arena húmeda (250 μm)	2,091	132	17.54	120	0.5	2.5	1.9	10	1.4	40	115
Arena seca (250 μm)	2,274	147	17.54	120	0.5	2.5	1.5	10	0.4	20	115
Arena gruesa (3 mm)	1,989	123	17.54	120	0.5	2.5	2.3	10	2.8	10	115
Dolomita (10 cm)	1,972	122	17.54	120	0.5	2.5	2.3	10	3.5	10	115

Fuente: Valentin Software (2016).

Los resultados de las simulaciones presentados en la tabla anterior puede ser consultados al final del anexo A.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

6.2 Recomendaciones

Para la primera etapa.

El diseño de un sistema pasivo debe considerar una serie de dispositivos que controlen el flujo de calor que entra o sale del edificio. Los diseñadores deben ser capaces de cambiar la configuración del sistema pasivo cuando el edificio pase de la estación de invierno a la estación de verano o de verano a invierno. Todo diseño del sistema pasivo deberá ser verificado de manera experimental en un laboratorio de pruebas para conocer las variables físicas que afectan su desempeño y poder dar sus especificaciones técnicas.

En algunos casos de edificios existentes será necesario realizar un estudio de factibilidad para saber si es posible adecuar el sistema pasivo al edificio. En caso de no ser factible será necesario redefinir otro sistema pasivo que se adecue mejor al edificio y que le cause la menor modificación posible.

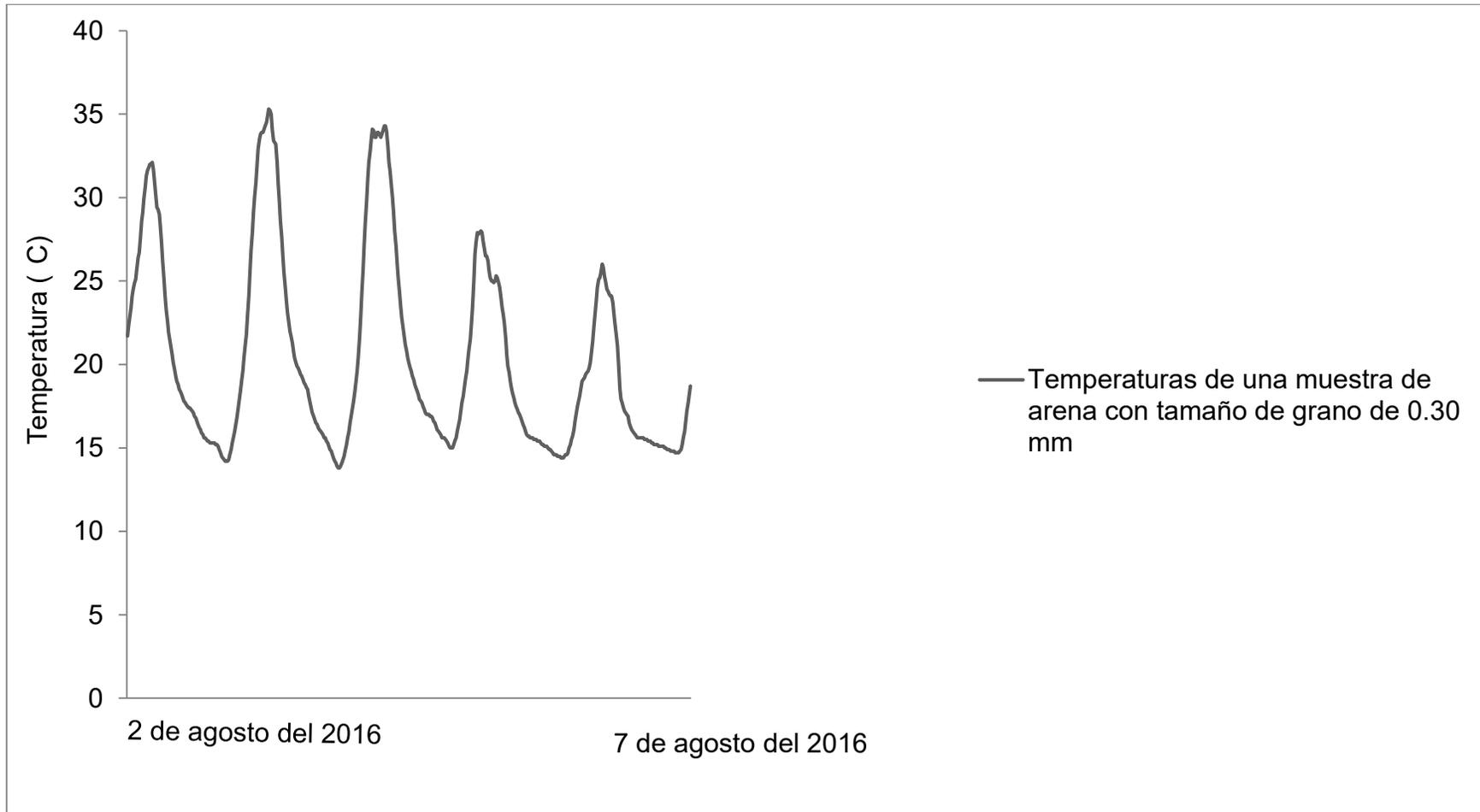
Para la segunda etapa.

Aunque ya seleccionan los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia) por su SEER, EER, HSPF, COP o A.F.U.E. no se tiene una etapa metodológica que integre la eficiencia energética, el desarrollo tecnológico, el diseño de la red de tuberías hidráulicas, de distribución de aire y de flujo de refrigerante. Además dentro de esta etapa se emiten sugerencias que permitirán seleccionar componentes del sistema y que favorecerán la disminución del consumo de electricidad como son las rejillas de suministro y retorno de aire, los filtros, los dispositivos de control de temperatura y humedad y actuadores. Estos componentes influyen de manera directa en el aumento del consumo de electricidad de estos sistemas ya que en algunas ocasiones se tienen grandes recorridos de tuberías de agua, refrigerante y conductos. Aunque en la actualidad se diseñan y calculan estas tuberías y conductos no se sigue una metodología que promueva la disminución del consumo de electricidad y gas L.P. o natural.

Para la tercera etapa.

Se deben realizar más estudios del perfil de temperaturas para otras áreas de distintas partes del mundo y para el caso específico del sistema híbrido sostenido con energía geotérmica de baja temperatura. Este estudio debe ser realizado a diferentes tamaños de grano como los mostrados en la figura 4.14 del capítulo 4, la figura A3 del anexo A y la figura 6.3.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES



6.3. Temperaturas de la arena con tamaño de grano de 0.30 mm medidas entre el 2 y el 7 de agosto del 2016.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

En la gráfica de la figura 6.2 se puede observar que el tamaño de grano influye en la temperatura de la arena. Esto puede favorecer la captación de calor cuando el sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) opere en el modo de calentamiento, ya que la fuente de calor, que es el talud de arena captará más calor y el compresor operará menos tiempo. Todo ello contribuirá con la disminución de la capacidad del sistema fotovoltaico aislado y del banco de baterías porque el CETD tenderá a disminuir y por consecuencia el total de energía generada estacionalmente.

Los sistemas híbridos (HVAC de alta eficiencia energética) pueden ser sostenidos con varias energías renovables como sucedió en el edificio del caso de estudio que fue sostenido con energía geotérmica de baja temperatura y energía solar.

Por otra parte, el talud de arena debe ser cubierto preferiblemente con una placa de vidrio de 6 mm en lugar de una cubierta plástica de ETFE. Aunque el Etileno-TetraFluoroEtileno es un polímero termoplástico resistente a la radiación ultravioleta, este puede experimentar degradación y aberturas lo que ocasionará que la humedad del depósito de arena aumente en clima lluvioso. Para el caso que se muestra en la figura 6.4 el periodo de degradación de la cubierta de polietileno fue de 7 de agosto al 13 de noviembre del 2016.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES



6.4. Muestra de arena húmeda con cubierta de polietileno degradado y con abertura por la radiación ultravioleta.

Partiendo del diagrama de isorrequerimientos se recomienda no agregar agua al talud de arena en países con frío extremo, esto para evitar que se congele el agua cuando la temperatura del aire exterior baje y el sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) opere en el modo de calentamiento extrayendo así el calor del talud de arena. También se deberá cerrar el sistema por goteo y retirar la cubierta de material ETFE.

Los sistemas híbridos (HVAC sostenidos con energías renovables) de tipo bomba de calor deberán recibir los avances tecnológicos que van teniendo los sistemas activos (HVAC de alta eficiencia energética) como por ejemplo operar de acuerdo con la variación de la temperatura del refrigerante.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Abdul, F., Mofarhi, S., Abdulwahab, Y., and Ali, Z. (2016). The Study of Sustainable Green HVAC Systems in Health Care Facilities. *Journal of Architectural Engineering Technology*, 5(1), 1–10. <http://doi.org/10.4172/2168-9717.1000160>.

Ahn, B-C. (2011). *Developments in Heat Transfer*. Shanghai., China: INTECH

AHRI (2008). Standard 210/240 performance Rating of Unitary Air Conditioning and Air Source Heat Pump Equipment. VA, USA: Air Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute.

Aksamija, A. (2009). Context based design of double skin facades, climatic considerations during the design process. *Perkins+Will research journal*, 1(1), 54-69.

Alfonso, C. (2006). Recent advances in building air conditioning systems. *Applied thermal engineering*, 26, 1961-1971.

Arce, R. (2009). *Aparatos y espacios que consumen más energía*. Disponible en: http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/espacio_aparatos. Accesado el día 29 de diciembre del 2012.

ASHRAE. (2001). Environmental quality. In American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Ed.), *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (SI, pp. 1–891). Atlanta: ASHRAE Handbook Committee. Recuperado de https://mega.co.nz/#!cQBmyCST!BAeK_S1TGtXlvJzvRIp1YROi80xox2Xr2K3txVxL0uE

ASHRAE (Ed.). (2000). HVAC System analysis and selection. In *ASHRAE Handbook-HVAC systems and equipment* (p. 1.3). Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Recuperado de www.pupuol.com

ASHRAE (2007a). Solar energy use. In ASHRAE (Ed.), *ASHRAE handbook-HVAC applications* (p. 33.1-33.27). Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASHRAE (2007b). Geothermal energy. In ASHRAE (Ed.), *ASHRAE handbook-HVAC applications* (p. 33.1-33.27). Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAE (2014). Standard for the Design of High-Performance Green Buildings, except Low-Rise Residential Buildings 189.1-2014. GA, USA: ANSI/ASHRAE/USGBC/IES.

ASHRAE (2010). Thermal environmental conditions for human occupancy Standard 55-2010. GA, USA: ANSI/ASHRAE.

ASHRAE. (2016). ASHRAE Terminology | ashrae.org. Accedido el día 14 de octubre del 2016, de <https://www.ashrae.org/resources--publications/free-resources/ashrae-terminology>.

Askeland, D. (1987). *La Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Distrito Federal, México: Grupo Editorial Iberoamérica.

Auliciems, A. (1983). Psycho-Physiological criteria for Global Thermal Zones of Building Design; in Proceeding 9th International Society of Biometeorology Congress Part 2. *International Journal of Biometeorology*, 8 (2), 69-86.

Baetens, R., Jellea, B.P., and Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43, 761–769.

Bakker, M.; Zondag, H.; Elswijk, M.; Strootman, K.; and Jong, M. (2005). Performance and cost of a roof sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump. *Solar energy*, 78, 331-339.

Ball State University (2012). *Green Campus*. Disponible en: http://www.sitecorecms.bsu.edu/About/Geothermal/Green_Campus.aspx. Accedido el día 02 de abril del 2012.

Barber, S. (2012). History of Passive Solar Energy. *Explorations*, 7, 2-13.

Barragán, M.; Arellano, V.; y García, A. (2011). Uso directo de la energía geotérmica en acondicionamiento de espacios: Bombas de Calor Geotérmicas. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas*, 35 (4), 166-168.

Brachmann, S. (2015). *The Evolution of Air Conditioning Technology*. Disponible en: <http://www.ipwatchdog.com/2014/06/20/the-evolution-of-air-conditioning-technology/id=50138/> [Accesado el día 17 de mayo del 2015].

Bell and Gosset (2015). Circulators, Maintenance-Free Circulators, Series PL. Disponible en: <http://documentlibrary.xylemappliedwater.com/wp-content/blogs.dir/22/files/2012/07/a-50p.pdf> [Accesado el día 14 de junio del 2015].

Bernier, M. (2002). Uncertainty in the design length calculation for vertical ground heat exchanger. *ASHRAE Transactions*, 108 (1), 939-944.

BIBLIOGRAFÍA

Bojić, M., Johannesb, K., and Kuznik, F. (2014). Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall. *Energy and Buildings*, 70, 279–286.

Bojórquez, G. (2010). *Confort térmico en exteriores: actividades en espacios recreativos, en clima cálido seco extremo*. Tesis de doctorado, Universidad de Colima, Colima, México.

Borbón, A. Cabanillas, R. y Pérez, J. (2007). *Variación de la resistencia térmica en bloque de concreto hueco para clima extremoso (caso de invierno y verano)*. Documento presentado en la XXXI Semana Nacional de Energía Solar. Zacatecas, Zacatecas, México.

BPIE (2001). Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings. Brussels, Belgium: Buildings Performance Institute Europe.

Campbell, G.S. y Norman, J.M. (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics (2 nd. Ed.)*. New York, USA: Springer-Verlag.

Cameron, G. (2017). Study of thermal behavior of wet sand. *Soil Research*. Victoria: CSIRO. Recuperado de <http://www.publish.csiro.au/nid/84/aid/1795.htm>

Carrier (2009). *Manual de aire acondicionado*. Barcelona, España: Marcombo.

CCA (2008). Edificación sustentable en América del Norte. Quebec, Canadá: Comisión para la Cooperación Ambiental.

Catálogo solar (2015). Módulos fotovoltaicos. Disponible en: <http://www.catalogosolar.mx/producto/335-panel-solar-policristalino-shine-solar-300-watts>. [Accesado el día 15 de junio del 2015].

Cayuela, A. and Pilon A. (2015). Test lab for sustainability. *High performing building*, 34-43.

Ceballos, F. (2012). *La metodología para la sustentabilidad energética: la vivienda net zero energy*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.

Çengel, Y. y Boles, M. (2003). *Termodinámica (4ª Ed.)*. Distrito Federal, México: Mc Graw Hill.

Çengel, Y. (2004). *Transferencia de Calor (2ª Ed.)*. Distrito Federal, México: Mc Graw Hill.

BIBLIOGRAFÍA

CEPSA (2001). *Manual de instalaciones de GLP*. Madrid, España: CEPSA, ELF GAS.

Chambre Régionale de Commerce et d'Industrie (2008). *Les matériaux à changement de phase, Dossier thématique Rhône-Alpes*, France, 2.

Cho, J.; Shin, S.; Kim, J.; and Hong, H. (2014). Development of an energy evaluation methodology to make multiple predictions of the HVAC&R system energy demand for office buildings. *Energy and buildings*, 80, 169-183.

Chua, KJ., Chou, SK., and Yang, WM. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied energy*, 87, 3611-3624.

Climablock (2016). Bloque aislante. <http://www.climablock.com/Construccion%20Sostenible-02.06-Inercia-termica-Bloque-aislante.htm> [Accesado el día 13 de noviembre del 2016].

Comisión Federal de Electricidad (2012). *Tarifas*. Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetutarifa/Paginas/Tarifas.aspx>. [Accesado el día 14 de octubre de 2011].

CNA (1981-2000). *Normales climatológicas*. Normales climatológicas de Tacubaya. Disponible en: <http://www.smn.cna.gob.mx/observatorios/historica/tacubaya.pdf>. [Accesado el día 13 de junio del 2014].

Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía (2010). *Aparatos*. Disponible en: http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/espacio_aparatos Accesado el día 30 de junio del 2011.

CONERMEX (2015). Baterías y gabinetes. Disponible en: http://www.conermex.com.mx/files/file/HojasTecnicas/03_Baterias/31H.pdf

Daikin (2015). History, Chronicle of Daikin's progress from founding in 1924 to present day. Disponible en <http://www.daikin.com/about/corporate/history/index.html>.

DEFRA (2005). *Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions*. Disponible en: <http://www.defra.gov.uk/Environment/business/envrp/gas/envrpgas-annexes.pdf>

De Garrido, L. (2014). *Arquitectura energía-cero*. Barcelona, España: Instituto Monsa.

BIBLIOGRAFÍA

Diario Oficial (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2006, Características y procedimientos de identificación, clasificación y listado de residuos peligrosos. Distrito Federal, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Diario Oficial (2008). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-ENER/SCFI-2008, Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto. Límites, métodos de prueba y etiquetado. Distrito Federal, México: Secretaría de Energía.

Diario Oficial (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-023-ENER-2010, Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido, descarga libre y sin conductos de aire. Distrito Federal, México: Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía.

Diario Oficial de la Federación (29 de septiembre del 2011). *Resolución número Res/377/2011*. Disponible en:

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5213394&fecha=10/10/2011

DOE, BTO y NREL (2016). *Energy Plus versión 8.5.0*. Disponible en: <https://energyplus.net/>.

EIA. (2009). Residential Energy Consumption Survey (RECS). Consultado el 4 de octubre del 2016 de <http://www.eia.gov/consumption/residential/index.cfm>.

EIA (2010). Geothermal Heat Pump Manufacturing Activities 2009. Washington, D.C, USA: Energy Information Administration.

EIA (2014). How much electricity is used for cooling in the United States? Disponible en: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=98&t=3>. [Accesado el día 26 de septiembre del 2014].

Eicker., D. and Pietruschka., D. (2009). Design and performance of solar powered absorption cooling systems in office buildings. *Energy and buildings*, 41, 81-91.

Eicker, U., Schumacher, J., Vorschulze, C., and Pietruschka, D. (2007). Potential of geothermal heat exchangers for office building climatisation. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century. Crete island, Greece.

Energy guide (2012). *Furnaces*. Disponible en: <http://www.energyguide.com>

BIBLIOGRAFÍA

Ericsson, K. and Jernqvist, A. (1989). Heat transformer with self-circulation: design and preliminary operational data. *International Journal of Refrigeration*, 12 (1), 15-19.

Erie (1998). Pop top Series Motorized Actuator and valve. Wisconsin, USA: Erie Controls.

Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Doctoral Thesis, University of Lund, Lund, Sweden.

Estrada, V. y Almanza, R. (2005). Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. Distrito Federal, México: Series del Instituto de ingeniería, UNAM.

Fan., Y. Luo., L. and Souyri., B. (2007). Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1758–1775.

Fanger, O. (1972). *Thermal comfort*. New York, U.S.A: Mc Graw Hill.

Fasiuddin, M. and Budaiwi, I. (2011). HVAC system strategies for energy conservation in commercial buildings in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 43, 3457-3466.

Federal Register (2001). Energy Conservation Program for Consumer Products: Central Air Conditioners and Heat Pumps Energy Conservation Standards; Final Rule. Washington, USA: Department of Energy.

Fernández, A. (2007). Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States Midwest. *Solar Energy*, 81(5), 581-593.

Fernández, F. (1994). Clima y confortabilidad humana. Aspectos metodológicos. *Serie Geográfica*, (4), 109-125.

Fong, K.; Chow, T.; Lee, C.; Lin, Z.; and Chan, L. (2010). Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. *Solar energy*, 84, 227-244.

Fronius (2013). Fronius IG Plus PVInverter. Michigan, USA: Fronius LLC Solar Electronic Division.

BIBLIOGRAFÍA

Fuentes, VA. (2009). *Modelo de análisis climático y definición de estrategias de diseño bioclimático para diferentes regiones de la República Mexicana*. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Distrito Federal, México.

García, I., Morillón, D., Raslan, R., and Ruyssevelt, P. (2014). Modelling the energy and exergy utilisation of the Mexican non-domestic sector: A study by climatic regions. *Energy Policy*, 77, 191-206.

Ge, F., Guo, X., Liu, H., Wang, J., and Lu, C. (2013). Energy performance of air cooling systems considering indoor temperature and relative humidity in different climate zones in China. *Energy and buildings*, 64, 145-163.

Baruch, G. (1984). Passive and hybrid cooling systems - a position paper. In A. Bowen and S. Yannas (Eds.), *Passive and low energy ecotechniques applied to housing, Proceedings of the Third International PLEA Conference* (pp. 620–626). Mexico: Pergamon Press. Consultado en http://repositorio.inecc.gob.mx/ae/ae_001328_-1.pdf

Gonçalves, H.; Rodriguez, C.; and Aelenei, L. (2012). SOLAR XXI: A Portuguese Office Building towards Net Zero-Energy Building. *The REHVA European HVAC Journal*, 49 (3), 34-40.

Graves, R., VanHarmelen, C., Cortese, A., DiNola, R., Clem, S., and Heider, E. (2014). Net Zero and Living Building Challenge Financial Study: A Cost Comparison Report for Buildings in the District of Columbia. Washington, USA: International Living Future Institute, New Buildings Institute and SKANSKA.

Grossman, G. (2002). Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. *Solar energy*, 72(1), 53-62.

Gutiérrez, L., Maya, R., and Quijano, L. (2010). *Current Status of Geothermics in Mexico*. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia.

Hamdhan, I., and Clarke, B. (2010). *Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils*. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia.

Harvey, L.D.D. (2009). Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples. *Energy Efficiency*, 2, 139–163.

Hassan, A. (2010). *Phase Change Materials for Thermal Regulation of Building Integrated Photovoltaics*. Doctoral Thesis, Dublin Institute of Technology, Dublin Ireland.

BIBLIOGRAFÍA

Helm, M. Keil, C. Hiebler, S. Mehling, H. and Schweigler, C. (2009). Solar heating and cooling system with absorption chiller and low temperature latent heat storage: Energetic performance and operational experience. *International Journal of Refrigeration*, 32, 596-606.

Henning, H-M. (2007). Solar assisted air conditioning of buildings-an overview. *Applied thermal engineering*, 27, 1734-1749.

Hernández, V.; Morillón, D.; Best, R.; Fernández, J.; Almanza, R.; and Chargoy, N. (2006). Experimental and numerical model of wall like solar heat discharge passive system. *Applied Thermal Engineering*, 26 (17-18), 2464-2469.

Hernández, V. and Morillón, D. (2013). Analytical model for double skins roofs. *Thermal applied engineering*, 60, 218-224.

Hernández, E.; Tejeda, A. y Reyes, E. (1991). Atlas solar de la República Mexicana. Xalapa, Veracruz: Editorial Universidad Veracruzana y Universidad de Colima.

Ho, K. and Strand, R. (2008). The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and buildings*, 40(4), 486-494.

Honeywell (2009). Installation Guide FocusPRO TH600. MN, USA: Honeywell International Inc.

Hong, T. and Xiaobing, L. (2010). Comparison of energy efficiency between variable refrigerant flow systems and ground source heat pumps systems. *Energy and Buildings*, 42 (5), 584-589.

IDAE (2010). Guía técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. Madrid, España: Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

IEEM (2011). Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos. Distrito Federal, México. Secretaría de Energía y Agencia Internacional de Energía.

Indalum (2006). Consideraciones técnicas para la selección de una ventana térmica. Santiago de Chile, Chile: IBS Indalum.

INECC (2013). Inventario Nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990-2010. Distrito Federal, México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

INEGI (2015). Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera: EMIM: SCIAN 2007. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

BIBLIOGRAFÍA

INEGI (2011). Encuesta Industrial Anual 2007-2008. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INFONAVIT (2009). Listado de Regiones Bioclimáticas. Distrito Federal, México: Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores.

Isaac, M. and Van Vuuren. D. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37, 507-521.

Instituto de Investigaciones Eléctricas (1990). Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor. Cuernavaca, Morelos, México.

Jenkins, D.; Liu, Y.; and Peacock, A. (2008). Climatic and internal factors affecting future UK office heating and cooling energy consumptions. *Energy and buildings*, 40, 874-881.

Johnson Controls (2007). Caso de estudio, Asociados en Diseño Integrado. California, Estados Unidos: Johnson Controls.

Jugdoyal, K. (2013). *Heat pumps for larger buildings*. Brussels. Consultado en www.leonardo-energy.org/node/156921

Jutglar, L. Miranda, AL y Virrarubia, M. (2011). *Manual de calefacción (1ª Ed.)*. Barcelona, España: Marcombo.

Kalogirou, S. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 231–295.

Kaushika, N.D., and Sumathy K. (2003). Solar transparent insulation materials: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7, 317–351.

Kumari, D. (2009). *A study on the effect of moisture on strength characteristics of river sand*. Bachelor Thesis of Technology, National Institute of Technology Rourkel, New Delhi, India.

Lam, J., Chan, RT., Tsang, C., and Li, D. (2004). Electricity use characteristics of purpose-built office buildings in subtropical climates. *Energy Conversion and Management*, 45, 829-844.

Lamp, P., and Ziegler, F. (1998). European research on solar-assisted air conditioning. *International Journal of Refrigeration*, 21(2), 89-99.

Leibar, I. (2003). Climatización geotérmica. *Revista ReHabitat*, 9 (4), 25

BIBLIOGRAFÍA

Lo Russo, S., and Civita, MC. (2009). Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: A case study. *Geothermics*,38, 335–345.

Maldonado, D. (2009). La energía de la educación. *BIT Soluciones energéticas*, 67 (7) 40-43.

Mateus., T. and Oliveira., AC. (2009). Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different building types and climates. *Applied energy*, 86, 949–957

Matzarakis, A. (2007). Climate, thermal comfort and tourism: Climate Change and Tourism – Assessment and Coping Strategies. *Maastricht*, 140-154.

Mazloumi, M. Naghashzadegan, M. and Javaherdeh, K. (2008). Simulation of solar lithium bromide- water absorption cooling system with parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*, 49, 2820-2832.

Mazria, E. (1979). *The passive solar energy book*. Emmaus, PA: Rodale Press.

McNeil, M., and Letschert, V. (2008). Future Air Conditioning Energy Consumption in Developing Countries and what can be done about it: The Potential of Efficiency in the Residential Sector. *eScholarship*, 6(306), 1-14.

Mena, R.; Rodríguez, F.; Castilla, M.; and Arahál, M.R. (2014). A prediction model based on neural networks for the energy consumption of a bioclimatic building. *Energy and buildings*, 82, 142-155.

Ministre de Ressources Naturelles Canada (2006). Analyse de projets de Pompes á Chaleur Géothermique. Varennes, Canada: MRNC

Mitsubishi electric (2015a). Gama-vrf-city-multy. Disponible en: <http://www.mitsubishipro.com/media/226453/city%20multi%20catalog%20march%202015.pdf>

Mitsubishi electric (2015b). History. Disponible en: <http://www.mitsubishielectric.com/company/about/history/index.html>. [Accesado el día 18 de mayo del 2015].

Monteith, J.L and Unsworth, M.H (2013). *Principles of Environmental Physics Plants, Animals, and the Atmosphere (4 th. Ed.)*. Oxford, UK: ELSELVIER.

Mora, L. (2013). *Acondicionamiento Térmico de Aire mediante el uso de Energía Geotérmica*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Martín, Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

Morillón, D. (1993). *Bioclimática: Sistemas Pasivos de Climatización*. Guadalajara, México: Universidad de Guadalajara.

Morillón, D. Saldaña, R. and Tejeda, A. (2004). Human bioclimatic atlas for Mexico. *Solar Energy*, 76(6), 781-792.

Morillón, D. (2007). Más allá del cambio climático: las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global. En J. Urbina y J. Martínez (Eds.), *Impacto del cambio global ambiental en el sector residencial*, (pp.249-260). Distrito Federal, México: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales/ Instituto Nacional de Ecología/ Universidad Nacional Autónoma de México/Facultad de Psicología.

Monteith, J.L. and Unsworth M.H. (2013). *Principles of Environmental Physics, Plants, Animals, and the Atmosphere* (4th Ed.). CA, USA: Academic Press, ELSEVIER.

Mustafa, A. (2008a). Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1562-1587.

Mustafa, A (2008b). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Reviews*, (12), 344-371.

Myors, P. O'Leary, R. and Helstroom, R. (2005). *Multi-Unit Residential Buildings energy and Peak Demand Study*. Sidney, Australia: Energy Australia and Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources.

Nagengast, B. (2002). 100 Years of Air Conditioning. *ASHRAE Journal*, 44(6), 44-46.

NBI (2011). *Sensitivity Analysis: Comparing the Impact of Design, Operation, and Tenant Behavior on Building Energy Performance*. California, USA: New Buildings Institute.

National Climate Change Secretariat, National Research Foundation, & Building and Construction Authority. (2013). *Building Energy Efficiency, R&D Roadmap*. Singapore. Disponible en https://www.nccs.gov.sg/sites/nccs/files/Roadmap_BEE_20140729.pdf

Neville, A. (1999). *Tecnología del concreto*. Distrito Federal, México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Nicolas, J. and Humphreys (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings*, 34, 563-572.

BIBLIOGRAFÍA

OECD y IEA (2013). *Transition to Sustainable Buildings*. Paris. Disponible en: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Building2013_free.pdf

OCDE y IEA. (2016a). *Indicadores de Eficiencia Energética: Fundamentos Estadísticos*. Paris. Disponible en: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IndicadoresdeEficienciaEnerg%C3%A9tica_FundamentosEstad%C3%ADsticos.pdf.

OCDE y IEA. (2016b). Mexico energy outlook. Paris. Disponible en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/mexico-energy-outlook.html>.

Ochs, M.; Haller, A.; and Simmler., H. (2000). *A simple method to calculate the heat gains of solar wall heating with transparent insulation*. Third ISES Europe Solar Congress EuroSun 2000, Kopenhagen, Dänemark.

Olgay, V. (2013). *Arquitectura y Clima, Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas (8ª. reimp.)*. Barcelona, España: Gustavo Gili, SL.

Ouyang, J.; Wang, C.; Li, H.; and Hokao, K. (2011). A methodology for energy efficient renovation of existing residential building in China in case study. *Energy and buildings*, 43, 2203-2210.

Palacios, JL (2012). *La casa ecológica, Cómo construirla*. Distrito Federal, México: Trillas.

Pan, Y.; Huang, Z.; and Wa, G. (2007). Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. *Energy and buildings*, 39, 651-657.

Panasonic (2015). ECONAVI de Panasonic, tecnología ECO e Inteligente. Disponible en: <https://www.panasonic.com/pa/corporate/news/articles/201403-econavi-de-panasonic--tecnologia-eco-e-inteligente.html#.VWEghE9Viko>.

Papadopoulos, A.; Oxizidis, S.; and Kyriakis, N. (2003). Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air-conditioning sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7, 419–438.

Pareja, M. (2010). *Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada (2da. Ed.)*. Barcelona, España: Marcombo.

Paul, JK (1979). *Passive solar energy design and materials*. (41th. ed.). Park Ridge, NJ: Noyes Data Corporation.

BIBLIOGRAFÍA

Pérez-Lombard, L.; Ortíz, J.; and Pout, C. (2008). A review on building energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40, 394-398.

Philappacopoulos, A. and Berndt, M. (2001). Influence of rebounding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps. *Geothermic*, 30(5), 527-545.

Phocos (2013). MPPT 100/30, Registrador del Pico Máximo de Corriente. La Paz, Bolivia: Phocos Latin America S.R.L.

PICC (1996). Directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC) para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996. Distrito Federal, México: Grupo Intergubernamental sobre Cambios Climáticos (IPCC), Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y Agencia Internacional de la Energía (AIE)

Platzer, W. (1995). Advances in transparent insulation technology. *Solar Energy*, 349-354.

Platzer, W. (1999) Energetische Bewertung von Transparenter Wärmedämmung. *Bauphysik*, 21(2) 64-76.

Plazola, A. (2012). Clasificación de los edificios atendiendo a sus funciones, o base social que los origina. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/26132347/Clasificacion-de-Los-Edificios>. [Accesado el día 20 de septiembre del 2017].

Priyadarsini, R., Xuchao, W., and Siew Eang, L. (2009). A study on energy performance of hotel buildings in Singapore. *Energy and buildings*, 41, 1319-1324.

Ramgopal, M. (2009). *History of Refrigeration*. Kharagpur, India: Indian Institute of Technology Kharagpur.

Rangel, V. (2010). *Celdas y Módulos Fotovoltaicos*. Curso presentado en la XXXIV Semana Nacional de Energía solar. Guanajuato, Guanajuato, México.

Ressources naturelles Canada (2002). Les systèmes géothermiques commerciaux: Guide de l'acheteur. Ottawa, ON, Canada: Centre de la technologie de l'énergie.

Ressources naturelles Canada (2002). Les systèmes géothermiques résidentiels: Guide de l'acheteur. Ottawa, ON, Canada: Centre de la technologie de l'énergie.

Ressources naturelles Canada (2004). Le chauffage au gaz. Ottawa, ON, Canada: Office de l'efficacité énergétique.

BIBLIOGRAFÍA

Revista ARQHYS. (2012). Clasificación de los edificios. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/edificios-clasificacion.html>. [Accesado el día 12 de septiembre del 2017].

RHEEM (2013). *Gas furnaces*. Disponible en: http://www.rheem.com/products/heating_and_cooling/Gas_furnaces. [Accesado el día 26 de mayo de 2014].

RHEEM (2013). Rheem Classic RGTM Series Two-Stage Downflow/Horizontal Gas Furnaces. Arkansas, USA: RHEEM

Riffat, SB and Qiu, G. (2004). Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapor compression and absorption air conditioners. *Applied thermal engineering*, 24, 1979-1993.

Rincón, J., Almaso, N., and González, E. (2001). Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions. *Solar Energy*, 71(1), 71-80.

Rosas, J. (2011). *Evolución del consumo y gasto económico de energía en el sector residencial (urbano-rural) mexicano 1996-2006*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.

Saito, T., Hamamoto, S., Ei Mon, E., Takemura, T., Saito, H., Komatsu, T. and Moldrup, P. (2014). Thermal properties of boring core samples from the Kanto area, Japan: Development of predictive models for thermal conductivity and diffusivity. *Soils and foundations*, 54 (2), 116-125.

Salazar, S. (2011). Construcción y desarrollo sostenible, arquitectura bioclimática. Tesis de maestría, Universidad de Almería. Almería, España.

Salvador, M. and Grieu, S. (2012). Methodology for the design of energy production and storage systems in buildings: Minimization of the energy impact on the electricity grid. *Energy and buildings*, 47, 659-673.

Sánchez, MA (2013). *Energía Solar Fotovoltaica*. Distrito Federal, México: Limusa.

Santoli, L.; Mancini, F.; and Rossetti, S. (2014). The energy sustainability of Palazzo Italia at EXPO 2015: Analysis of and nZEB building. *Energy and Buildings*, 82, 534-539.

Santoyo, S.; Barragán, R.; and Holland, F. A. (2006). *Bomba de calor para purificación de salmuera geotérmica*. Documento presentado en el Congreso Anual de la Asociación de Geotérmica Mexicana. Cerro Prieto, B. C. México.

BIBLIOGRAFÍA

Schellena, L., Loomansa, M.G.L.C., De Wita, M.H., Olesen, B.W., Van Marken Lichtenbel, W.D. The influence of local effects on thermal sensation under non-uniform environmental conditions — Gender differences in thermophysiology, thermal comfort and productivity during convective and radiant cooling. *Physiology and Behavior*, 107 (2), 252–261.

Secretaría de Energía. (2016a). Prospectiva del Sector Eléctrico. Informe, México: SENER. Disponible en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf

Secretaría de Energía y Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2016). Estudio de caracterización del uso de aire acondicionado en vivienda de interés social. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182038/Estudio_de_Caracterizacion_del_uso_de_Aire_Acondicionado.pdf

Servicio Meteorológico Nacional (1951-2010). Normales climatológicas de la estación 9016 Cuajimalpa. Disponible en: http://www.smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=179&tmpl=component. [Accesado el día 13 de junio del 2014].

Shonder, J. and Beck, J. (1999). *Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data Using a Parameter Estimation Technique*. Document published in ASHRAE Winter Meeting 7. Chicago, Illinois, USA.

Skygreen (2014). Aire acondicionado híbrido termosolar. Disponible en: http://www.skygreen.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=81&Itemid=38. [Accesado el día 07 de junio del 2014].

Salomone, L. and Marlowe, J. (1989). Soil and Rock Classification for the Design of Ground-Coupled Heat Pump Systems, Field Manual. *International Ground Source Heat Pump Association*, 1-55.

Stuart, JF., Bale VR., and Rosen MA. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied energy*, 101, 341-348.

Szokolay, S. (1980). Environmental Science Handbook for architects and builders. *The Construction Press*, 532.

Szokolay, S. (2004). *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design (1ra. Ed.)*. London, England: ELSEVIER Architectural Press.

BIBLIOGRAFÍA

Tang., YD. and Liu., XH. (2010). Energy consumption analysis of liquid desiccant air conditioning system for industrial building. *HVAC Journal*, 40(4), 131-135.

Tejeda, A. (1991). An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmósfera*, (4), 139 – 144.

Tejeda, A. y Gómez-Azpeitia, G. (compiladores) (2015). *Prontuario Solar de México*. Colima, México: Editorial Universidad Veracruzana y Universidad de Colima.

Tennokese, K.; Kõiv, A.; Mikola, A.; and Vares, V. (2013). The Application of the Ground Source and Air-to-Water Heat Pumps in Cold Climate Areas. *Smart Grid and Renewable Energy*, (4) 473-481.

Torres, A. y Morillón, D. (2006a). *Optimización de los componentes de un sistema híbrido para calentar un espacio utilizando como fuente de calor el subsuelo*. Documento presentado en la XXX Semana Nacional de Energía Solar. Puerto de Veracruz, Veracruz, México.

Torres, A. y Morillón, D. (2006b). *Análisis de requerimiento para el calentamiento de edificios ubicados en clima frío, a partir de las características del subsuelo: caso Delegación Cuajimalpa*. Documento presentado en la XXX Semana Nacional de Energía Solar. Puerto de Veracruz, Veracruz, México.

Toshiba (2015). Nota de prensa de 1981, lanzamiento del split inverter. Disponible en: <http://www.toshiba-aire.es/toshiba-inventa/30-aniversario/nota-de-prensa-inverter>.

TRANE (1999). Fan and Coil. Model: HFCA Size 03-12. Wisconsin, USA: American Standard.

TRANE (2003). Kolman 500 Air Cooled Water Chiller con opción de bomba de calor. Wisconsin, USA: American Standard.

TRANE (2008). Packaged heat pumps, Voyager 12 ½-20 Tons, 60 Hz-R410a. Clarksville, USA: American Standard.

TRANE (2011). Geothermal Hydronic Heat Pump Product Data, XL Series T2GW. Texas, USA: American Standard.

TRANE (2015a). 100 Years of Focusing on Building Life. Disponible en: <http://www.trane.com/100years>. [Accesado el día 17 de mayo del 2015].

TRANE (2015b). Water Source Heat Pump Axiom Horizontal/Vertical—EXHF/EXVF½ - 6Tons – 60 Hz, High Efficiency. Disponible en:

BIBLIOGRAFÍA

http://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/equipment/unitary/water-source-heat-pumps/high-efficiency-h-v-wshp-1-1-2-to-6-tons/WSHP-PRC018F_EN_11252013.pdf. [Accesado el día 18 de junio del 2015].

TRANE (2015c). Water Source Heat Pump Axiom Water-to-Water-EXW 5 to 20Tons - 60 Hz. Disponible en: http://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/equipment/unitary/water-source-heat-pumps/water-to-water-wshp/WSHP-PRC022D-EN_04012015.pdf. [Accesado el día 18 de junio del 2015].

TRANE, DA, DOE, LBNL y HQ (2016). Simergy version 2.2. Disponible en: <https://simergy.d-alchemy.com/index.html>

Varela, R. (2012). Energía en México. *Energía hoy*, 8 (102), 56.

Vakiloroaya, V., Samali, B., Fakhar, A., and Pishghadam, K. (2014). A review of different strategies for HVAC energy saving. *Energy Conversion and Management*, 77, 738–754. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.023>

Visa, I., Moldovan, M; Comsit, M., and Duta, A. (2014). Improving the renewable energy mix in a building toward the nearly zero energy status. *Energy and buildings*, 68, 72-78.

Wang, L; Gwilliam, J.; and Jones, P. (2009a). Case study of zero energy house design in UK. *Energy and buildings*, 41, 1215-1222.

Wang, RZ; Ge TS; Chen, CJ; and Xiong, ZQ. (2009b). Solar sorption cooling systems for residential applications: Options and guidelines. *International Journal of Refrigeration*, 32, 638-660.

Wang, W; Katipamula, S.; Huang, Y.; and Brambley, M. (2013). Energy savings and economics of advanced control strategies for packaged air conditioners with gas heat. *Energy and Buildings*, 65, 497–507.

Wittwer, V. (1989). Translucent insulation for passive solar energy utilization in buildings. *Solar and Wind Technology*, 6(4), 419–426. [http://doi.org/10.1016/0741-983X\(89\)90060-X](http://doi.org/10.1016/0741-983X(89)90060-X).

Wittwer, V., & Platzer, W. (2000). Transparent thermal insulation materials and systems: State of the art and potential for the future. *High Temperatures - High Pressures*, 32(2), 167–182. <http://doi.org/10.1068/htwi5>.

BIBLIOGRAFÍA

Wong, I.L., Eames, P.C., and Perera, R. S. (2007). A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. *Solar Energy*, 81, 1058–1071.

Xiao, F., and Wang, S. (2009). Progress and methodologies of lifecycle commissioning of HVAC systems to enhance building sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1144–1149.

Yeang, K. (2001). *El rascacielos ecológico*. Barcelona, España: Gustavo Gili, SL.

Yin, Y., Qian, J., and Zhang, X. (2014). Recent advancements in liquid desiccant dehumidification technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 38–52.

Zeng, D. (2000). *Modeling of standing column well in ground source heat pump systems*. Thesis of Master of Science, Tongji University, Shanghai, P. R. China.

Zeng, H.; Diao, N.; and Fang, Z. (2002). A Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers. *Heat Transfer—Asian Research*, 31 (7), 560-563.

Zhu, Y.; Jin, X.; Fang, X.; and Du, Z. (2014). Optimal control of combined air-conditioning system with variable refrigerant flow and variable air volume for energy saving. *International Journal of Refrigeration*, 42, 14-25.

**ANEXO A. ESTUDIO ANALÍTICO Y
EXPERIMENTAL DE LA ARENA.
ECUACIONES PARA DISEÑAR EL
SERPENTÍN ENTERRADO.
SIMULACIONES DE UN SISTEMA
HÍBRIDO (HVAC SOSTENIDO CON
ENERGÍAS RENOVABLES) CON UN
PROGRAMA COMERCIAL.**

ANEXO A

Estudio analítico

En este anexo se derivó la ecuación que simula el comportamiento de la temperatura de la arena. Para complementar las ecuaciones sobre el estudio analítico del suelo, se presentan las expresiones matemáticas para el estudio del coeficiente de conductividad térmica, el porcentaje de humedad y velocidad de ganancias de calor del serpentín captador de calor del sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables).

Modelo matemático derivado para simular el comportamiento de la temperatura

Considerando que el suelo de arena se comporta como una placa plana semi-infinita que recibe ondas térmicas de calor, se tiene un modelo teórico en el cual se puede estimar el cambio de temperatura con respecto al tiempo y en régimen transitorio.

Derivación del modelo matemático

En la literatura revisada se derivó la ecuación 1.

$$G(z) = -k_{\text{arena_húmeda}}(z) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Montheith y Unsworth (2013) también sugirieron que la diferencia entre el flujo de calor a una profundidad z y cualquier capa de espesor δz puede ser escrita como sigue:

$$\frac{\partial G(z)}{\partial z} \delta z = \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_{\text{arena_húmeda}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \delta z \quad (2)$$

Montheith y Unsworth (2013) también propusieron la ecuación 3.

$$\rho_{\text{so}} c_{\text{so}} = \rho_s c_s X_s + \rho_l c_l X_l + \rho_g c_g X_g = \Sigma(\rho c X) \quad (3)$$

Montheith y Unsworth (2013) derivaron la ecuación 4.

$$\frac{\partial G(z)}{\partial z} \delta z = \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_{\text{arena_húmeda}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \delta z = - \frac{\partial (\rho_{\text{so}} c_{\text{so}} T)}{\partial t} \delta z \quad (4)$$

Montheith y Unsworth (2013) sugirieron calcular la difusividad térmica como $\alpha = k_{\text{arena_húmeda}} / \rho_{\text{so}} c_{\text{so}}$. α es aplicada a ecuación 4. Esto da como resultado la ecuación 5.

ANEXO A

$$\frac{\partial(T)}{\partial t} = \frac{-k_{\text{arena_húmeda}}}{-\rho_{\text{so}} c_{\text{so}}} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \frac{\partial z}{\partial z} \quad (5)$$

Entonces

$$\frac{\partial(T)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (6)$$

La ecuación 6 es modificada como sigue:

$$-\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial(T)}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

La ecuación 7 dividida por $-\alpha$ es

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \left(-\frac{1}{\alpha} \right) \frac{\partial(T)}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

La transformada de la Laplace es aplicada a la ecuación 8.

$$t_e(0,s) = L\{T(0,t)\} = \frac{T(0,t)}{s} \quad (9)$$

Entonces

$$st_e - T(t,0) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (10)$$

Por lo que reacomodando la ecuación 10 se tiene

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{st_e}{\alpha} = 0 \quad (11)$$

Y

$$y'' - \frac{st_e}{\alpha} = 0 \quad (12)$$

ANEXO A

$$\lambda^2 - \frac{st_e}{\alpha} = 0 \quad (13)$$

Entonces

$$\lambda^2 = \frac{st_e}{\alpha} \quad (14)$$

Y

$$\lambda = \pm \sqrt{\frac{st_e}{\alpha}} \quad (15)$$

Si $t_e = \frac{\omega}{2}$

La solución general de la ecuación diferencial es

$$T(z,t) = C_1 e^{\sqrt{\frac{\omega s}{2\alpha}} z} + C_2 e^{-\sqrt{\frac{\omega s}{2\alpha}} z} \quad (16)$$

Con $C_1=0$, t_e es la condición límite y $z \rightarrow \infty$. La ecuación 16 da por resultado

$$t_e(z,t) = C_2 e^{-\sqrt{\frac{\omega s}{2\alpha}} z} \quad (17)$$

La comparación del comportamiento de la temperatura de la arena húmeda con movimiento armónico simple es mostrada en la figura A1.

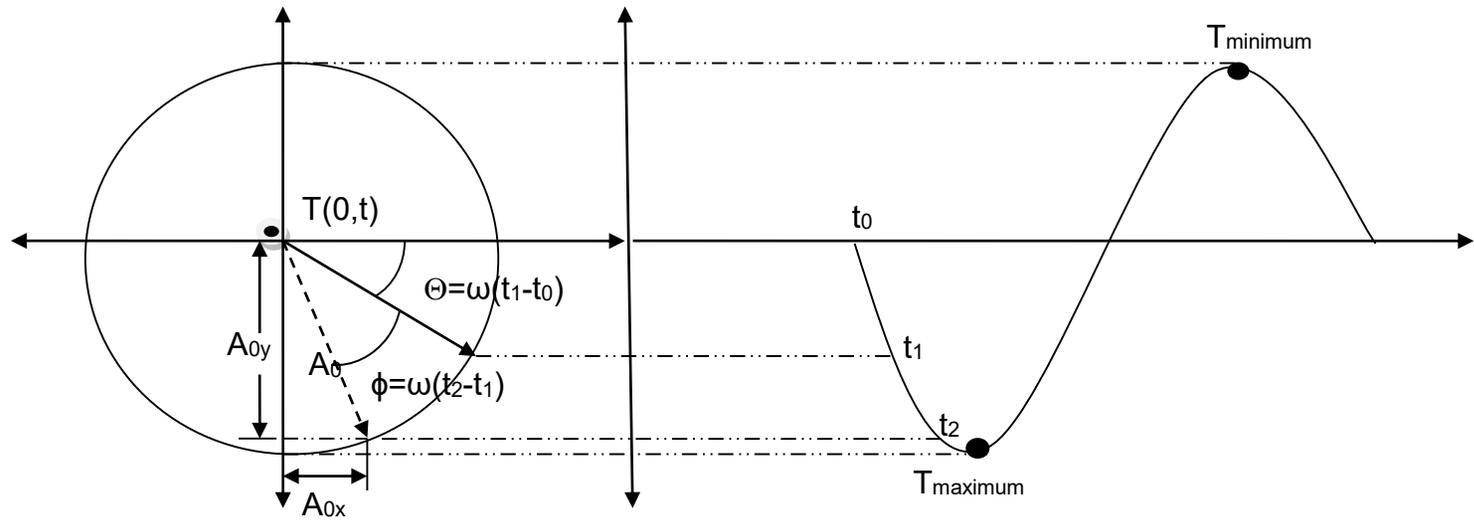


Figura A1. Comparación entre las temperaturas de la arena y el movimiento armónico simple.

ANEXO A

A_0 es calculada como sigue:

$$A_0 = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad (18)$$

De acuerdo con la figura A1.

$$\text{sen}(\omega\Delta t + \phi) = A_{0y} / A_0 \quad (19)$$

La arena húmeda podría ser asumida como un elemento finito, propiedades térmicas uniforme, y una temperatura de superficie con variación senoidal.

$$A_{0y} = A_0 \text{sen}(\omega\Delta t + \phi) \quad (20)$$

Y

$$A_{0y} = T(0,t) - T_{\text{sup.de_la_arena}} \quad (21)$$

Cuando la temperatura de la arena húmeda disminuye la amplitud de los cambios de temperatura en el sentido de las manecillas del reloj será calculada de la forma siguiente:

$$T(0,t) - T_{\text{sup.de_la_arena}} = A_0 \text{sen}(\omega\Delta t + \phi) \quad (22)$$

Y

$$T(0,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 \text{sen}(\omega\Delta t + \phi) \quad (23)$$

La ecuación 23 con $\Delta t = t - t_0$ es modificada como sigue:

$$T(0,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 \text{sen}[\omega(t_1 - t_0) + \phi] \quad (24)$$

Donde el tiempo t_0 de la primera temperatura y cambio de fase (34.6 días).

La ecuación 24 considera las condiciones $T(t,0) = 0$, $T(0,t) = T_0$ y $\phi = \omega(t_2 - t_1)$.

Aplicando la transformada de Laplace se tiene

$$L\{T(0,t)\} = \frac{T_{\text{sup.de_la_arena}}}{s} + A_0 \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (25)$$

Que equivale a

$$L\{T(0,t)\} = \frac{T_{\text{sup.de_la_arena}}}{s} + A_0 \omega \left(\frac{1}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (26)$$

La ecuación 26 es modificada con $t_e(0,s) = L\{T(0,t)\}$ como sigue:

$$t_e(0,s) = \frac{T_{\text{sup.de_la_arena}}}{s} + A_0 \omega \left(\frac{1}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (27)$$

Con C_2 de la ecuación 17, $t_e(0,s) = t_e(z,t)$, la ecuación 27 y la condición

$$C_2 = A_0 \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (28)$$

Se tiene

$$t_e(z,t) = \frac{T_{\text{sup.de_la_arena}}}{s} + A_0 \omega \left(\frac{1}{s^2 + \omega^2} \right) e^{-z\sqrt{\frac{\omega s}{2\alpha}}} \quad (29)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a la ecuación 29 se obtiene

$$T(z,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 \frac{\omega}{\omega} e^{-z\sqrt{\frac{\omega s}{2\alpha}}} \left[\text{sen}[\omega(t_1 - t_0) + \phi] \right] \quad (30)$$

La ecuación (30) puede ser presentada de la siguiente forma:

$$T(z,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 e^{\left(-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right)} \text{sen}\left\{\omega\left[(t_1 - t_0) + (t_2 - t_1)\right]\right\} \quad (31)$$

El periodo es calculado con la siguiente ecuación:

$$\tau = 2\pi / \omega \quad (32)$$

Y

$$\omega = 2\pi / \tau \quad (33)$$

La velocidad angular debe ser calculada como sigue (Campbell y Norman, 1998):

ANEXO A

$$\omega_{\text{día}} = \frac{2\pi}{24 \times 3600} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad / s} \quad (34)$$

ω es substituida en la ecuación 31.

$$T(z,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 e^{\left(-z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right)} \text{sen}\left\{7.27 \times 10^{-5} \left[(t_1 - t_0) + (t_2 - t_1)\right]\right\} \quad (35)$$

Y D^2 es es calculado como sigue (Montheith y Unsworth, 2013):

$$D^2 = 2\alpha / \omega \quad (36)$$

El nuevo arreglo de la ecuación 36 produce

$$\frac{1}{D^2} = \omega / 2\alpha \quad (37)$$

De acuerdo con la ecuación 37, la ecuación 35 es completada como sigue:

$$T(z,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 e^{\left(-z \sqrt{\frac{1}{D^2}}\right)} \text{sen}\left\{7.27 \times 10^{-5} \left[(t_1 - t_0) + (t_2 - t_1)\right]\right\} \quad (38)$$

Y

$$T(z,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 e^{\left(-\frac{z}{D}\right)} \text{sen}\left\{7.27 \times 10^{-5} \left[(t_1 - t_0) + (t_2 - t_1)\right]\right\} \quad (39)$$

Donde

$$\phi = \omega(t_2 - t_1) = \frac{(z_1 - z_2)}{D} \quad (40)$$

t_1 y t_2 son las veces que la onda alcance una temperatura máxima a una profundidad a una profundidad z_2 y la temperatura mínima a una profundidad z_1 . La ecuación 40 puede ser escrita como sigue:

$$\phi = \omega(t_2 - t_1) = -\frac{(z_2 - z_1)}{D} \quad (41)$$

Con $z_1 = 0$ y $z_2 = z$ la ecuación 41 es modificada como sigue:

$$\phi = \omega(t_2 - t_1) = -\frac{(z_2)}{D} = -\frac{z}{D} \quad (42)$$

Reacomodando la ecuación 39 tenemos

$$T(z,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 e^{\left(\frac{-z}{D}\right)} \text{sen} \left\{ \left[7.27 \times 10^{-5} (t_1 - t_0) \right] + \omega (t_2 - t_1) \right\} \quad (43)$$

La ecuación (43) puede ser modificada con la ecuación 42 como sigue:

$$T(z,t) = T_{\text{sup.de_la_arena}} + A_0 e^{\left(\frac{-z}{D}\right)} \text{sen} \left[7.27 \times 10^{-5} (t_1 - t_0) - \frac{z}{D} \right] \quad (44)$$

La difusividad térmica (α) puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{k_{\text{arenahúmeda}}}{\rho_{\text{arenahúmeda}} CE_{\text{arenahúmeda}}} \quad (45)$$

$k_{\text{arena húmeda}}$ fue investigada en algunos estudios experimentales ($2.01 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) [Hamdhan, I., and Clarke, B. (2010)]. $CE_{\text{arena húmeda}}$ es calculada como sigue:

$$CE_{\text{arenahúmeda}} = \frac{m_{\text{arena}} CE_{\text{arena}} + m_{\text{agua}} CE_{\text{agua}} + m_{\text{aire}} CE_{\text{aire}}}{m_{\text{arenahúmeda}}} \quad (46)$$

Donde $CE_{\text{arena}} = 800 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [10], $CE_{\text{agua}} = 4,180 \text{ Jkg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ at $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_{\text{agua}} = 997 \text{ kg/m}^3$ and $CE_{\text{aire}} = 718 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ at 300 K (Cengel y Boles, 2003).

$\rho_{\text{arena húmeda}}$ es calculada con la siguiente ecuación:

$$\rho_{\text{arenahúmeda}} = \frac{m_{\text{arenahúmeda}}}{V_{\text{arenahúmeda}}} \quad (47)$$

Y se propone que el $V_{\text{arena húmeda}}$ sea calculado con la siguiente ecuación:

$$V_{\text{arenahúmeda}} = \frac{\pi}{6} \left(\frac{d_G}{1000} \right)^3 n \quad (48)$$

El diámetro de grano (d_G) fue estimado en la sección de análisis granulométrico y n fue propuesto con 7.55×10^5 granos para el caso de la muestra de arena con tamaño de grano de 1.18 mm y 9×10^5 granos para la muestra de arena de $300 \text{ } \mu\text{m}$.

Conductividad térmica de la arena

Hamdhan y Clarke (2010) presentaron la siguiente expresión matemática que consideraba la masa de la arena, su calor específico, la masa el agua que se agrega y el calor específico del agua agregada:

$$\sum m_{\text{arenahúmeda}} CE_{\text{arenahúmeda}} = (m_{\text{arena}})(CE_{\text{arena}}) + (m_{\text{agua}})(CE_{\text{agua}}) \left[\frac{\text{J}}{\text{°C}} \right] \quad (49)$$

Hamdhan y Clarke (2010) también sugirieron un valor de CE_{arena} de 800 J/kg K. Y m_{agua} es la masa del agua que se agrega a la muestra y para el cual Çengel y Boles (2003) proponen un valor de CE_{agua} de 4,180 J/kg °C a una temperatura de 25 °C.

Como la cantidad de calor que la muestra pierde por conducción es igual a la cantidad de calor que disipa por convección, durante parte del mismo día y la noche (curva de decaimiento por enfriamiento de la arena húmeda) se pueden igualar las leyes de Fourier de conducción de calor para una placa plana de espesor e y la ley del enfriamiento de Newton, es decir

$$Q_{\text{conducción_arena}} = Q_{\text{convección_arena}} \quad (50)$$

O bien

$$\frac{-k_{\text{arena}} A_{\text{sup}} (T_{\text{sup}} - T_{\text{Base arena}})}{e} = h_{\text{arena}} A_{\text{sup}} (T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}}) \quad (51)$$

Por lo que el coeficiente de conductividad térmica ($k_{\text{arena_húmeda}}$) será

$$k_{\text{arena_húmeda}} = - h_{\text{arena}} e \left(\frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}}}{T_{\text{sup}} - T_{\text{Base arena}}} \right) \left(\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right) \quad (52)$$

Hamdhan y Clarke sugieren la ecuación 53 para estimar el coeficiente convectivo (h_{arena}) de transferencia de calor de la arena húmeda durante el periodo de enfriamiento. Esta ecuación evalúa la diferencia entre la temperatura más alta, registrada en la curva de enfriamiento y la temperatura más baja. Es decir

$$T_{\text{Alta}} - T_{\text{mínima}} = (T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}}) e^{\left(\frac{-h_{\text{arena}} A t}{\sum m_{\text{mezcla}} C_{p_{\text{mezcla}}}} \right)} \quad (C) \quad (53)$$

Despejando el coeficiente de transferencia de calor para la arena de la ecuación (53), se tiene

$$h_{\text{arena}} = - \frac{\sum m_{\text{mezcla}} C_{p_{\text{mezcla}}}}{A_{\text{sup}} t} \ln \left(\frac{T_{\text{Alta}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}}} \right) \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right) \quad (54)$$

Ecuación propuesta por Kumari (2009) para el cálculo del contenido de agua.

Para calcular el contenido de agua en porcentaje que tiene la muestra de arena se utilizará la ecuación 55.

$$\text{Contenido de agua} = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100 (\%) \quad (55)$$

Estudio experimental

Medición de la temperatura

Para tomar las lecturas de la temperatura de la arena se vertió una muestra de 317.11 g y se agregaron 100 mL de agua en un vaso de precipitado de 250 mL con una altura de 6.5 cm. La muestra fue colocada en la azotea del edificio con un termómetro en la superficie de la arena y en el fondo un sensor externo que estaba conectado a un registrador de datos interior U-012 y se expuso a la radiación solar durante los 4 meses del periodo de invierno de 2011 y 2012 y apartir de marzo de 2016 a noviembre de 2016. El sensor U10-012 almacenó las lecturas en intervalos de 15 minutos durante 91 días del 2011 y 2012 y 264 días del 2016. En la figura A2 se presenta la muestra de arena.



Figura A2. Muestra de arena sobre el techo del edificio del estudio de caso.

En la tabla A1 se muestran las temperaturas registradas durante el mes de diciembre del 2011 para la arena.

ANEXO A

Tabla A1. Temperaturas horarias en la base de la muestra para el mes de diciembre del 2011 en grados centígrados.

	Mes de diciembre										
	Días										
Hora	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0:00	9.16	11.37	11.05	10.39	10.61	10.74	10.49	9.98	10.12	14.58	10.52
1:00	8.39	11.08	10.64	9.14	9.76	9.46	9.53	9.11	8.92	13.04	10.08
2:00	7.44	10.52	9.19	8.07	8.99	8.99	8.52	8.49	8.77	12.46	9.90
3:00	7.27	9.09	8.25	7.44	8.54	7.95	7.75	7.47	7.95	12.63	9.76
4:00	6.59	8.52	7.42	6.10	7.24	7.04	6.91	7.70	7.12	10.27	8.59
5:00	5.72	8.37	6.79	5.18	6.08	6.15	6.08	8.44	6.15	9.29	7.80
6:00	5.00	7.59	6.23	4.48	5.49	5.39	5.39	7.17	5.85	8.37	7.29
7:00	4.69	6.86	6.64	4.17	4.87	4.79	4.71	6.08	5.44	7.57	7.09
8:00	10.37	10.03	8.10	9.29	7.19	9.24	8.42	7.80	9.68	11.03	9.19
9:00	22.30	19.29	15.58	20.91	17.06	20.15	18.49	12.15	19.98	20.79	16.92
10:00	29.46	26.57	25.50	28.30	25.11	28.25	27.48	20.46	27.75	29.02	24.65
11:00	32.43	32.20	32.54	33.00	31.03	32.51	31.89	30.57	33.89	34.81	31.33
12:00	32.92	35.50	35.72	37.56	34.52	36.34	34.62	35.82	36.50	37.95	35.18
13:00	34.76	38.64	38.48	36.58	37.45	35.64	37.54	37.54	37.84	39.63	37.45
14:00	34.55	40.57	39.77	39.46	37.07	38.42	38.92	38.78	39.23	39.94	33.00
15:00	33.73	39.32	39.66	39.23	37.02	37.67	39.69	39.83	39.72	39.69	27.95
16:00	30.32	35.58	37.10	34.28	27.83	34.26	35.42	36.99	27.65	30.34	19.46
17:00	25.26	27.55	29.04	24.07	24.85	26.70	28.74	29.94	23.83	22.51	17.11
18:00	18.18	19.87	20.08	17.94	18.79	20.51	19.77	20.17	19.01	20.29	15.34
19:00	15.53	16.84	16.37	16.13	16.32	18.46	16.37	17.08	18.32	18.79	13.55
20:00	14.22	15.41	14.84	14.43	14.98	17.20	14.22	15.44	17.58	13.11	11.78
21:00	13.33	14.46	13.52	12.90	13.81	15.29	13.67	13.86	16.42	11.69	10.61
22:00	12.41	13.02	11.93	12.22	12.68	12.99	12.68	12.80	15.15	11.66	8.99
23:00	11.90	11.49	11.42	11.54	11.95	11.59	11.37	11.18	14.41	10.79	8.99

Fuente: Elaboración propia

Las temperaturas fueron registradas del 21 de diciembre del 2011 hasta el 20 de marzo del 2012, esto para observar el comportamiento térmico de esta variable física durante la época de invierno. La figura A3 muestra las mediciones de la temperatura contra tiempo.

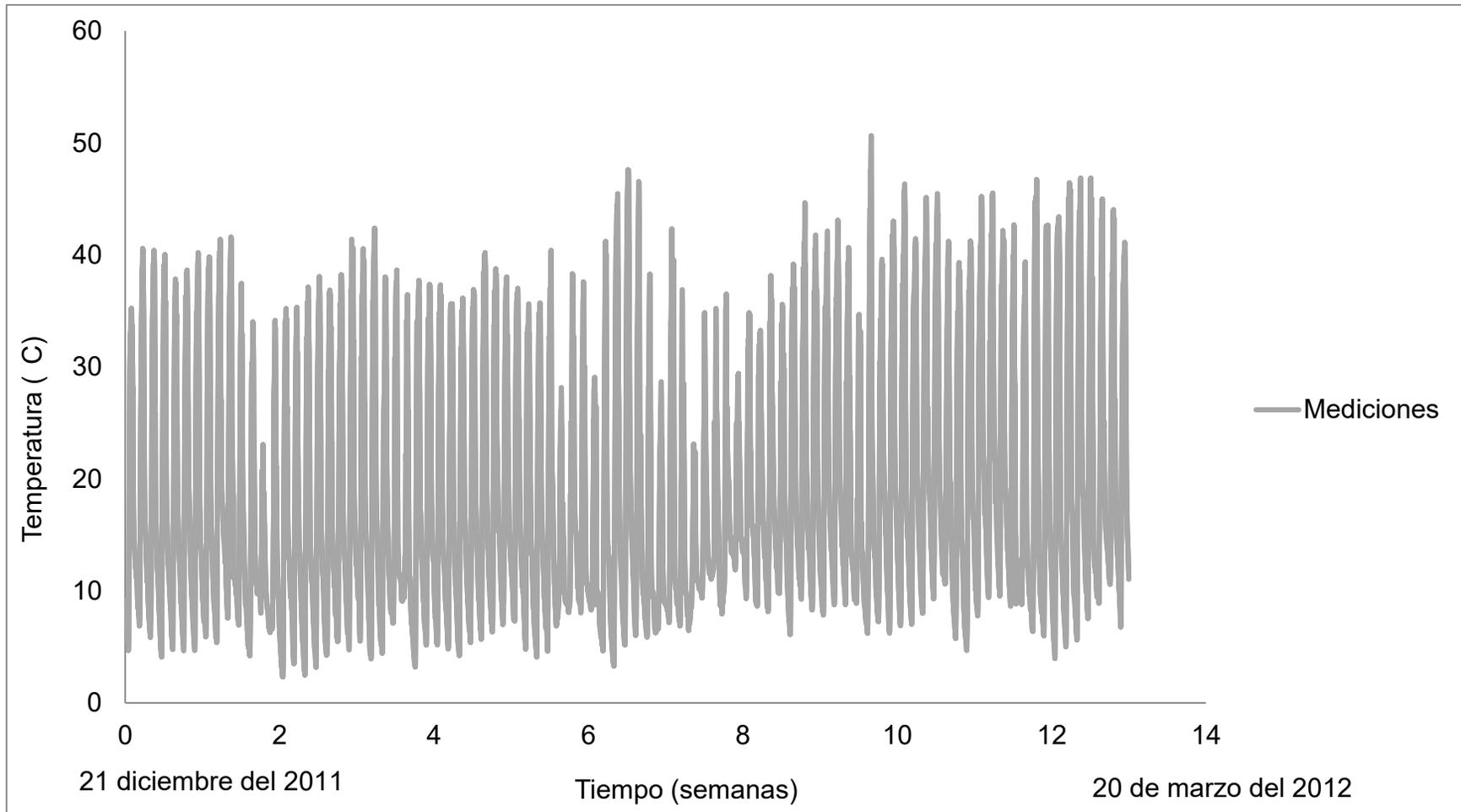


Figura A3. Comportamiento de la temperatura en la base de la muestra de arena con tamaño de grano de 600 μm del 21 de diciembre de 2011 al 20 de marzo del 2012.

ANEXO A

En la gráfica de la figura A3 también se muestra que la mayor temperatura alcanzada por la arena con tamaño de grano de 600 μm fue de 50.65 °C del día 26 de febrero de 2012 (semana 10) a las 15:15 h y la menor temperatura de 2.47 °C se tuvo el día 6 de enero del mismo 2012 en la semana 3 a las 7:00 h. El calentamiento de la arena inicia en el día por la tarde y termina con el enfriamiento en las primeras horas del día siguiente. Es decir, se tiene la temperatura más alta entre las 13:00 h y las 14:00 h del día y termina con la temperatura más baja a las 7:00 h del día siguiente.

Medición de la cantidad de agua

La masa de la arena seca se pesó en una balanza digital y se agregaron 91.3 mL de agua para ser después colocada en el techo del edificio. La muestra se dejó durante el período y se agregó la cantidad de agua necesaria para mantener la muestra de arena en su masa de 512.9 g. Esta agua fue agregada en la muestra ya que la radiación solar incidente evaporaba el agua que se encontraba en la parte superior de la muestra.

Las masas registradas se muestran en la tabla A2.

Tabla A2. Contenido de agua de la muestra de arena

Descripción	Variable	Masa (g)	Contenido (%)
Masa del vaso de precipitado + Masa de la arena húmeda	W_1	512.9	
Masa del vaso precipitado con arena seca	W_2	421.6	
Masa del vaso de precipitado	W_3	104.5	
Contenido de agua			28.79

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior el contenido de agua fue de 28.79 % calculado con la ecuación 55.

Análisis granulométrico

Para medir el tamaño de grano de la arena se realizó un estudio de granulometría por tamizado a una muestra de 100 g de arena seca. Para este se utilizaron siete tamices (8, 16, 30, 50, 100, 200, y 400) y las lecturas fueron registradas en la tabla A3.

ANEXO A

Tabla A3. Análisis granulométrico de la muestra de arena seca

Número de malla	% de retenido	% de acumulado que pasa	% de acumulado retenido
8	0	0	100
16	2.76	2.76	96.80
30	90.9	93.66	5.90
50	5.33	98.99	0.57
100	0.56	99.55	0
200	0.011	99.561	0
400	0	99.561	0

Fuente: Elaboración propia

Aquí se observa que el porcentaje acumulado que pasa ascendió a 99.56 g, es decir, se perdieron 0.44 g de arena que se incrustó en la malla de los tamices. En la gráfica de la figura 4 se observa que los granos de la muestra de arena fueron retenidos principalmente en el tamiz número 30, es decir en la muestra predominan granos con un diámetro igual a 600 μm .

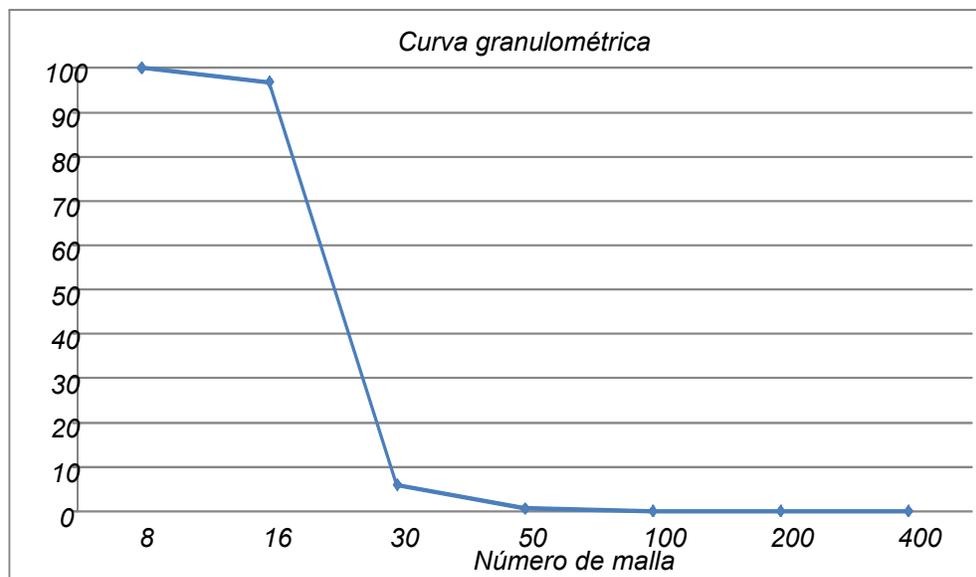


Figura A4. Curva granulométrica

El módulo de finura fue obtenido sumando los porcentajes acumulados retenidos y dividiéndolos entre 100. El cálculo de este módulo ascendió a 2.03.

ANEXO A

Cálculo del serpentín

La expresión matemática para calcular la velocidad de flujo del agua (V) en m/s dentro del serpentín tomando en cuenta el caudal C, en m³/s y el área de la sección transversal del tubo (A_c), en m² se presenta en la ecuación (56).

$$V = \frac{C}{A_c} \quad (56)$$

Con las propiedades de densidad ρ_f en kg/m³ y viscosidad dinámica del agua, en m/s², el diámetro interior D_p, en m y la velocidad del agua V, en m/s, se calculará el número de Reynolds. Çengel (2004) muestra la ecuación 57 que permite calcular el número de Reynolds para flujo laminar.

$$Re = \frac{\rho_f V D_i}{\mu} \quad (57)$$

Para calcular la velocidad de ganancias de calor por conducción se deberá utilizar la ecuación 58.

$$Q' = Sk_{\text{arena}} (T(z,t) - T_{\text{superficie arena}}) (W) \quad (58)$$

Para calcular el factor de forma S considerando una parte vertical del serpentín como un cilindro se utilizará la ecuación 59.

$$S = \frac{2\pi L_c}{\ln\left(\frac{2w}{\pi D_o} \sinh\frac{2\pi z}{w}\right)} \quad (m) \quad (59)$$

Ecuación propuesta por Çengel (2004) para el cálculo de la velocidad de ganancias de calor en un serpentín enterrado en un medio infinito.

ANEXO A

Consumo energético de un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) con diferentes fuentes de calor en la ciudad de México y sin un sistema fotovoltaico y banco de baterías.

En las figuras A5, A6, A7, A8, A9 y A10 se muestra el consumo eléctrico simulado que se tendría cuando un sistema híbrido (HVAC sostenido con energías renovables) y capacidad de calentamiento de 17.54 kW es acoplado a diferentes tamaños de grano de arena y el contenido de agua es variado del 10 %, 20 %, 40 %, 60 % y 69 %.

Site data

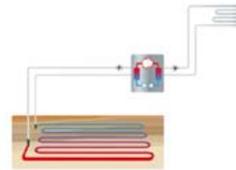
Climate data

Climate data record:	Mexico Central/Tacub
Annual sum of global irradiation:	1,858 kWh/m ²
Longitude:	99.7 ° W
Latitude:	19.0 ° N

Space Heating

Heated useable area:	1.0 m ²
Indoor temperature:	20.0 °C
Heating limit temperature:	14.0 °C
Low temperature loop proportion:	100.0 %
Supply/Return LT loop:	35.0/27.0 °C
Requirement type:	Heating load
Heating load:	17.54 kW
Resulting heating output (yearly total):	11,156 kWh

System:HP system with space heating



Results of the annual simulation

Space heating energy requirement:	11,103 kWh
Energy delivered by heat pumps:	11,103 kWh
Seasonal performance factor of the heat pump:	5.8
Seasonal performance factor of the heat pump system:	5.5
Heat pump electricity consumption:	1,916 kWh
Heat source pumps electricity consumption:	117 kWh
Primary energy savings:	8,284 kWh
CO2 emissions avoided:	2,050 kg

Figura A5. Resultados de la simulación anual del sistema híbrido con fuente de calor arena saturada y tamaño de grano de 300 μm en la ciudad de México.

Results of the annual simulation

Space heating energy requirement:	11,093 kWh
Energy delivered by heat pump:	11,093 kWh
Seasonal performance factor of the heat pump:	5.5
Seasonal performance factor of heat pump system:	5.3
Heat pump electricity consumption:	2,000 kWh
Heat source pumps electricity consumption:	124 kWh
Primary energy savings:	8,036 kWh
CO2 emissions avoided:	1,989 kg

Figura A6. Resultados de la simulación anual del sistema híbrido con fuente de calor arena saturada y tamaño de grano de 250 μm en la ciudad de México.

Results of the annual simulation

Space heating energy requirement:	11,070 kWh
Energy delivered by heat pump:	11,070 kWh
Seasonal performance factor of the heat pump:	5.3
Seasonal performance factor of heat pump system:	5.0
Heat pump electricity consumption:	2,091 kWh
Heat source pumps electricity consumption:	132 kWh
Primary energy savings:	7,751 kWh
CO2 emissions avoided:	1,918 kg

Figura A7. Resultados de la simulación anual del sistema híbrido con fuente de calor de arena húmeda y tamaño de grano de 250 μm en la ciudad de México.

Results of the annual simulation

Space heating energy requirement:	10,272 kWh
Energy delivered by heat pump:	10,274 kWh
Seasonal performance factor of the heat pump:	4.5
Seasonal performance factor of heat pump system:	4.3
Heat pump electricity consumption:	2,274 kWh
Heat source pumps electricity consumption:	147 kWh
Primary energy savings:	6,261 kWh
CO2 emissions avoided:	1,550 kg

Figura A8. Resultados de la simulación anual del sistema híbrido con fuente de calor de arena seca y tamaño de grano de 250 μm en la ciudad de México.

Results of the annual simulation

Space heating energy requirement:	11,094 kWh
Energy delivered by heat pump:	11,094 kWh
Seasonal performance factor of the heat pump:	5.6
Seasonal performance factor of heat pump system:	5.3
Heat pump electricity consumption:	1,989 kWh
Heat source pumps electricity consumption:	123 kWh
Primary energy savings:	8,066 kWh
CO2 emissions avoided:	1,996 kg

Figura A9. Resultados de la simulación anual del sistema híbrido con fuente de calor arena gruesa y tamaño de grano de 3 mm en la ciudad de México.

Results of the annual simulation

Space heating energy requirement:	11,098 kWh
Energy delivered by heat pump:	11,098 kWh
Seasonal performance factor of the heat pump:	5.6
Seasonal performance factor of heat pump system:	5.4
Heat pump electricity consumption:	1,972 kWh
Heat source pumps electricity consumption:	122 kWh
Primary energy savings:	8,120 kWh
CO2 emissions avoided:	2,010 kg

Figura A10. Resultados de la simulación anual del sistema híbrido con fuente de calor con dolomita y tamaño de la roca de 10 cm en la ciudad de México.