

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE
VIVIENDA ENERGÉTICAMENTE SUSTENTABLE”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

P R E S E N T A:

ANÍBAL LUNA LEÓN

DIRECTOR DE TESIS

DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN

Con amor y cariño dedico este trabajo a:

Jenifer Castro

*Mi esposa, por su confianza y amor que motivo
el anhelo de seguir superándome*

Kenneth, Christopher y Lester Amilkar

*Mis hijos, como un legado en la lucha
constante por un mejor futuro...*

Víctor Luna y Juana León

*Mis padres, que me enseñaron a valorar lo
que la vida nos ofrece...*

Ali, Muhammed Ali, Soliman, Lenin y Mahetabel Dayanira

Mis hermanos, como un estímulo de búsqueda de superación

AGRADECIMIENTOS

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California;
Por compartir sus conocimientos, ofrecerme su amistad y adoptarme como uno más del equipo.

Dr. Roberto Best Brown

Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México;
Por su disponibilidad, apoyo y pertinencia en las asesorías a este trabajo.

Dr. David Morillón Gálvez

Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México;
Por su asesoría y actitud siempre crítica acento durante las revisiones a este trabajo.

Dra. Rosa Imelda Rojas Candelas

Catedrático de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California;
Por su apoyo, antes y durante los estudios de doctorado, así como la revisión objetiva de este trabajo.

Dr. Onofre Rafael García Cueto

Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California;
Por su disponibilidad y apoyo durante la revisión de este documento.

Dra. Ramona Alicia Romero Moreno

Catedrático de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California;
Por su asesoría, disponibilidad, y apoyo; Además de creer en este trabajo y motivarme a continuar con él.

Dra. Sara Ojeda Benítez

Por la beca otorgada para estudios de doctorado del proyecto CONACYT: La gestión de residuos domiciliarios en la familia. Comunidad de análisis de una población

Gonzalo Bojórquez Morales y Osvaldo Leyva Camacho

Por su amistad y motivación para que este trabajo llegara su parte final.

A mis amigos y compañeros de trabajo

Ricardo Gallegos, Ramona Romero, María Corral, Eduardo Vázquez,
Osvaldo Baeza, Rosa Imelda Rojas, Raúl Venegas, Elva Corona y Augusto Arredondo;
Por su apoyo y motivación durante el desarrollo de los estudios doctorales.

A todas las personas

Que de alguna manera intervinieron en la realización de este trabajo.

Arq. Aarón Gerardo Bernal Rodríguez

Vicerrector de la Universidad Autónoma de Baja California, Campus Mexicali;
Por todo el apoyo durante el inicio de los estudios doctorales.

M. Arq. Jesús Antonio Ley Guing

Director de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California;
Por todo el apoyo durante la conclusión de los estudios doctorales.

Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California

Por ser la casa de estudios.

Universidad Autónoma de Baja California

A través de la Facultad de Arquitectura y Diseño e Instituto de Ingeniería;
Por el apoyo, tiempo de formación docente y facilidades recibidas durante el desarrollo de los estudios de doctorado.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Por la beca otorgada para los estudios de doctorado.

RESUMEN

Los altos consumos de energía eléctrica, son la causa indirecta de la contaminación ambiental, lo que contribuye de forma fundamental al efecto invernadero y calentamiento global del planeta. Así mismo, la disponibilidad de energía se ha convertido en uno de los problemas más importantes para la humanidad, como consecuencia de las demandas crecientes de energéticos para satisfacer las necesidades de climatización artificial, iluminación, funcionamiento de equipos electrodomésticos, calentamiento de agua, conservación y cocción de alimentos, entre otros.

En el sector residencial la energía utilizada procede de recursos no renovables, sin embargo, es necesaria la utilización de sistemas eficientes a partir de recursos renovables para emigrar hacia sistemas energéticos limpios y sustentables, que permitan mantener el equilibrio ambiental del planeta, con lo que se podrá contrarrestar problemas ambientales, energéticos, económicos y sociales, por lo que es necesario visualizar el uso de tecnologías solares sustentables en regiones desérticas, ya que en ese caso se tiene amplio potencial energético para la operación de sistemas tanto térmicos, como fotovoltaicos, que proporcionen energía a la edificación para satisfacer sus necesidades.

El objetivo de esta tesis fue diseñar una vivienda energéticamente sustentable con la integración de técnicas de adecuación ambiental en la edificación, así como el uso de energía solar térmica para climatización y agua caliente de uso doméstico, para dar respuesta a los requerimientos y necesidades energéticas de la vivienda y reducir el impacto ambiental.

A partir de la propuesta de vivienda energéticamente sustentable se demuestra que con la adecuada selección de sistemas constructivos y la utilización de principios del diseño ambiental, se obtienen ahorros por climatización de hasta el 45%. Así mismo a partir del dimensionamiento del sistema solar integral y la evaluación técnica horaria a partir de TRNSYS, el sistema híbrido solar/gas natural es técnicamente factible de utilizarse para las condiciones climáticas del caso de Mexicali, Baja California, ya que provee condiciones de confort térmico del espacio que oscilan entre confortable y confortablemente frío durante el periodo de demanda de enfriamiento y confortablemente caliente durante el periodo de demanda de calentamiento; además de que se cuenta con una calidad promedio del agua para uso doméstico de 50 °C.

Con el estudio económico se encontró que el sistema integral propuesto tiene un tiempo de recuperación de la inversión de ocho años, con una relación costo beneficio de 2.12 pesos por cada peso invertido. No obstante si se utilizan fondos de bolsas internacionales de apoyo a proyectos sustentables ó fuentes de financiamiento a fondo perdido con recursos provenientes de los tres niveles de gobierno que actualmente son utilizados para subsidio de la tarifa eléctrica; el proyecto incrementa su factibilidad económica, hasta valores de tiempo de recuperación de 5.4 años ó menos con una relación costo beneficio de 3.3 o más si se implementan estos sistemas en forma masiva.

Además se encontró que si se utiliza un sistema integral que provea calentamiento, enfriamiento y agua caliente para uso doméstico, a partir de un sistema activado con una fuente de energía híbrida solar/gas natural; se obtienen ahorros anuales por costo de operación de un 73%, con base al consumo anual de un sistema de calentamiento y enfriamiento operado con energía eléctrica y se dejan de emitir 10.2 toneladas de CO₂ al año por cada 10 toneladas de enfriamiento (35.2 kW) instaladas.

ABSTRACT

Modern western societies have an increasingly high demand for electricity, as a consequence of the need for air conditioning, lighting, household appliances, water heating, food conservation and processing, etc. This tendency only contributes to the air pollution and the global warming.

The energy used in dwellings comes from non-renewable sources, and the need arrives for the use of efficient systems that work with renewable energy to migrate towards cleaner and sustainable energy systems, allowing to reestablish the environmental equilibrium in the planet. Doing so, environmental, social and economic problems of our society could be overcome. This is why it is important to use the great potential of solar energy in this region, that can be used to operate thermal as well as photovoltaic systems that can meet the energy requirements of buildings.

The objective of this work was the design of a house that was energetically sustainable, integrating techniques of environmental design and the use of solar thermal energy for air conditioning and domestic hot water, in order to fulfill the energy requirements of the house and to lower the environmental impact caused by its operation.

The energy-sustainable house proposed here shows that a proper selection of building systems and principles of environmental design, it is possible to save up to 46% in the capacity of air conditioning systems. Also, an hour by hour simulation with TRNSYS of the proposed hybrid natural gas-solar refrigeration, heating and domestic hot water system showed its technical feasibility for the climatic conditions in Mexicali, as it provides conditions ranging of PMV from neutral and slightly cool during the cooling demand season and from neutral and slightly warm during the heating demand season. The domestic hot water provided is available at a temperature averaging 50°C.

A feasibility study showed that the payback time is of 8 years, with a cost-benefit ratio of 2.12 Mexican pesos for each peso invested. If funds from international institutions that finance these type of projects or the governmental funds that at present are used to subsidize the electrical tariff are used the payback time lowers to 5.4 years with a cost-benefit ratio of 3.3

The operation cost for this hybrid natural gas-solar cooling, heating and domestic hot water system are cut out to 58% compared to a system that uses electricity for heating and cooling and natural gas for domestic hot water. Also, the proposed system does not emit 10.2 tons of CO₂ per year for each 10 tons of refrigeration that the later system would do.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xv
NOMENCLATURA.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	17
CAPITULO 1. ASPECTOS PRELIMINARES.....	19
1.1 Planteamiento de la investigación.....	19
1.1.1 Justificación.....	20
1.1.2 Hipótesis.....	22
1.1.3 Objetivo.....	23
1.2 Antecedentes.....	24
1.2.1 Vivienda.....	24
1.2.2 Energía en la edificación.....	25
1.2.3 Energías renovables para la edificación.....	29
CAPITULO 2. ENERGÍA, CLIMA Y DISEÑO AMBIENTAL.....	32
2.1 Radiación solar.....	32
2.1.1 Disponibilidad del recurso solar en México.....	36
2.1.2 Recurso solar en Mexicali, en diferentes planos de captación.....	37
2.2 Sistemas de aprovechamiento térmico.....	38
2.2.1 Calentamiento térmico del edificio y agua para uso doméstico.....	38
2.2.2 Aspectos ambientales y económicos de los sistemas térmicos.....	49
2.3 Vivienda energéticamente sustentable.....	49
2.4 Clima y edificación de Mexicali.....	52
2.4.1 Clima y confort térmico.....	52

2.4.2	Clima de Mexicali B.C.	53
2.4.3	Confort térmico y estrategias de adecuación bioclimática.....	59
CAPITULO 3. VIVIENDA ENERGETICAMENTE SUSTENTABLE.....		70
3.1	Descripción de vivienda energéticamente sustentable	70
3.2	Análisis de diseño ambiental de proyecto energéticamente sustentable	73
3.2.1	Materiales de construcción y sistemas constructivos.....	73
3.2.2	Asoleamiento, sombreado e iluminación.....	74
3.2.3	Ventilación natural.....	80
3.3	Acoplamiento de tecnologías energéticas sustentables a la edificación	86
CAPITULO 4. ESTUDIO DE SISTEMAS TÉRMICOS DE LA EDIFICACIÓN		89
4.1	Sistema de enfriamiento por absorción.....	89
4.1.1	Funcionamiento de sistema de enfriamiento por absorción.....	89
4.1.2	Método de simulación de sistema solar, híbrido y operado a gas natural.....	92
4.1.3	Área de captación, tamaño de tanque y agua caliente a generador.....	95
4.1.4	Sistema de enfriamiento con energía solar.	97
4.1.5	Sistema de enfriamiento híbrido	112
4.1.6	Sistema de enfriamiento a gas natural	126
4.1.7	Comparativo de sistemas de enfriamiento por absorción	135
4.2	Sistema de calefacción por piso radiante y agua caliente	143
4.2.1	Descripción del sistema	143
4.2.2	Método de simulación.....	143
4.2.3	Propuesta de distribución de piso radiante en vivienda	145
4.2.4	Comportamiento operativo del piso radiante	146
CAPITULO 5. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....		153
5.1	Técnicas de evaluación económica	153

5.1.1 Valor presente neto.....	153
5.1.2 Tasa interna de retorno	154
5.1.3 Relación costo / beneficio	154
5.1.4 Período de recuperación de la inversión.....	155
5.2 Evaluación económica del sistema integral de climatización y agua doméstica	155
5.2.1 Parámetros económicos	155
5.2.2 Costos unitarios para el estudio económico.	156
5.2.3 Resultados de la evaluación económica	161
5.3 Beneficios ambientales.....	167
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	169
6.1 Conclusiones.....	169
6.2 Recomendaciones.....	171
BIBLIOGRAFÍA	173
ANEXOS.....	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Tipo de producción de energía eléctrica en México, 2001	26
Figura 1.2: Población anualmente atendida por el sector eléctrico, México, 1990-2001	27
Figura 1.3: Consumo doméstico mensual del municipio de Mexicali, 2003	28
Figura 1.4: Consumo doméstico en municipio de Mexicali	28
Figura 2.1: Espectro de radiación solar en relación con el espectro electromagnético total	33
Figura 2.2 Variación de la radiación solar directa, respecto a altura y ángulo de incidencia	34
Figura 2.3: Efecto de la masa de aire en la reducción de captación solar	35
Figura 2.4: Movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol	35
Figura 2.5: Zonas con mayor disponibilidad de energía solar	36
Figura 2.6: Horas pico de energía disponible en la República Mexicana	36
Figura 2.7 Inclinación para diferentes tecnologías térmicas en B.C.	37
Figura 2.9: Componentes de calentador placa plana.....	39
Figura 2.10: Sistema de calentamiento indirecto	40
Figura 2.11: Sistema de calentamiento solar directo	40
Figura 2.12: Colector de tubos evacuados	41
Figura 2.13: Ciclo básico de refrigeración por absorción	42
Figura 2.14: Coeficiente de Operación (COP) en función de la temperatura	43
Figura 2.15: Sistema de absorción de doble efecto LiBr/H ₂ O.....	44
Figura 2.16: Costo inicial de sistema en función del área de colección.....	45
Figura 2.17: Comparativo de sistemas de calentamiento.....	45
Figura 2.18: Flujo de calor y temperatura del piso radiante	47
Figura 2.19: Distribución de ductería en espiral	47
Figura 2.20: Sistema constructivo de piso radiante	48

Figura 2.21: Diagrama de flujo para diseño de vivienda energéticamente sustentable	51
Figura 2.22: Temperaturas media anual, (UNAM, 1990).....	52
Figura 2.23: Temperatura ambiente de Mexicali B.C., 2000-2005	54
Figura 2.24: Humedad relativa de Mexicali B.C.	54
Figura 2.25: Datos climáticos promedio horario diarios del periodo frío, Mexicali B.C., 2000-2005.	55
Figura 2.26: Datos climáticos promedio horario diarios del periodo cálido, Mexicali B.C., 2000-2005	56
Figura 2.27: Precipitación promedio mensual Mexicali, 1981-1997.....	56
Figura 2.28: Frecuencia y dirección de vientos en Mexicali B.C.	57
Figura 2.29: Movimiento solar en Mexicali B.C., México	58
Figura 2.30: Radiación solar global en plano horizontal, Mexicali B.C, 2000-2005.....	59
Figura 2.31: Temperaturas neutras en Mexicali B.C.	62
Figura 2.32: Carta bioclimática de Olgyay adaptada para Mexicali	62
Figura 2.33: Carta psicométrica con estrategias de adecuación ambiental para Mexicali B.C.	64
Figura 3.1: Plantas arquitectónicas de vivienda energéticamente sustentable	72
Figura 3.2: Fachada sur 21 de junio, medio día solar, Mexicali B.C.	75
Figura 3.3: Fachada sur 21 de agosto, medio día solar	76
Figura 3.4: Fachada sur 21 de diciembre, medio día solar	76
Figura 3.5: Fachada este 21 de junio, 9 horas	77
Figura 3.6: Fachada este 21 de junio, 11 horas.....	77
Figura 3.7: Sombreado de pérgolas en superficie oeste.....	78
Figura 3.8: Fachada norte, 6 horas.....	79
Figura 3.9: Fachada norte, 18 horas.....	79
Figura 3.10: Ventilación natural de vivienda.....	81
Figura 3.11: Energía a retirar según estrategia, vivienda energéticamente sustentable	84
Figura 3.12: Sensación de confort (PMV) según estrategia implementada	85

Figura 3.13: Módulos de viviendas	86
Figura 3.14: Esquema de conexión de sistema integral	87
Figura 3.15: Sembrado de vivienda con fachada sur	88
Figura 3.16: Sembrado de vivienda con fachada norte	88
Figura 4.1: Sistema de enfriamiento solar	90
Figura 4.2: Capacidad y COP en función de agua caliente, de enfriamiento y fría.	91
Figura 4.3: Diagrama de flujo para dimensionamiento de sistema solar e híbrido	93
Figura 4.4: Diagrama de flujo para dimensionamiento de sistema a gas natural	94
Figura 4.5: Optimización de temperatura de calentador auxiliar	95
Figura 4.6: Optimización de colección solar	96
Figura 4.7: Optimización de área de colección y tamaño de tanque	96
Figura 4.8: Clima en día normal	97
Figura 4.9: Subsistema de colección solar para sistema de enfriamiento, día normal	98
Figura 4.10: Calidad de energía en sistema solar, día normal	99
Figura 4.11: Confort térmico sistema solar, día normal	101
Figura 4.12: Eficiencia del sistema de enfriamiento solar, día normal	102
Figura 4.13: Clima en día crítico	103
Figura 4.14: Subsistema de colección para sistema de enfriamiento solar, día crítico	104
Figura 4.15: Suministro de energía al generador en sistema solar, día crítico.....	104
Figura 4.16: Confort térmico sistema solar, día crítico.....	105
Figura 4.17: Eficiencia del sistema de enfriamiento solar, día crítico	106
Figura 4.18: Colectores en sistema solar	107
Figura 4.19: Generador en sistema solar	108
Figura 4.20: Torre de enfriamiento en sistema solar	109
Figura 4.21: Agua fría en sistema solar	109

Figura 4.22: Aire frío de manejadora en sistema solar	110
Figura 4.23: Confort térmico del espacio en sistema solar	110
Figura 4.24: COP solar de sistema solar	111
Figura 4.25: Subsistema de colección solar para sistema híbrido, día normal.....	113
Figura 4.26: Calidad de energía en sistema híbrido, día normal.....	114
Figura 4.27: Confort térmico sistema híbrido, día normal.....	115
Figura 4.28: COP solar en sistema híbrido, día normal	116
Figura 4.29: Sistema de colección para sistema híbrido, día crítico.....	117
Figura 4.30: Suministro de energía al generador en sistema híbrido, día crítico	117
Figura 4.31: Confort térmico sistema híbrido, día crítico.....	118
Figura 4.32: COP solar en sistema híbrido, día crítico	119
Figura 4.33: Colectores en sistema híbrido.....	120
Figura 4.34: Generador en sistema híbrido.....	121
Figura 4.35: Torre de enfriamiento en sistema híbrido.....	122
Figura 4.36: Agua fría en sistema híbrido	122
Figura 4.37: Aire frío de manejadora en sistema híbrido	123
Figura 4.38: Confort térmico del espacio en sistema híbrido	124
Figura 4.39: COP solar de sistema híbrido	125
Figura 4.40: Calidad de energía en sistema a gas natural, día normal	126
Figura 4.41: Confort térmico sistema a gas natural, día normal	127
Figura 4.42: COP solar en sistema a gas natural, día normal	128
Figura 4.43: Suministro de energía al generador en sistema a gas natural, día crítico	129
Figura 4.44: Confort térmico sistema a gas natural, día crítico	130
Figura 4.45: COP solar en sistema a gas natural, día crítico	130
Figura 4.46: Generador en sistema a gas natural	131

Figura 4.47: Torre de enfriamiento en sistema a gas natural	132
Figura 4.48: Agua fría en sistema a gas natural	132
Figura 4.49: Aire frío de manejadora en sistema a gas natural	133
Figura 4.50: Confort térmico del espacio en sistema a gas natural	134
Figura 4.51: COP solar de sistema a gas natural	134
Figura 4.52: Comparación sistema de colección solar e híbrido en día normal	136
Figura 4.53: Comparativo de calidad de energía en día normal	137
Figura 4.54: Comparativo de COP solar en día normal	138
Figura 4.55: Comparativo de confort térmico en día normal	139
Figura 4.56: Comparación sistema de colección solar e híbrido en día crítico	140
Figura 4.57: Comparativo de calidad de energía en día crítico	141
Figura 4.58: Comparativo de COP solar en día crítico	141
Figura 4.59: Comparativo de confort térmico en día normal	142
Figura 4.60: Sistema de piso radiante	143
Figura 4.61: Diagrama de flujo para sistema de piso radiante	144
Figura 4.62: Distribución de tubería de piso radiante	145
Figura 4.63: Clima en día normal de invierno	146
Figura 4.64: Sistema de colección para piso radiante, día normal	147
Figura 4.65: Confort térmico piso radiante, día normal	148
Figura 4.66: Clima en día crítico de invierno	148
Figura 4.67: Sistema de colección para piso radiante, día crítico	149
Figura 4.68: Confort térmico piso radiante, día crítico	150
Figura 4.69: Sistema de colección piso radiante en invierno	151
Figura 4.70: Aportación de calor piso radiante en invierno	151
Figura 4.71: Confort de espacio en invierno	152

Figura 5.1: Costo de gas para operación con diferentes aportaciones solares	157
Figura 5.2: Costo de energía eléctrica para calentamiento y enfriamiento por compresión, dos viviendas	158
Figura 5.3: Costo gas natural para calentamiento de agua uso doméstico, dos viviendas	159
Figura 5.4: Tasa de inflación	160
Figura 5.5: Tasa de incremento anual del costo de la energía	160
Figura 5.6: Tasa de incremento de costo del gas natural, 1998-2006	161
Figura 5.7: Indicadores económicos para los diferentes escenarios, para dos viviendas	162
Figura 5.8: Inversión inicial y costo de operación diferentes escenarios, para dos viviendas	163
Figura 5.9: Flujo de efectivo de sistemas de enfriamiento, para dos viviendas	163
Figura 5.10: Costo de energía mensual con diferentes fracciones solares, para dos viviendas.....	164
Figura 5.11: Ahorro en facturación mensual y anual.....	165
Figura 5.12: Estudio económico a fondo perdido para dos viviendas	166
Figura 5.13: Reducción de emisiones de CO ₂ por unidad de 10 TON al 47% de fracción solar	168

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Distribución de hogares según tipo de ingreso, 2000	24
Tabla 1.2: Vivienda según tipo de construcción	25
Tabla 1.3: Capacidad instalada en sistema eléctrico nacional (MW)	25
Tabla 2.1: Comparación de sistema de absorción con compresión de vapor.....	43
Tabla 2.2: Parámetros de predimensionamiento de piso radiante	46
Tabla 2.3: Disipación de calor por actividad metabólica promedio para un hombre adulto (Watts).....	60
Tabla 2.4: Técnicas de adecuación para espacios abiertos, Mexicali B.C.	63
Tabla 2.5: Estrategias bioclimáticas Mexicali B.C.	68
Tabla 3.1: Propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos	73
Tabla 3.2: Confort térmico (PMV) planta baja, con ventilación natural.....	82
Tabla 3.3: Confort térmico (PMV) planta alta, con ventilación natural	82
Tabla 4.1: Componentes utilizados para simulación de sistema de absorción.....	92
Tabla 4.2: Escala de confort ISO:7730(2005)	101
Tabla 4.3: Área de colección y tamaño de tanque de los diferentes escenarios	135
Tabla 4.4: Componentes utilizados para simulación de piso radiante	143
Tabla 5.1: Parámetros base para elaboración de análisis económico.....	155
Tabla 5.2: Costos base para cálculo inversión inicial de sistema de climatización solar.....	156
Tabla 5.3: Costo de colectores y sistema de climatización	156

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición	Unidades
T	Temperatura	°C
HR	Humedad relativa ambiente	%
Rad	Radiación	W/m ² ó kJ/h m ²
COP	Coefficiente de operación	(-)
PMV	Predicción del voto promedio (confort)	(-)
Fr	Fracción	(-)
Q	Calor auxiliar	kJ/h ó kJ/día
clo	Factor de arropamiento	(-)
met	Actividad metabólica	(-)
InvInic	Inversión inicial	\$
CO	Costo de operación	\$
TR	Tiempo de recuperación	Años
R C/B	Relación costo beneficio	(-)
η	Eficiencia	(-)

SUBÍNDICES

Símbolo	Definición		
H	Híbrido	n	Neutra
G	Gas natural	e	Entrada
S	Solar	s	Salida
F	Flujo	r	Removido
AC	Agua caliente	ma	Media anual
AD	Agua para uso doméstico	amb	Ambiente
PR	Piso radiante	aux	auxiliar
SA	Sistema de absorción	util	útil
HOR	Horizontal	Incl	Inclinada
Air	Aire	Col	Colector
esp	Espacio	Gen	Generador
Ef	Eficiencia	Trre	Torre
Tke	Tanque	Pj	Petajoules
Zc	Zona de confort		

INTRODUCCIÓN

En Mexicali la falta de adecuación al clima de los diseños de vivienda y las características termofísicas de los materiales de construcción, generan impacto en la salud y en las condiciones de confort térmico de los usuarios; además de que es necesario el uso de climatización artificial, lo que repercute en consumos altos de energía para propiciar espacios confortables y genera problemas de contaminación ambiental por los gases de efecto invernadero.

Por lo tanto, es necesario que en el sector residencial se realicen diseños adecuados y consideren una serie de estrategias ó principios de diseño ambiental, con el propósito de construir una edificación de demanda energética mínima. También es importante que se utilice energía producto de sistemas eficientes a partir de recursos renovables, para tender hacia sistemas energéticos limpios y sustentables que permitan mantener el equilibrio ambiental.

Una alternativa es la construcción de viviendas energéticamente sustentables que operen en forma independiente de cualquier tipo de alimentación exterior, a excepción de aquellas que provienen de su entorno inmediato. En donde la vivienda no esté vinculada a los principales servicios de gas, agua, electricidad ó alcantarillado a menos que provengan de fuentes renovables y en su lugar se utilicen las fuentes de energía renovables disponibles en la región entre las que se encuentran: energía solar, eólica, biomasa, geotérmica, hidrógeno renovable, entre otras. También que sea capaz de procesar sus propios materiales de desecho, para su reaprovechamiento. Además es necesario realizar un adecuado diseño de las viviendas que consideren una serie de estrategias o principios de diseño bioclimático, con el propósito de construir una edificación de demanda energética mínima.

Debido a lo antes planteado el objetivo de esta tesis es diseñar una vivienda energéticamente sustentable para Mexicali B.C. con la integración de técnicas de adecuación ambiental, así como el uso de energía solar térmica para climatización y agua caliente de uso doméstico, para dar respuesta a los requerimientos y necesidades energéticas de la vivienda y reducir el impacto ambiental.

A partir de la vivienda energéticamente sustentable propuesta, se demuestra que con la adecuada selección de sistemas constructivos y la utilización de principios del diseño ambiental, se obtienen ahorros por climatización de hasta el 45%. Asimismo de que a partir del dimensionamiento del sistema solar integral y la evaluación técnica horaria a partir de TRNSYS, el sistema de enfriamiento solar/gas natural es técnicamente factible de utilizarse para las condiciones climáticas de la ciudad de Mexicali, B.C. ya que provee condiciones de confort térmico del espacio que oscilan entre confortable y confortablemente frío durante el periodo de demanda de enfriamiento y confortable a confortablemente caliente durante el periodo de demanda de calentamiento; además de que se cuenta con una calidad promedio del agua para uso doméstico de 50 °C.

Además el estudio económico muestra que el sistema integral propuesto tiene un tiempo de recuperación de la inversión de ocho años, con una relación costo beneficio de 2.12 pesos por cada peso invertido. Sin embargo, si se utilizan fondos de bolsas internacionales de apoyo a proyectos sustentables ó fuentes de financiamiento al 50% a fondo perdido se incrementa su factibilidad económica, hasta un tiempo de recuperación de 5.4 años con una relación costo beneficio de 3.3 si se implementan estos sistemas en forma masiva.

Otra de las ventajas encontradas con este proyecto, es que con la utilización de un sistema integral de calentamiento enfriamiento y agua caliente para uso doméstico a partir de un sistema activado con una fuente de energía híbrida solar/gas natural; se obtienen ahorros anuales por costo de operación de un 58%, con base al consumo anual de un sistema de calentamiento y enfriamiento operado con energía eléctrica y se dejan de emitir 10.2 toneladas de CO₂ al año por cada 10 toneladas(35.2 kW) de enfriamiento instaladas.

Esta tesis está integrada por seis capítulos; El primero presenta el planteamiento del problema y los antecedentes sobre diseños de viviendas con aplicaciones de diseño ambiental y tecnologías energéticas que operan a partir de fuentes renovables. El segundo capítulo trata sobre el marco teórico con base en consideraciones del clima y disponibilidad de recurso solar para la utilización de sistemas de aprovechamiento térmico para climatización solar y calentamiento de agua para uso doméstico en viviendas energéticamente sustentables. El tercer capítulo muestra la vivienda energéticamente sustentable y el método de diseño para su solución ambiental e integración de las tecnologías de climatización y calentamiento solar de agua para uso doméstico. El capítulo cuatro trata el estudio de comportamiento operativo de tres escenarios de aplicación de un sistema de enfriamiento solar y la aplicación del sistema de calentamiento por piso radiante. El capítulo cinco describe el estudio de factibilidad económica del sistema integral de climatización y agua para uso doméstico de los diferentes escenarios estudiados y finalmente el sexto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

CAPITULO 1. ASPECTOS PRELIMINARES

1.1 Planteamiento de la investigación

En México, la falta de adecuación al clima de los diseños de vivienda y las características termofísicas de los materiales de construcción, hacen necesario el uso de climatización artificial, lo que repercute altos consumos de energía para propiciar condiciones de confort térmico de los espacios interiores.

El consumo energético residencial, comercial y público representa el 21.3% del consumo final total nacional para el año 2001, con 841.8 PJ de los 3941.3 PJ de consumo final total. (SENER, 2007). Lo cual atiende a una población total de 24,625,529 de usuarios en todo el país. El sector residencial es el más importante del rubro al cual pertenece, ya que representa en el 2001 un consumo de 18.91%.

El estado de Baja California es un alto consumidor de energía eléctrica debido a sus actividades económicas y a las condiciones climáticas con que cuenta. Sin embargo, la mayor demanda energética en el sector residencial se da en el municipio de Mexicali, ya que los municipios de Tijuana, Tecate y Ensenada, representan un consumo eléctrico residencial del 25%, mientras que en Mexicali el consumo residencial representa entre el 35 y 41% del consumo total (Romero, 2002).

El consumo excesivo en el caso del municipio de Mexicali, es atribuido al acondicionamiento térmico de espacios a partir de sistemas de enfriamiento convencional utilizados durante los meses de mayo a octubre, razón por la cual el consumo per cápita en el estado de Baja California fue de 503 kWh por unidad familiar, para el año 2003 (CFE, División Baja California, 2003).

El suministro de energía eléctrica en México está basado en la explotación de recursos energéticos naturales como el petróleo, gas natural y carbón, constituyen la base indispensable sobre la que se apoyan casi todas las actividades de nuestra existencia; pero es un recurso que no es inagotable y que en la actualidad existe una crisis energética mundial de combustibles fósiles. Es por lo tanto, importante considerar que estos recursos son finitos y que se tiene que pensar en formas de producción de energía a partir de fuentes renovables que produzcan energía limpia, con un bajo impacto ambiental.

La actividad humana ha provocado el calentamiento del planeta ya que los edificios son responsables de aproximadamente la mitad de las emisiones que contribuyen de forma fundamental al efecto invernadero y calentamiento global del planeta. La energía eléctrica es directa o indirectamente la fuente más importante de CO₂ (dióxido de carbono) el principal gas de efecto invernadero (Edwards *et al.*, 2004).

La energía es esencial para el desarrollo económico y social y el mejoramiento de la calidad de la vida, pero se produce y consume en formas que no podrían perdurar si la tecnología permaneciera constante con los efectos secundarios actuales. Por lo tanto es necesario controlar las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero y otros gases, a través de procesos eficientes de producción, transmisión, distribución y consumo de la energía y en una dependencia cada vez mayor de sistemas energéticos ecológicamente racionales, sobre todo de las fuentes de energías nuevas y renovables (Agenda-21, 2002).

El efecto de las variables climáticas en el ser humano, ha tomado mayor importancia en los últimos años ante la variabilidad de las condiciones climáticas; ya que los cambios drásticos en las temperaturas han provocado muertes y enfermedades tanto en verano (golpes de calor, estrés térmico) como en invierno (golpe de frío, estrés térmico) (Höppe, 2002).

En lo que se refiere al impacto en la salud debido al cambio climático, de un total de 3926 eventos extremos de tiempo/clima ocurridos durante las épocas de los 80's y 90's, el 15% de ellos sucedieron en América Latina y como consecuencia se tuvieron 71,000 muertes. En junio del 2006 murieron más de 30 personas en una ola de calor en Mexicali, Baja California, en todo el mundo los efectos por calor debido al cambio climático cobran 160,000 vidas al año, para el 2020 esta cifra se duplicará (Green_Peace, 2006).

Por otro lado, se estima que para el 2100, se tendrá un incremento de temperatura global entre 1.4 y 5.8 °C así como un aumento medio global en el nivel del mar de 0.09 a 0.98 m. Debido a lo anterior el efecto de ondas e isla de calor se incrementará y podrá generar estrés térmico, además de fallas cardiorespiratorias. Los individuos de mayor riesgo son adultos mayores, indígenas, menores de 3 años y mujeres en edad reproductiva. Lo anterior indica un aumento considerable en los índices de mortalidad y morbilidad (Green_Peace, 2006).

Es necesario se utilicen sistemas eficientes a partir de recursos renovables para emigrar hacia sistemas energéticos limpios y sustentables, que permitan mantener el equilibrio ambiental del planeta, con lo que se podrá contrarrestar problemas ambientales, energéticos, económicos y sociales, por lo que es inminente utilizar tecnologías solares sustentables para aprovechar el amplio potencial de energía solar en regiones desérticas como Mexicali, B. C. para la operación de sistemas térmicos, que proporcionen energía a la edificación para satisfacer las necesidades de climatización y agua caliente de uso doméstico.

Dentro de las consideraciones en el marco de la Estrategia Nacional de Cambio Climático las medidas que recomiendan los especialistas para estar prevenidos, destaca el apoyar investigaciones para el desarrollo e instrumentación de sistemas de vigilancia y respuesta más efectivos, así como proyectos que identifiquen necesidades de adaptación, destacando entre ellas el diseño bioclimático de edificios y el ahorro de energía por operación de los mismos (Comisión_Intersecretarial_de_Cambio_Climático, 2006).

En lo que respecta al área de asentamientos humanos y con base en los puntos anteriores es posible establecer pautas de diseño de ciudades sustentables bajo diferentes escenarios de cambio climático, con las debidas consideraciones de ahorro de energía y técnicas de adecuación ambiental en la edificación.

1.1.1 Justificación

A nivel mundial, la disponibilidad de energía se ha convertido en uno de los problemas más importantes. La mayoría de los países, tanto en vías de desarrollo como industrializados, se ven afectados por demandas crecientes de energía para satisfacer sus necesidades de desarrollo económico y social, ante este escenario la necesidad de complementar las fuentes comerciales de energía con fuentes no convencionales y la utilización de tecnologías limpias, es imperativa. En un futuro la oferta de energía deberá sufrir una transición desde su actual dependencia de los hidrocarburos hacia nuevas fuentes renovables ó combinaciones energéticas alternativas (Obiolis, 1987).

La crisis del petróleo ha servido como catalizador para que se aceleren las tendencias hacia investigaciones para el reemplazamiento del mismo como fuente energética básica. Para lo cual se ha avanzado en el estudio de las fuentes renovables de energía. Se consideran como renovables, los ritmos de consumo energéticos no superiores a los de producción ó generación de manera natural (Ortega, 2002).

En el sector residencial al igual que en los otros sectores de la sociedad, la energía utilizada se deriva de recursos no renovables y esa energía es consumida en forma irresponsable. Si se reduce el consumo de energía a través de sistemas más eficientes y la generación se realiza con recursos renovables, se tenderá hacia los sistemas energéticos más limpios y sustentables, que permitirán mantener el equilibrio ambiental del planeta. Además con el inminente agotamiento de los combustibles fósiles las tecnologías de fuentes renovables serán las opciones más viables para la producción de energía. Dentro de las nuevas fuentes energéticas que se consideran, para formar parte de la oferta energética del futuro, se tienen las llamadas fuentes no convencionales ó fuentes renovables de energía, constituidas por la energía solar, biomasa (cultivos energéticos, biogás, etc.), energía eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas, geotérmica, oceánica (mareas y olas), hidrógeno renovable, entre otras (Sørensen, 2004).

La vivienda requiere energía para cubrir las necesidades de climatización, conservación de productos perecederos, agua caliente, cocción, iluminación y para la operación de los equipos electrodomésticos (TV, radio, plancha, entre otros). Convencionalmente dichas necesidades son cubiertas directa ó indirectamente con combustibles fósiles (energía eléctrica y gas LP). La generación de energía eléctrica con procesos no sustentables y la utilización de equipos consumidores ineficientes en casas habitación, han provocado que el sector residencial cada vez tenga una mayor contribución en la problemática medioambiental y de infraestructura para la generación y distribución de la energía eléctrica.

En la actualidad cualquier edificio debe acoplarse a la red de servicio existente y depende totalmente de ésta. Por lo tanto, las ciudades se expanden con relación a sus límites periféricos, con el objeto de conservar las viviendas cercanas a la red de energía. Si estas restricciones son eliminadas, las viviendas se pueden construir en cualquier parte y disponer de su propia energía, evitando el malgasto de los recursos naturales que ofrece el entorno.

Una alternativa es la construcción de viviendas energéticamente sustentables que funcionen en forma independiente de cualquier tipo de alimentación exterior, a excepción de aquellas que provienen de su entorno inmediato. En donde la vivienda no esté vinculada a los principales servicios de gas, agua, electricidad ó alcantarillado a menos que provengan de fuentes renovables y en su lugar se utilice las fuentes de energía renovables disponibles en la región entre las que se encuentran: energía solar, eólica, biomasa, geotérmica, hidrógeno renovable, entre otras y sea capaz de procesar sus propios materiales de desecho, para su reaprovechamiento. Además es necesario realizar un adecuado diseño de las viviendas considerando una serie de estrategias ó principios de diseño bioclimático, con el propósito de construir una edificación de demanda energética mínima.

Lo anterior se ve reflejados en las líneas prioritarias de investigación y generación de conocimiento para adaptación de la estrategia nacional para el cambio climático (Comisión_Intersecretarial_de_Cambio_Climático, 2006) , entre las cuales destacan:

1. Fomentar la generación de electricidad con fuentes renovables y tecnologías bajas en intensidad de carbono de producción en sitio y evaluar su potencial de aplicación.

2. Inducir criterios de diseño ambiental en todos los ámbitos de planeación del desarrollo urbano y principalmente de la vivienda.
3. Evaluar el potencial de aplicación de tecnologías de localidades pequeñas bajo criterios de sustentabilidad y autosuficiencia.
4. Impactos en la demanda de energía eléctrica en casas habitación y edificios en relación con el inicio temprano y final tardío de la época de calor.

Además el Programa Nacional de Vivienda en México pretende impulsar el desarrollo de viviendas sustentables y entre las líneas a seguir en el plan nacional de vivienda 2007-2012 están:

1. Otorgar el Premio Nacional de Vivienda con las variantes necesarias para estimular parámetros de costos y sustentabilidad.
2. Instaurar las Normas Oficiales Mexicanas que garanticen la calidad de la vivienda.
3. Impulsar el programa de certificación y registro de modelos emblemáticos que estimulen la verticalidad, la sustentabilidad, el equipamiento, medidas de protección contra el cambio climático y el aprovechamiento óptimo de la infraestructura existente, el agua y la energía.
4. Promover ante los tres órdenes de gobierno el impulso de estímulos fiscales a la vivienda y el desarrollo habitacional sustentable.
5. Instaurar en los organismos nacionales de vivienda la “Hipoteca Verde” como mecanismo de financiamiento que estimule el desarrollo de proyectos habitacionales sustentables.
6. Poner en marcha un programa internacional para la promoción y fomento del desarrollo habitacional sustentable, que permita conocer, aprovechar e intercambiar experiencias de otros países y organismos especializados.
7. Empezar un programa de capacitación y formación de cuadros habilitados para fomentar y operar el desarrollo habitacional sustentable en los tres órdenes de gobierno, con participación de expertos de los ámbitos nacional e internacional.

Conforme a lo planteado anteriormente, es indispensable realizar investigación en donde se considere el uso de las fuentes renovables de energía como parte principal del sostenimiento energético de los espacios habitables. Esto sin olvidar que se deberá realizar un adecuado diseño de las edificaciones a través de los conceptos de diseño ambiental, adecuada selección de sistemas constructivos, adecuada selección de equipos altamente eficientes operados con energías limpias; con la finalidad de obtener edificios energéticamente sustentables.

1.1.2 Hipótesis

Con base en las investigaciones realizadas por Olgyay (2002), Givoni (1998) y Szokolay (2003) el diseño de una vivienda adecuada a las condiciones climáticas del lugar permite que sea energéticamente eficiente. En el caso de las tecnologías renovables, Chungloo (2007) Badescu (2006), Burnett (2007) Calderaro (2007) entre otros, afirman que la aplicación de estas tecnologías reduce tanto el consumo de energéticos de fósiles, como las emisiones de contaminantes por el uso de equipos convencionales. Por lo anterior la hipótesis de trabajo es:

Con la aplicación de técnicas de adecuación ambiental en el diseño de una vivienda residencial media alta en Mexicali, B.C. así como el uso de fuentes renovables de energía para climatización y agua caliente de uso doméstico se obtienen edificios confortables, ahorros de energía y reducción de contaminantes a la atmósfera.

Esta hipótesis se basa en que en la mayoría de los casos de la vivienda que actualmente se construye en Mexicali, B.C. no consideran el estudio del clima para la toma de decisiones en las propuestas de diseño, así como la selección de materiales y sistemas constructivos, lo que repercute en un comportamiento térmico inadecuado. Además, la implementación de tecnologías de energía termosolar tiene poca aplicación en edificios residenciales, sin embargo, representan una alternativa energética viable para la operación de sistemas para climatización y calentamiento de agua para uso doméstico.

1.1.3 Objetivo

Objetivo general

Diseñar una vivienda energéticamente sustentable con la integración de técnicas de adecuación ambiental en la edificación, así como el uso de energía solar térmica para climatización y agua caliente de uso doméstico, para dar respuesta a los requerimientos y necesidades energéticas de la vivienda y reducir el impacto ambiental.

Objetivos particulares

1. Realizar estudios de: a) clima de Mexicali, B.C. y su efecto en el comportamiento térmico del edificio y b) disponibilidad del recurso solar y factibilidad técnica de implementación de sistemas solares térmicos aplicados a la vivienda.
2. Diseñar y evaluar una vivienda residencial media para Mexicali B.C., mediante la aplicación de técnicas de adecuación ambiental en las condiciones climáticas del lugar, así como la evaluación del comportamiento térmico-energético del edificio.
3. Integrar en el diseño de la vivienda sistemas de aprovechamiento térmico para climatización y agua caliente para uso doméstico.
4. Evaluar la factibilidad técnica-económica de los sistemas solares térmicos aplicados a en la vivienda diseñada
5. Estimar la reducción del impacto ambiental por el uso de sistemas solares térmicos para climatización y agua caliente para uso doméstico, con respecto al uso de sistemas energéticos convencionales.

1.2 Antecedentes

Se hizo una revisión de antecedentes relacionados con la demanda de energía en la edificación, los casos análogos de vivienda energéticamente sustentable y el uso de energía renovables.

1.2.1 Vivienda

A nivel mundial se vive un proceso acelerado de urbanización y más de la mitad de la población mundial vive en ciudades (Edwards *et al.*, 2004). Para el caso de América Latina, la distribución espacial de población es del 75% en las ciudades y del 25% en el campo.

En el caso de México según el Censo General de Población y Vivienda 2000, se cuenta con 14.1 millones de hogares urbanos; de los cuales el 10% carece de agua potable; el 20.9% no tiene acceso al drenaje, y el 10% no cuenta con electricidad (CONAFOVI, 2001).

Al contar con ciudades con alta concentración de habitantes se tienen implicaciones económicas y sociales, lo cual, modifica y concentra las necesidades energéticas regionales, provocando un impacto en la demanda de energía, que afecta en forma general el abasto energético nacional.

La demanda de vivienda en México según el Programa Nacional de Vivienda 2007-2012 es de 6 millones de viviendas en el presente sexenio, ya que actualmente se cuenta con un rezago de 2.1 millones. (Presidencia_de_la_República, 2008). Baja California actualmente representa el 2do lugar a nivel nacional en demanda de vivienda y se requieren 57,237 viviendas nuevas al 2008 de las cuales para el municipio de Mexicali representan 5,775. (CONAFOVI, 2007).

De acuerdo al Censo general de población del 2000 la distribución de hogares por nivel de ingresos se muestra en la tabla 1.1, los usuarios de vivienda media cuentan con ingresos menores a 10 salarios mínimos y representan el 22.1% de los hogares que demandarán vivienda nueva construida anualmente.

Tabla 1.1: Distribución de hogares según tipo de ingreso, 2000

GRUPO DE INGRESO (por salario mínimo)	HOGARES	%
Menos de 1	1,757,128	7.9
De 1 a 2	3,864,725	25.3
De 2 a 3	33,478,639	15.6
De 3 a 5	4,993,674	22.4
De 5 a 10	4,929,544	22.1
Más de 10	3,214,252	14.4
No especificado	30,754	0.2
TOTAL	22,268,916	100

Fuente: XII Censo General de Población y Vivienda 2000, INEGI.

Por lo tanto el sector de vivienda media representaba 3,218,697 hogares al año 2000 (ver tabla 1.1) que de acuerdo a la tabla 1.2 tienen una área de construcción de entre 56 y 100 m².

Tabla 1.2: Vivienda según tipo de construcción

TIPO DE VIVIENDA	HOGARES	%	PROMEDIO (en m ² de construcción)
Básica	9,113,278	40.9	hasta 30
Social	5,000,580	22.5	de 31 a 45
Económica	4,936,361	22.2	de 46 a 55
Media	3,218,697	14.4	de 56 a 100
Media alta			de 101 a 200
Residencial			Más de 200

Fuente: Dirección General de Política y Fomento a la Vivienda, SEDESOL

1.2.2 Energía en la edificación

Un factor determinante en el consumo energético es la constante urbanización y crecimiento desmedido de las ciudades, ya que la población que antes se encontraba distribuida en forma dispersa en comunidades rurales, ahora ha emigrado hacia las ciudades, lo que genera un mayor crecimiento de sus poblaciones, y conforma grandes y medianos centros urbanos.

El suministro de energía eléctrica en México está basado en la explotación de recursos energéticos naturales como el petróleo, gas natural y carbón, que constituyen la base indispensable sobre la que se apoyan casi todas las actividades de nuestra existencia; pero es un recurso que no es inagotable y que en la actualidad existe una crisis energética mundial de combustibles fósiles. Es por lo tanto, importante considerar que estos recursos son finitos y que se tiene que pensar en formas de producción de energía a partir de fuentes renovables que produzcan energía limpia, con un bajo impacto ambiental.

Como se puede observar en la tabla 1.3, las estadísticas muestran que la demanda energética en México ha tenido un aumento considerable, lo que ha repercutido en grandes inversiones para el crecimiento de la capacidad instalada por parte de CFE (Comisión Federal de Electricidad) y LFC (Luz y Fuerza del Centro)

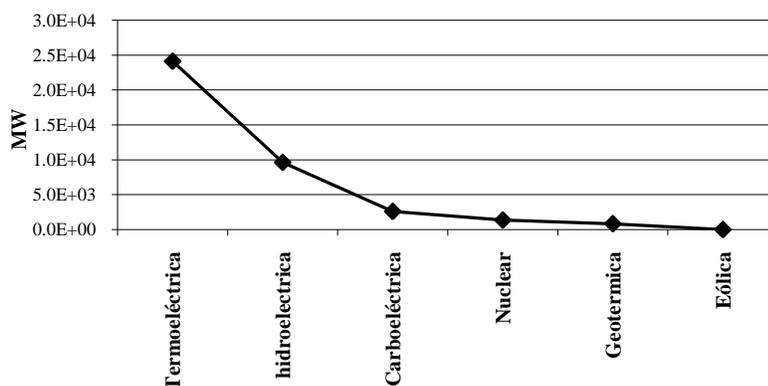
La capacidad instalada en el año de 1990 era de 25,293 MW y para el año 2001 ascendió a 38,518 MW lo que indica que se requirió un aumento de capacidad en la última décadas del 52.29%.

Tabla 1.3: Capacidad instalada en sistema eléctrico nacional (MW)

	TOTAL	Termoeléctrica	Hidroeléctrica	Carboeléctrica	Nucleoeléctrica	Geotermoeléctrica	Eólica
1990	25293.0	14914.0	7804.0	1200.0	675.0	700	-
1991	26797.0	16271.0	7931.0	1200.0	675.0	720	-
1992	27068.0	16532.0	7931.0	1200.0	675.0	730	-
1993	29204.3	17718.3	8171.0	1900.0	675.0	740	-
1994	31648.8	19198.3	9121.0	1900.0	675.0	752.9	1.6
1995	33037.3	19394.8	9329.0	2250.0	1309.1	752.9	1.6
1996	34791.0	20101.1	10034.4	2600.0	1309.1	743.9	1.6
1997	34814.7	20120.5	10034.4	2600.0	1309.1	749.9	1.6
1998	35255.6	20894.6	9700.4	2600.0	1309.1	749.9	1.6
1999	35666.3	21327.4	9618.8	2600.0	1368.0	749.9	2.2
2000	36696.3	22255.1	9619.2	2600.0	1364.9	854.9	2.2
2001	38518.5	24094.1	9619.2	2600.0	1364.9	837.9	2.2

Fuente: SENER, Balance Nacional de Energía

En la figura 1.1, se muestran las principales formas de producción de energía eléctrica necesarias para las actividades productivas de México hasta el 2001, entre las que se encuentra la energía termoeléctrica con 62.55%, hidroeléctrica 24.97%, carboeléctrica 0.067%, nucleoeeléctrica 0.035%, geotermoeléctrica 0.02% y eólica con un 0.00005%. (SENER, 2007)



Fuente: SENER, Balance nacional de Energía

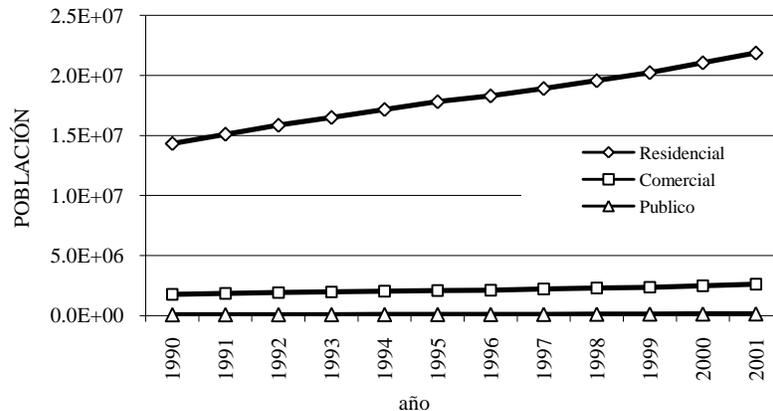
Figura 1.1: Tipo de producción de energía eléctrica en México, 2001

De acuerdo a los rubros de producción de energía, se puede observar que los combustibles fósiles son la fuente energética más importante en la producción de energía eléctrica en México, ya que el 62.62 % (termoeléctrica y carboeléctrica) de la producción es obtenida a partir de dichos combustibles. El principal efecto en los altos consumos de energía eléctrica en el sector residencial, está en la urbanización y el crecimiento poblacional, ya que la población, al emigrar del campo a la ciudad, modifica sus necesidades energéticas; la urbanización transforma los espacios donde se realizan las actividades económicas y sociales, además de que modifica la forma en la que los seres humanos interactúan con estos espacios, y demandan mayores cantidades de energía, ya que las actividades de los usuarios urbanos, dependen en mayor medida del espacio cerrado. De tal forma que se tiene cada vez mayores cantidades de seres humanos dentro de espacios de su propia creación, de esta manera las necesidades que se podían satisfacer con poca ó nula energía se cubren hoy al hacer uso de grandes cantidades de la misma.

El consumo energético residencial, comercial y público es el 21.3% del consumo final total nacional para el año 2001, con 841.8 PJ de los 3941.3 PJ de consumo final total. (SENER, 2007). Lo cual atiende a una población total de 24,625,529 de usuarios en todo el país. Las necesidades energéticas del sector residencial, comercial y público en México son satisfechas a partir de leña, derivados del petróleo, gas LP, querosenos, gas natural y electricidad. De los cuales representó para el año 2001, un 37.04% la leña, 41.11% los derivados del petróleo, 40.96% el gas LP, 0.002% el queroseno, 0.017% el gas natural y 19.98% la electricidad. El sector residencial es el más importante del rubro al cual pertenece, ya que representó en el 2001 un consumo de 18.91% del consumo nacional al atender una población de

21,872,28 de usuarios. Mientras que el sector comercial es el 2.26% con una población total de 2,611,817 usuarios y el sector público con un 0.01% lo que representa una población total de 141,424 usuarios.

En la figura 1.2 se puede apreciar que la demanda energética nacional por parte del sector residencial se ha incrementado en forma considerable, y se tiene una tasa de crecimiento promedio anual de 4.3% en los últimos 12 años.

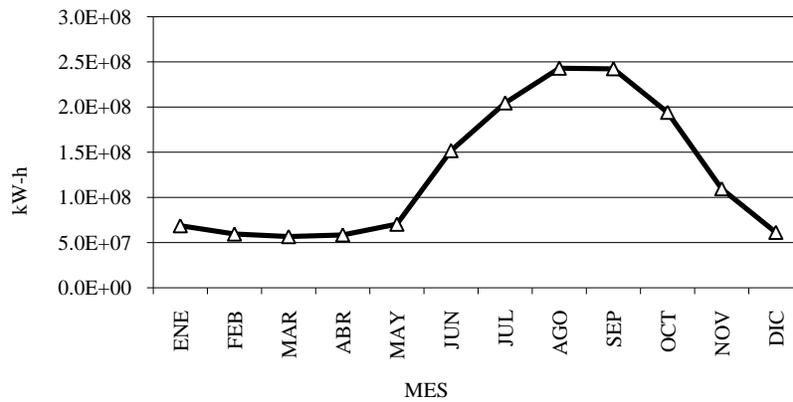


Fuente: Elaborada a partir de CFE

Figura 1.2: Población anualmente atendida por el sector eléctrico, México, 1990-2001

El estado de Baja California es un alto consumidor de energía eléctrica debido a sus actividades económicas y a las condiciones ambientales con que cuenta. Sin embargo, la mayor demanda energética en el sector residencial se da en el municipio de Mexicali, ya que los municipios de Tijuana, Tecate y Ensenada, representan un consumo eléctrico residencial del 25%, mientras que en Mexicali el consumo residencial representa entre el 35 y 41% del consumo total (Romero, 2002).

El consumo excesivo en el caso del municipio de Mexicali, es atribuido al acondicionamiento térmico de espacios a partir de sistemas de enfriamiento convencional utilizados durante los meses de mayo a octubre, como se puede apreciar en la figura 1.3, razón por la cual el consumo per cápita en el estado de Baja California fue de 503 kWh por unidad familiar, para el año 2003.

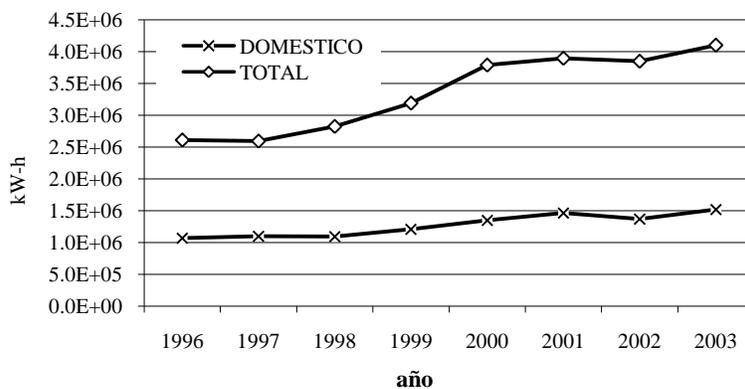


Fuente: Elaborada a partir de CFE

Figura 1.3: Consumo doméstico mensual del municipio de Mexicali, 2003

En el 2003 se tuvo un consumo eléctrico anual de 1,521 GWh, que representa un consumo per cápita del 5.92 MWh/año. Valor por encima de la media nacional de 1.568 MWh/año. Cabe destacar que los mayores consumos se dan en el período de verano entre los meses de mayo a septiembre. Los meses críticos por consumo eléctrico son agosto y septiembre (ver figura 1.3), mientras que el menor consumo se registra en el mes de Marzo y representa el 23% respecto al consumo registrado en el mes crítico (CFE, División Baja California, 2003).

Uno de los problemas más importantes que presenta el Municipio de Mexicali es el constante incremento en requerimientos de capacidad instalada para abastecer la demanda eléctrica, ya que el aumento poblacional y otros factores generan un incremento en la demanda eléctrica, como se puede observar en la figura 1.4.



Fuente: Elaborada a partir de CFE

Figura 1.4: Consumo doméstico en municipio de Mexicali

1.2.3 Energías renovables para la edificación

Entre los intentos de generación de vivienda energéticamente sustentable, se encuentra una amplia gama de investigaciones en donde las energías renovables han sido tomadas en cuenta para el abastecimiento energético del edificio. Sin embargo, en estudios encontrados se consideran solo algunas formas de aplicación de fuentes renovables y la aplicación de sistemas activos de enfriamiento operados con energía solar térmica han sido poco estudiados.

En 2007 en Mar del Plata Argentina se construyó una torre de viviendas energéticamente sustentable. El edificio cuenta con área de muros vidriada al 80%, lo que permite que durante la mayor parte del día cuente con iluminación natural. Cada vivienda cuenta con calefacción por piso radiante, además de que cuenta con un generador eólico que produce 4,5 kilowatts. La torre de viviendas entrará en operación a partir de febrero del 2008 (Soriano, 2008).

La Universidad de Puerto Rico (UPR) realizó un proyecto de una casa autosustentable y energéticamente autónoma, con la cual, se participó en la competencia Décalo Solar, auspiciada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, en donde se evaluó el diseño, habitabilidad, refrigeración, agua caliente, iluminación y balance entre producción y consumo de energía. El diseño y construcción, se realizó por parte de la Escuela de Arquitectura del Recinto de Río Piedras y el Departamento de Ingeniería Mecánica del Recinto Universitario de Mayagüez (RUM). La vivienda cuenta con celdas fotovoltaicas y es capaz de almacenar hasta 5 kW de energía, (suficiente para cuatro días). La casa tiene 75 m² de construcción con 4.87 m ancho, 14.5 m de largo y 5.48 m de alto. Los sistemas constructivos en muros son poliestireno y madera, las ventanas tienen doble vidrio con espacio de aire en el interior, con techo abovedado. En la vivienda se implementó un sistema híbrido de acondicionamiento de aire para enfriamiento, mientras que para calefacción se utiliza agua caliente (UPR, 2003).

Otro ejemplo es el de la casa construida con pacas de paja por De Garrido (2003) de España, intento de construir la vivienda bajo un modelo de construcción sustentable. La vivienda se construyó en el Cabo de Gata en Níjar (Almería). Se trata de una vivienda edificada con materiales del entorno y que se abastece con sus propios recursos. El edificio consume tan sólo el 10% de la energía de un edificio convencional de sus características. La calefacción es por suelo radiante con el método Katchadorian, que aprovecha recalentamientos solares y los transmite a las partes más frías de la casa. La calefacción de apoyo para días nublados es a base de una estufa de biomasa. Tiene captadores de viento que obtienen aire de la fachada norte y se conducen a través de túneles subterráneos.

El grupo de Energía y Medio Ambiente del IDEHAB (Instituto de Estudios del Habitat) de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de la Plata de Argentina, realizó en 1978 un prototipo de 80 m² de construcción, del cual se construyeron 30 viviendas que contemplan: conservación de energía, calefacción solar, enfriamiento pasivo y calentamiento solar de agua. Dicho prototipo fue parte de un proyecto de construcción en serie del Fondo Nacional de Vivienda (FONAVI). Otra investigación realizada por el grupo del Instituto de Estudios del Hábitat (IDEHAB) en 1981 es el prototipo de vivienda “La Pampa, Santa Rosa” de 450 m² de construcción. Se considera la conservación de energía, calefacción solar, enfriamiento adiabático, aire acondicionado y producción de agua caliente solar (IDEHAB, 2003).

El Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI), del Perú, realizó un proyecto de "Electrificación de poblaciones insulares y circundantes del Lago Titicaca con el uso de energía fotovoltaica", que implica la electrificación de 250 viviendas en las islas Taquile, Amantaní, Soto, Uros, Suasi y Huancho. En el proyecto se instalaron sistemas fotovoltaicos, con capacidad de generación de 100 kWh por día. Con el proyecto se probó la viabilidad técnica, social y económica, además de ser ecológico y sostenible. El objetivo principal fue "Garantizar el suministro de energía eléctrica a la población rural, en forma sostenible, con el menor costo posible y el menor efecto nocivo sobre el medio ambiente, y considerar, en especial, el uso de energías renovables" (CER-UNI, 2003).

El Instituto Politécnico Nacional (IPN) y el Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT) unirán esfuerzos durante el 2008 para desarrollar proyectos conjuntos en materia de investigación para la creación de viviendas energéticamente sustentables que cuenten con mecanismos de ahorro de energía y que hagan sustentable el costo de energía que se consume. En este programa se pretende la creación de viviendas innovadoras que integren tecnologías que fomenten el cuidado al ambiente, ahorden energía e incluyan servicios de telecomunicaciones como banda ancha e internet.

En 2007 la SENER (Secretaría de Energía) a través de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), pusieron en marcha el Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México denominado (PROCALSOL). La principal meta consiste en tener instalados, en el año 2012, un millón 800 mil metros cuadrados de calentadores solares en los sectores habitacional, comercial, industrial, agrícola y textil. Se estima que, al término del programa, se obtendrá una reducción anual de 249 millones de litros en el consumo de gas LP y se evitarán emisiones a la atmósfera de 372 mil 600 toneladas de CO₂ cada año. En el sector residencial se pretende instalar estos sistemas en "vivienda sustentables" ("vivienda ecológica" o "hipotecas verdes") del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT) y la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI).

Estudios recientes en la Universidad Autónoma de México por Pilatowsky *et al* (2007) muestran la factibilidad de un módulo de vivienda de interés social, con estrategias del ahorro de energía en una vivienda de interés social en la región noroeste de México. En dicho proyecto se presenta una metodología para disminuir la demanda por diseño bioclimático, además de la implementación de equipamiento para climatización (aire acondicionado y calefacción) y calentamiento de agua. El proyecto fue presentado en el seminario: Red Iberoamericana para el Uso de Energías Renovables y Diseño Bioclimático en Viviendas y Edificios de Interés Social del CYTED, Seminario Edificios Bioclimáticos de Interés Social en Iberoamérica, México, DF en junio del 2007. (Pilatowsky *et al.*, 2007)

Se construyeron 95 viviendas ecológicas de interés social en el Fraccionamiento Hacienda de las Torres en Ciudad Juárez en colaboración con el INFONAVIT. Las viviendas tienen un sobre costo del 7% por implementación de medidas de ahorro energético, el cual fue incluido en la mensualidad del crédito. Las ecotecnologías utilizadas son: calefactor solar, trampa de calor en sustitución a la energía eléctrica; inducción de aire frío; focos ahorradores; impermeabilización especial; orientación de norte a sur de las casas para aprovechar la energía solar; boquillas especiales en regadera, llaves de baños y tarjas (ArquiRed, 2000).

En el caso de las Casas Solares de Mexicali, se utilizó la energía solar para operar sistema de enfriamiento termosolar y de calentamiento de agua para uso doméstico. Para lo cual se colocó sobre la totalidad del techo un banco de colectores planos para dar abastecimiento de agua caliente al generador del sistema de

absorción propuesto en dicho proyecto. Además se realizó un diseño adecuado de la vivienda en donde se consideró: el uso de la masa térmica y el adecuado diseño de ventanas para una reducción de captación solar. Con el proyecto se probó que los sistemas termosolares ofrecen buenos resultados para la producción de acondicionamiento de espacios. (Tanner *et al.*, 1987)

En el caso de México una de las experiencias de mayor impacto el proyecto SONNTLAN desarrollado en 1978, por la Comisión Mixta de Cooperación Científica y Tecnológica entre México y Alemania. El principal objetivo de este trabajo estuvo basado en el aprovechamiento de la energía solar, para pequeñas comunidades rurales y asentamientos urbanos de México. Para tal efecto se realizaron dos proyectos: El Sistema Solar Integral de Las Barrancas en B.C.S. que cubría los aspectos rurales y las Casas Solares de Mexicali que representaría al entorno urbano. Ambos proyectos concebidos para operación totalmente solar y automatizados (Haberda, 1987). En el caso de Las Barrancas se utilizó un sistema integrado con colectores planos, colectores con concentración, paneles fotovoltaicos y aerogeneradores. En este proyecto la energía solar se basó en la operación de una planta procesadora de pescado, en donde se tenían requerimientos de: fabricación de hielo, cámara de refrigeración, desalinización y alimentación de energía eléctrica para los equipos a operar. El objetivo principal de satisfacer la demanda total no fue cubierto, sin embargo, el requerimiento de energía para refrigeración, hielo y agua desalada fueron satisfechos en un 50%.

CAPITULO 2. ENERGÍA, CLIMA Y DISEÑO AMBIENTAL

El Sol es una estrella con masa gaseosa de 1.99×10^{30} kg y diámetro de 1.39×10^9 m, se encuentra a una distancia promedio de la Tierra de 1.5×10^{11} m; por el efecto gravitacional de su masa domina al Sistema Solar, y mediante la radiación aporta directa o indirectamente la energía que mantiene la vida de la Tierra. La función insustituible de los rayos solares es obvia ya que la vida es manifestación de esta. Sin ella no hubieran aparecido ni vivirían las plantas y, en consecuencia, tampoco existiría la vida animal y humana.

El aprovechamiento de fuentes de energía ha dado oportunidad al hombre para dedicarse a tareas intelectuales. Sin embargo, no se percibe que el nivel de bienestar alcanzado por la humanidad, es consecuencia de la creciente cantidad de energía de la que el hombre dispone; y se debe tomar en cuenta que esta energía es finita. En la actualidad la civilización urbana de los seis mil millones de hombres que habitan la tierra, no sería concebible sin el aprovechamiento de fuentes de energía cada vez mayores. De ellas dependen la luz que se utiliza, el calor que hace confortables a los hogares y las fuerzas mecánicas que trabajan para los humanos.

Poco a poco se ha tomado conciencia de que la energía se encuentra disponible en todos lados como fuente limpia e inagotable. El sol es una fuente natural de energía que da luz y calor, modula el clima e impulsa los ciclos que determinan la vida del planeta. El sol envía diez mil veces más energía de la que la humanidad puede utilizar. Hace llegar en 40 minutos el consumo de un año entero. En sólo un día y medio, regala el equivalente a toda la energía fósil que la humanidad ha conseguido hasta ahora. El sol brillará aún dentro de cinco mil millones de años. No hay temor alguno de que se agote, además por sus cualidades no contaminantes sin generación de gases tóxicos y residuos peligrosos, es sin duda alguna la mejor opción energética actual.

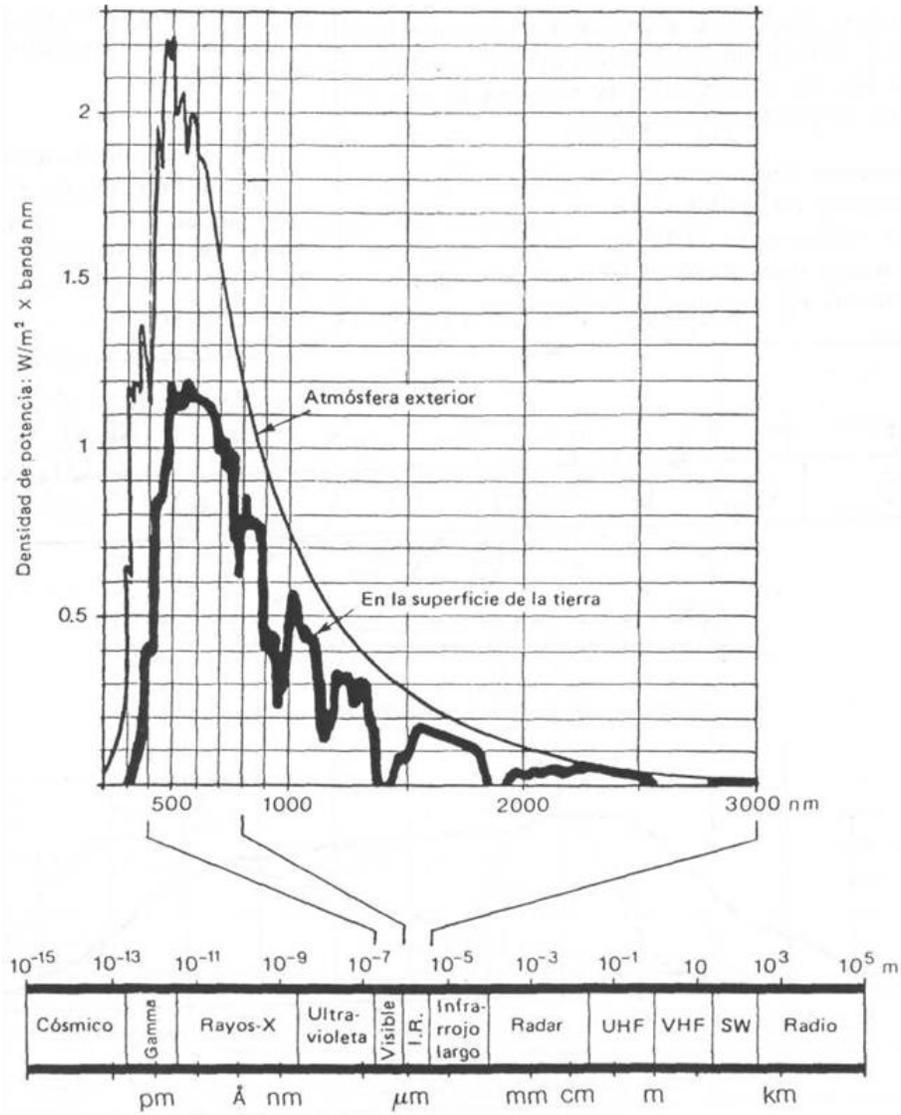
La energía solar, abundante, no contaminante, y convertible en energía útil en el mismo lugar de captación, tiene algunos inconvenientes: se encuentra dispersa, es intermitente y está sometida a variaciones estacionales. Por lo que es aprovechable si se concentra, acumula y almacena para su uso durante horas en que no se cuenta con el recurso solar.

2.1 Radiación solar.

La energía luminosa emitida por el sol, cuya emisión tiene lugar a través del fenómeno físico denominado radiación, se propaga en todas las direcciones del espacio. Una pequeña parte de esa energía (1367 W/m^2) llega a la atmósfera; pero no llega en forma térmica, sino bajo la forma de ondas electromagnéticas en longitudes de onda corta. Del total de energía que llega a la atmósfera solamente una parte de la energía solar llega a la superficie terrestre, y esto depende de varios factores tales como las nubes, polvos en suspensión entre otros.

Los rayos solares a nivel de la tierra (ver figura 2.1) pueden clasificarse en tres grupos principales (CCC, 1982):

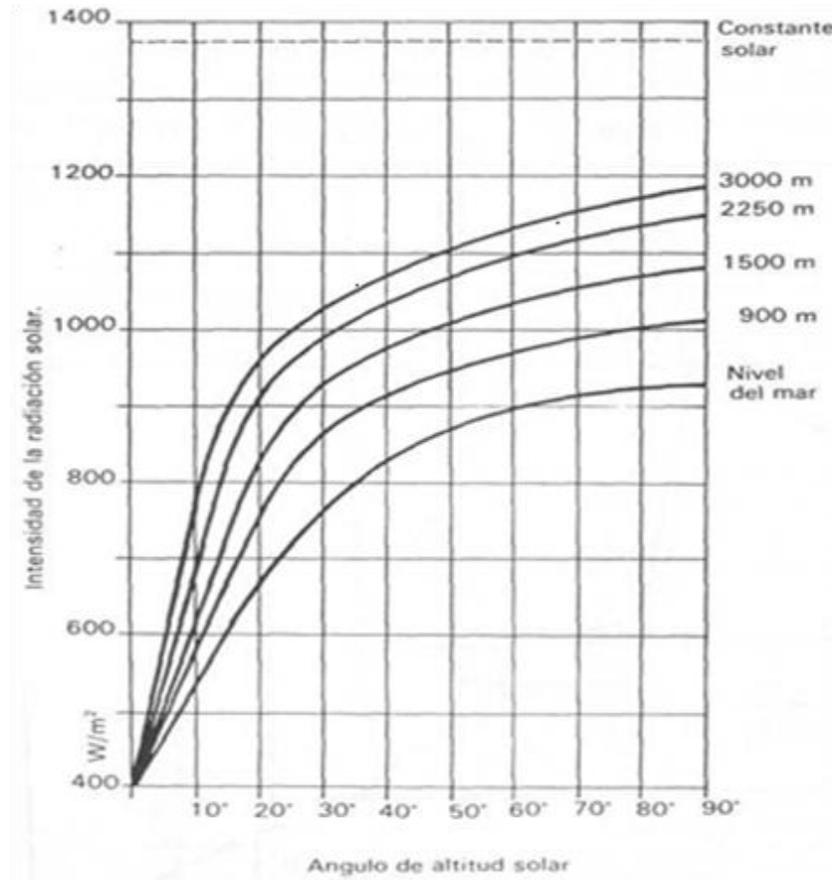
- Rayos infrarrojos (46% efectos caloríficos)
- Luz visible (47% efectos luminosos)
- Rayos ultravioleta (7% efectos químicos)



Fuente elaborada a partir de CCC (1982)

Figura 2.1: Espectro de radiación solar en relación con el espectro electromagnético total

La absorción atmosférica reduce esa intensidad en una medida que depende parcialmente de la longitud del recorrido a través de la atmósfera y parcialmente del estado de la masa de aire (nubosidad, partículas suspendidas). Cuando el sol se encuentra en un ángulo de altitud bajo, la intensidad es menor. Con una posición cenital, la intensidad media sobre un plano horizontal puede acercarse a 1 kW/m^2 a nivel del mar como se puede observar en la figura 2.2.



Fuente: CCC (1982)

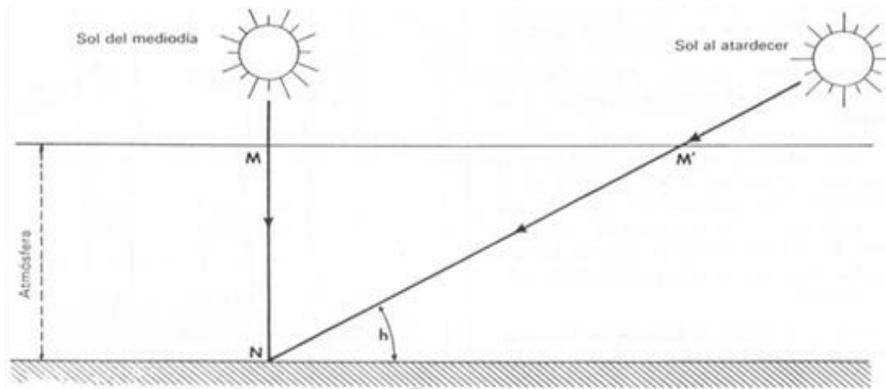
Figura 2.2 Variación de la radiación solar directa, respecto a altura y ángulo de incidencia

La mayor ó menor transparencia de la atmósfera depende principalmente del grado de humedad, también influyen la presión y la altitud del lugar, y la contaminación. Como consecuencia de la suma de varios factores, la atmósfera disipa una gran parte de la energía que proviene del sol; esta acción la realiza de tres maneras:

- Por difusión molecular (sobre todo para los rayos ultravioletas).
- Por reflexión difusa sobre los aerosoles (polvo, pequeñas gotas, etc.).
- Por absorción gaseosa.

El espesor de las capas de aire que tiene que atravesar la radiación, es decir, la altura del sol sobre el horizonte (ver figura 2.3), variable a lo largo del día y del año, tiene un efecto equivalente al de una transparencia variable. Cuanto más bajo está el sol sobre el horizonte, mayor es la capa de aire que han de atravesar los rayos y menor, por tanto, la energía que llega al suelo.

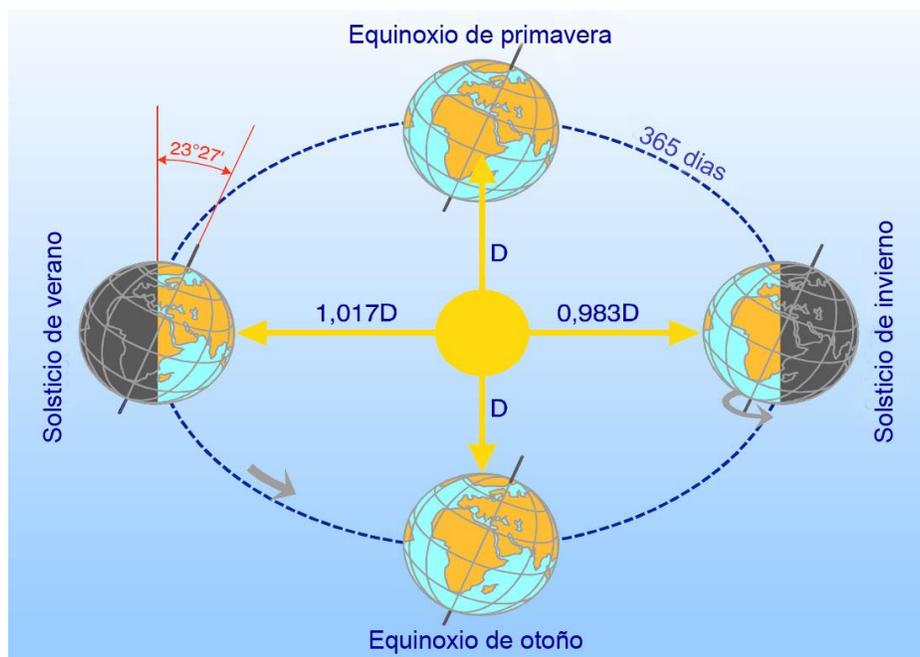
Cuando el ángulo (h) que forma el plano horizontal del lugar con los rayos solares llega a ser inferior a 15° , es inútil pretender captar estos rayos. El espesor de aire que deben atravesar absorbe casi toda su energía. En la figura 2.3 se ve que $M'N$ es una longitud mucho mayor que MN .



Fuente: Sanchez (2006)

Figura 2.3: Efecto de la masa de aire en la reducción de captación solar

La cantidad de energía recibida por una superficie depende de la época estacional según lo mostrado en la figura 2.4 y de variables ambientales tales como nubosidad ó humedad. A su vez, las estaciones climáticas son consecuencia del movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol y de la inclinación del eje terrestre sobre el plano de la eclíptica (Watson, 1983).

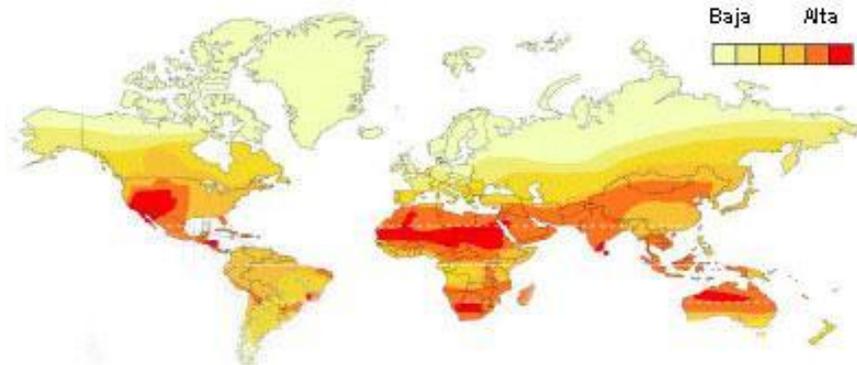


Fuente: Modificado de Liebard *et al* (2005)

Figura 2.4: Movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol

2.1.1 Disponibilidad del recurso solar en México

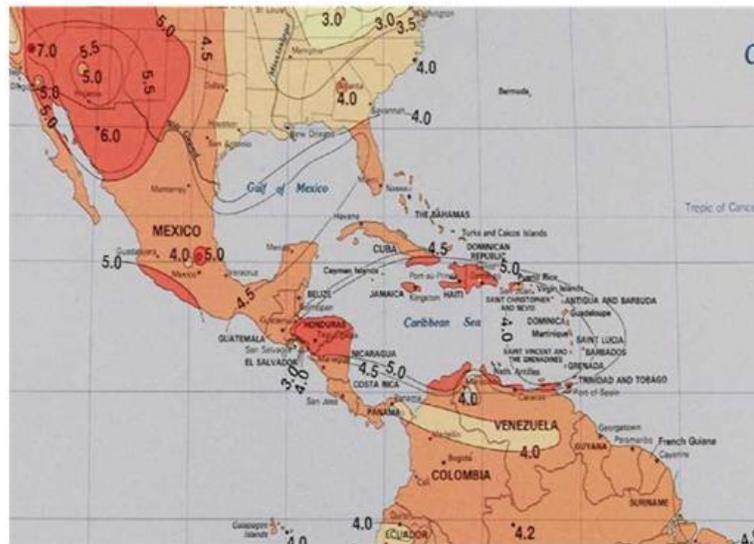
México está situado entre los paralelos 14 y 32 de latitud norte, se encuentra entre los países latinos más favorecidos por la radiación solar como se puede observar en la figura 2.5; por tanto, con mayores posibilidades de aprovechamiento de esta fuente de energía.



Fuente: www.oksolar.com

Figura 2.5: Zonas con mayor disponibilidad de energía solar

La mayor parte de México cuenta con un potencial considerable de energía para su utilización como energía útil, en la figura 2.6, se muestra el potencial de horas pico para las diferentes zonas de México. Se puede observar que Mexicali B.C. es de las zonas con mayor potencia del orden de 5 horas pico de insolación.



Fuente: www.nasa.gov

Figura 2.6: Horas pico de energía disponible en la República Mexicana

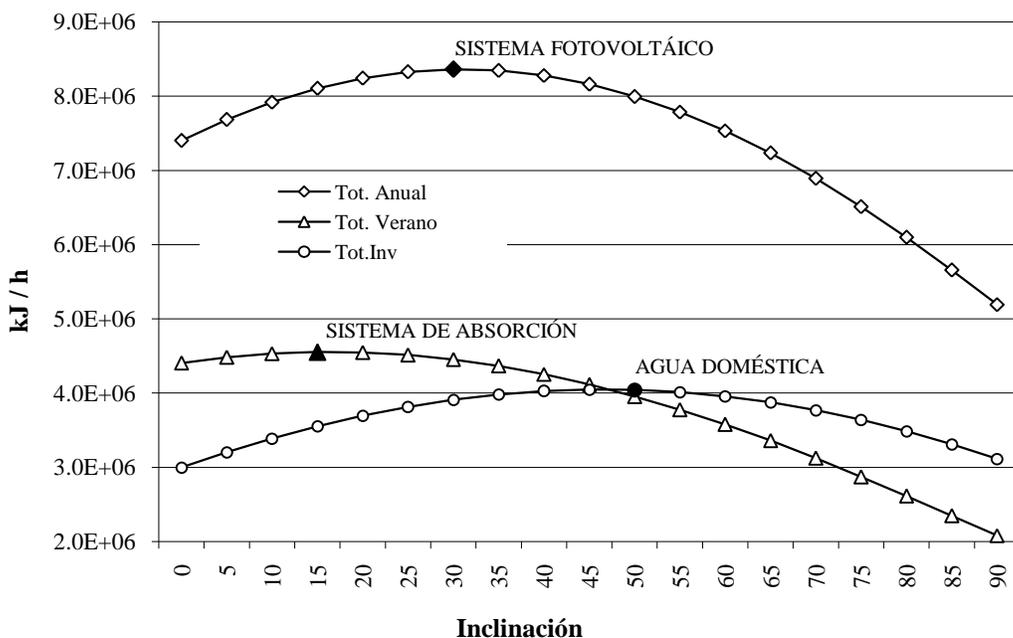
2.1.2 Recurso solar en Mexicali, en diferentes planos de captación.

Para una mejor captación de energía es necesario realizar una adecuada orientación del colector solar de acuerdo al movimiento aparente del sol, se busca que la mayor parte del tiempo el sistema de colección reciba los rayos solares en forma perpendicular. Cuando no se cuente con dispositivos de seguimiento solar, se deberá escoger una posición fija que permita al captador obtener el máximo posible de energía.

En la figura 2.7 se muestra que la inclinación adecuada de un sistema de captación depende del uso final del calor útil. Para un sistema de producción de energía fotovoltaica la adecuada inclinación para un sistema fijo se encuentra aproximadamente a 30° al sur (similar a la latitud de Mexicali 32°), esto debido a que la demanda de energía tendrá que permanecer disponible durante todo el año.

En caso de requerir el calor útil para operación de un sistema de enfriamiento por absorción, la adecuada inclinación es de aproximadamente 15° ya que la demanda del sistema se da en el período de verano y los rayos solares inciden con una mayor altura solar requiriendo poca inclinación de los colectores.

Para un sistema fijo para calentamiento de agua para uso doméstico este deberá ser de aproximadamente 50° , esto debido a que la incidencia de los rayos solares disminuye y se requiere que la superficie captadora de energía útil este más vertical.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos meteorológicos SMN

Figura 2.7 Inclinación para diferentes tecnologías térmicas en B.C.

2.2 Sistemas de aprovechamiento térmico

En el Balance Energético Nacional (SENER, 2007) se señala que un 90% de la energía proviene de combustibles fósiles y las tendencias mundiales en el consumo de energías primarias muestran una participación creciente del gas natural. El consumo de estas fuentes de energía finitas son las causantes en forma indirecta de una parte considerable de la contaminación ambiental, lo que contribuye de forma fundamental al efecto invernadero y calentamiento global del planeta. Si se reduce el consumo de energía a través de sistemas más eficientes y la generación de energía se realiza con recursos renovables, se tenderá hacia sistemas energéticos más limpios y sustentables, que permitan mantener el equilibrio ambiental del planeta.

2.2.1 Calentamiento térmico del edificio y agua para uso doméstico

El sol envía energía radiante, con un potencial de calor útil para producción de agua caliente, energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos entre otros usos. Las instalaciones de aprovechamiento de energía térmica se clasifican en pasivas y activas. En las instalaciones pasivas se produce climatización (calefacción o refrigeración) sin la utilización de dispositivos mecánicos. Las instalaciones activas son utilizadas para el calentamiento de fluidos, normalmente agua, y para el enfriamiento de aire ó climatización de espacios.

En los procesos térmicos, la energía solar se usa para calentar un líquido ó gas que posteriormente se utiliza como medio para obtener calor útil. Los dispositivos térmicos más utilizados en la obtención de energía útil para calentamiento de agua son los colectores de placa plana, concentradores parabólicos, concentradores parabólicos compuestos y tubos evacuados, de los cuales, el que representa un menor costo de inversión inicial y tiempo de recuperación son los colectores de placa plana (Velázquez, 2002). Las aplicaciones más comunes son: generación de agua caliente sanitaria para hogares, hospitales y hoteles; calentamiento de piscinas y climatización solar.

Los colectores térmicos solares se dividen en tres categorías, colectores de baja temperatura, utilizados principalmente para calentamiento de agua por debajo de la temperatura de ebullición; colectores de temperatura media, dispositivos de concentración solar que entregan líquido caloportador a una temperatura de entre los 100 y 300°C y por último los colectores de alta temperatura, que operan a valores mayores de 500°C utilizados para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica.

Dentro de las tecnologías de calentamiento solar de agua se encuentran las que se describen a continuación:

- *Colector solar de placa plana:* es el más representativo de la tecnología solar térmica a baja temperatura. La cantidad de energía captada por estos sistemas depende de la radiación solar disponible que incide sobre el colector, los materiales de construcción, la geometría, las condiciones de operación entre otros. Cabe mencionar que estos colectores pueden contar con una ó más cubiertas transparentes para reducir las pérdidas de calor de la placa de absorción, para obtener una mayor eficiencia del sistema. Una de las restricciones de este tipo de sistemas es que la temperatura de calentamiento del agua es de entre 27 y 90°C (Velázquez, 2002), con eficiencias de captación de entre el 40 y el 80%.

El sistema de captación de placa plana (ver figura 2.8), está compuesto por: 1) marco de aluminio anodizado; 2) cubierta de vidrio templado con alta transmitancia; 3) placa absorbedora, con aletas de cobre; 4) dispositivo de alimentación; 5) aislante térmico y 6) caja del colector, galvanizada.

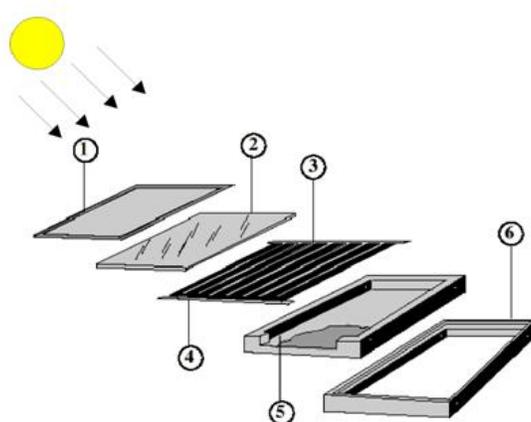


Figura 2.8: Componentes de calentador placa plana

Para la operación del dispositivo de calentamiento de agua solar es necesario el acoplamiento de varios subsistemas entre los que se encuentran:

Subsistema de captación, formado por colectores de placa plana, que convierten la energía radiante en térmica. Dicho dispositivo debe contar con una considerable eficiencia de captación solar, para lo cual es necesaria una superficie con alta absorptividad, un elemento translúcido con excelentes propiedades de transmitancia y un excelente sistema de aislamiento para evitar pérdidas con el medio ambiente por efecto de conducción.

Subsistema de almacenamiento, constituido por depósitos para almacenar agua caliente del sistema de captación, para su uso posterior. Es importante que se cuente con un sistema de aislamiento para que mantenga una buena calidad de energía en el agua. Además, el líquido caloportador se deberá almacenar a temperatura por encima de los 40°C por un periodo de 3 días por si las condiciones meteorológicas no son favorables, para garantizar una adecuada temperatura para el uso final de que se disponga.

Subsistema de distribución y consumo, constituido por redes de tuberías con un adecuado sistema de aislamiento para evitar pérdidas por conducción, bombas y algunos otros accesorios; se encarga de transportar el agua caliente desde el sistema colector al termotanque y desde el termotanque al consumo.

Subsistema de control y monitoreo, que se encarga de evitar flujo no deseado, que puede producir enfriamiento del agua cuando la temperatura en el colector es menor a la del sistema de almacenamiento, los dispositivos utilizados son válvulas de protección por sobrecalentamiento, válvulas de paso, manómetros, termómetros entre otros.

Según el sistema de termotransferencia, las instalaciones se pueden clasificar en dos grupos.

1) *Transferencia térmica indirecta.* Sistema formado por dos circuitos independientes: el primario por donde circula el fluido portador de calor útil y el secundario que contiene al agua caliente de consumo que alimenta a la vivienda como se muestra en la figura 2.9. A este tipo de sistemas se les conoce como sistemas de circulación forzada ya que utilizan bombas para hacer circular el agua. A pesar de esto el costo del sistema de calentamiento de agua no es elevado y la potencia necesaria para hacer funcionar la bomba es pequeña.

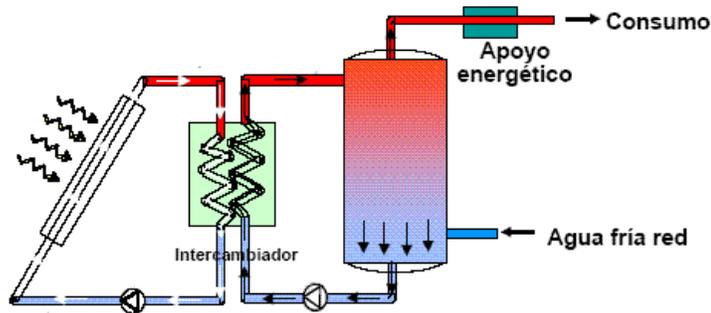


Figura 2.9: Sistema de calentamiento indirecto

2) *Transferencia térmica directa.* El agua sanitaria pasa directamente por los colectores, esto es, el circuito primario está comunicado con el acumulador como se muestra en la figura 2.10 (no usan intercambiador y sólo hay un circuito). Éste tipo de sistemas es comúnmente conocido como termosifón y el tanque acumulador está por encima del nivel de los colectores. En estos sistemas el movimiento del agua se produce por diferencia de densidades entre el agua fría del tanque estratificado que baja al captador solar y el agua caliente del colector que sube al acumulador; provocándose circulación natural del agua a través del sistema.

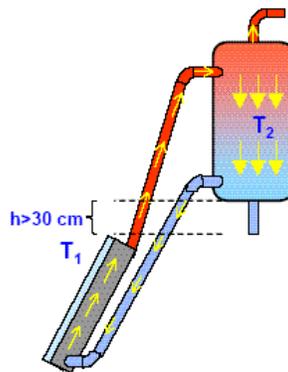


Figura 2.10: Sistema de calentamiento solar directo

Entre las alternativas viables de utilización de los captadores de placa plana esta la climatización a través de tuberías por suelo radiante, además de utilizarlos como calentadores de aire que apoyados con un sistema de ventilación forzado que puede ser integrado al aire del espacio arquitectónico, para propiciar condiciones de confort térmico.

Los colectores de placa se acoplan de diferentes maneras con el resto del sistema de calentamiento de agua y algunas de las veces es necesario agregar bombas de circulación, sensores de temperatura, controladores automáticos entre otros, los que hacen que el sistema trabaje en forma eficiente y automatizada, esto garantiza la calidad de energía en el tanque de almacenamiento. Cabe mencionar que los colectores de placa plana son también utilizados con aire como fluido a calentar, el cual puede ser utilizado para calefacción de espacios arquitectónicos.

Cuando se requiere de mayor calidad de energía en el fluido portador de energía, sobre todo si se utilizará para aplicaciones de refrigeración solar a partir de mezclas refrigerantes de bromuro de litio agua ó amoniaco agua, los colectores de placa plana no entregan fluidos con temperaturas aptas para utilizarse para estos fines. No obstante estos sistemas pueden servir como elementos de precalentamiento que posteriormente se envíen a un sistema auxiliar operado con gas natural ó algún otro tipo de energía convencional. Sin embargo, existen dispositivos de calentamiento de agua que entregan mayor calidad de energía, pero es tecnología más compleja y con un costo inicial mayor.

- *Tubos evacuados.* Este tipo de colectores, tienen la ventaja de que permiten una mayor captación de calor útil, ya que cuentan con una mayor eficiencia. Sin embargo, los costos de este tipo de sistemas son altos y solo se utilizan para aplicaciones en donde se requiera mayores temperaturas del líquido caloportador. En la figura 2.11, se muestra un sistema de captación de tubo evacuado.

Estos sistemas trabajan principalmente por concentración solar sobre una pequeña zona receptora, considerados como dispositivos térmicos de mediana temperatura. Son aptos para los sistemas de refrigeración solar por absorción de LiBr-H₂O, y de adsorción, ya que para el funcionamiento del generador del sistema de refrigeración solar se requiere de temperaturas entre 75 y 105 °C para que los dispositivos de absorción trabajen en forma óptima, resultando más eficientes para este fin los colectores tubos evacuados, pero los costos iniciales por metro cuadrado son mayores.



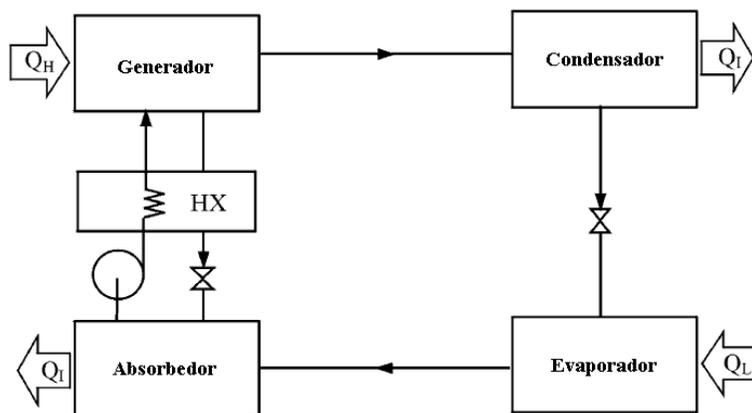
Figura 2.11: Colector de tubos evacuados

A continuación se describen las tecnologías de enfriamiento térmico con mayor factibilidad de uso en una vivienda.

Enfriamiento térmico por absorción: en los últimos años, debido a la problemática ambiental generada por los CFCs, HCFCs y emisiones de CO₂, unido al aumento de la temperatura global del planeta y al incremento de las tarifas eléctricas, surge un renovado interés de utilización de los equipos de absorción (Papadopoulos *et al.*, 2003). El país que cuenta con el mayor desarrollo de esta tecnología es Japón, ya que la mayor parte de los equipos comercializados actualmente de agua-bromuro de litio son fabricados en ese país ó bajo licencia japonesa. Los distribuidores de este tipo de equipos en capacidades mayores a 50 toneladas (176 kW) a nivel mundial son: Carrier, Trane, McQuay, York, Kawasaki, Sanyo, Hitachi y Thermax (Nogués, 2001).

El sistema de refrigeración por absorción es una forma de producción de frío a través de sustancias que absorben calor al cambiar de estado líquido a gaseoso. Entre las sustancias más utilizadas están el bromuro de litio, ya que tiene la capacidad de absorber el agua en fase de vapor. Otra posibilidad es emplear el agua como sustancia absorbente (disolvente) y como absorbida (soluto) amoniaco.

Al hacer uso de dichas propiedades, se puede reemplazar el compresor eléctrico de un sistema de compresión mecánica por una máquina termomecánica, que consiste en un circuito de solución (refrigerante-absorbente) compuesto por un absorbedor, un generador y una bomba de solución. La zona de alta presión requerida en el sistema, se logra por medio de la producción de vapor de refrigerante en el generador (Velázquez, 2002) . En la figura 2.12 se muestra un esquema básico de un sistema de enfriamiento por absorción



Fuente: Srihirin *et al* (2001)

Figura 2.12: Ciclo básico de refrigeración por absorción

Las ventajas y desventajas de los ciclos de absorción respecto a los ciclos de compresión de vapor se muestran en la Tabla 2.1.

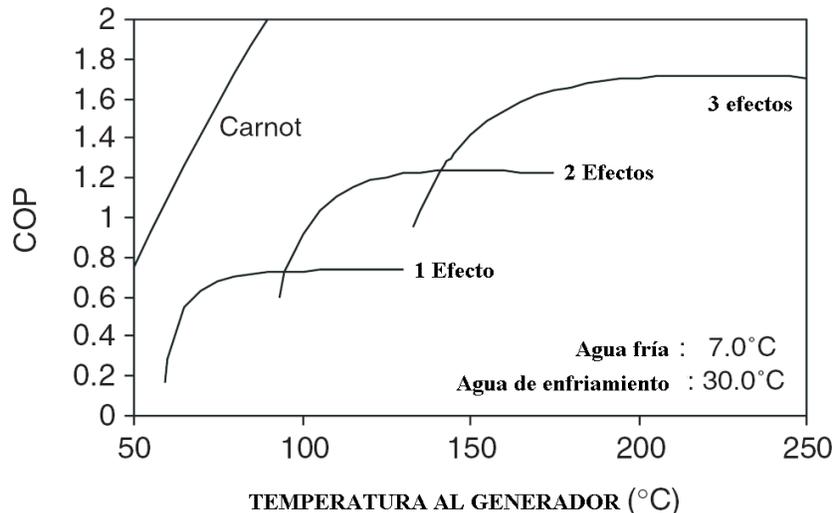
Tabla 2.1: Comparación de sistema de absorción con compresión de vapor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
1. Requiere poco mantenimiento.	1. Bajos y medianos COPs
2. Tiene solo una parte móvil mecánica (bomba) y para los equipos pequeños no se requiere ninguna.	2. Puede no ser aplicable a muy bajas temperaturas de evaporación (cuando es usado Agua-LiBr como fluido de trabajo).
3. No se requiere ninguna energía auxiliar para la operación de los equipos ó sistemas pequeños.	3. Libera grandes cantidades de calor al ambiente (las cuales se pueden aprovechar).
4. Se utilizan colectores solares térmicos, que son más baratos que las celdas solares.	4. Los sistemas grandes y continuos necesitan bombeo, lo cual no es una dependencia de la energía solar térmica.
5. Costo de energía bajo (solo para la bomba). Los sistemas pequeños pueden no requerir bomba.	5. Sistemas complicados para los técnicos convencionales y requieren conocimientos avanzados para su mantenimiento.
6. Se requiere una fuente de energía de baja calidad (baja temperatura) en los ciclos convencionales.	6. Para los grandes sistemas de refrigeración y aire acondicionado, se requieren grandes áreas de colección solar y muy alto costo de instalación e inversión.

Fuente: Velázquez, 2002.

En los últimos años, se ha dado un desarrollo considerable de esta tecnología por parte de China y permite vislumbrar un avance importante en la colocación de esta tecnología en el mercado del aire acondicionado solar (Best, 2007), sobre todo de los sistemas de simple y doble efecto (Srikhirin *et al.*, 2001).

Los sistemas de absorción se pueden operar a partir de temperaturas de entrada al generador de entre 75 y 250°C, y esto restringe la utilización de los diferentes tipos de colectores. En el caso de los colectores planos están restringidos a temperaturas bajas de entre 75 y 100°C y pueden ser aplicados en sistemas de simple efecto a un COP de 0.7 como se puede observar en la figura 2.13.



Fuente: Modificado de Balaras *et al* (2007)

Figura 2.13: Coeficiente de Operación (COP) en función de la temperatura

Si la calidad de energía es mayor, y se pueden obtener temperaturas de entrada al generador de entre 120 y 175°C se puede utilizar un sistema de doble efecto con COP de entre 0.7 y 1.2, estos sistemas cuentan con dos intercambiadores de calor ver figura 2.14. La principal característica de estos sistemas es el intercambio de calor interno entre el condensador de alta temperatura y el generador de baja temperatura. Cabe destacar que estos sistemas resultan más costosos que los de simple efecto.

Existen otras variantes como el triple y cuádruple efecto, sin embargo, no se da un incremento significativo en el COP de la unidad y el sistema es más complejo. Otro de los sistemas es el de tipo GAX (por sus siglas en ingles Generator / Absorber heat exchanger) conocido también como DAHX (desorber / absorber heat exchanger) (Srikhirin *et al.*, 2001). Existen una serie de variantes más que buscan la mayor eficiencia del sistema, las cuales no se mencionan en este documento.

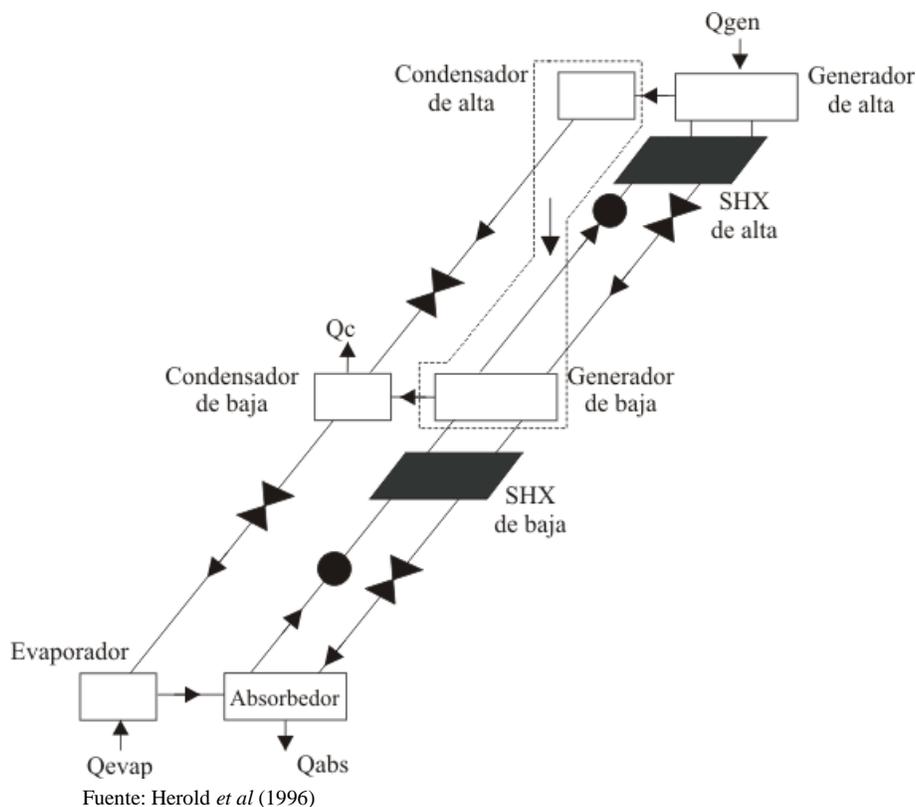
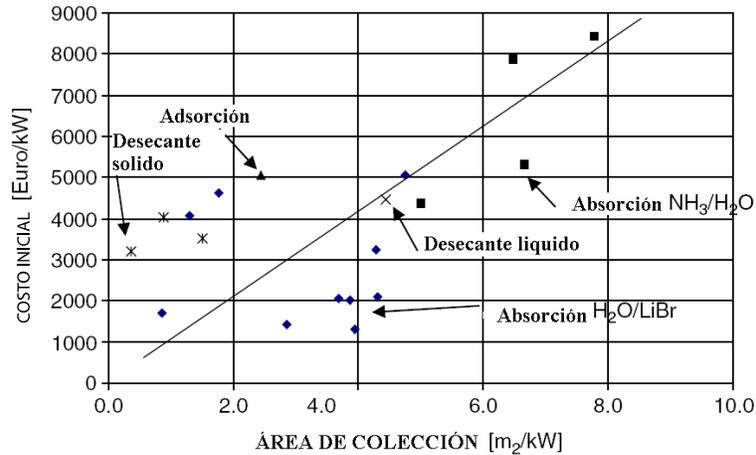


Figura 2.14: Sistema de absorción de doble efecto LiBr/H₂O

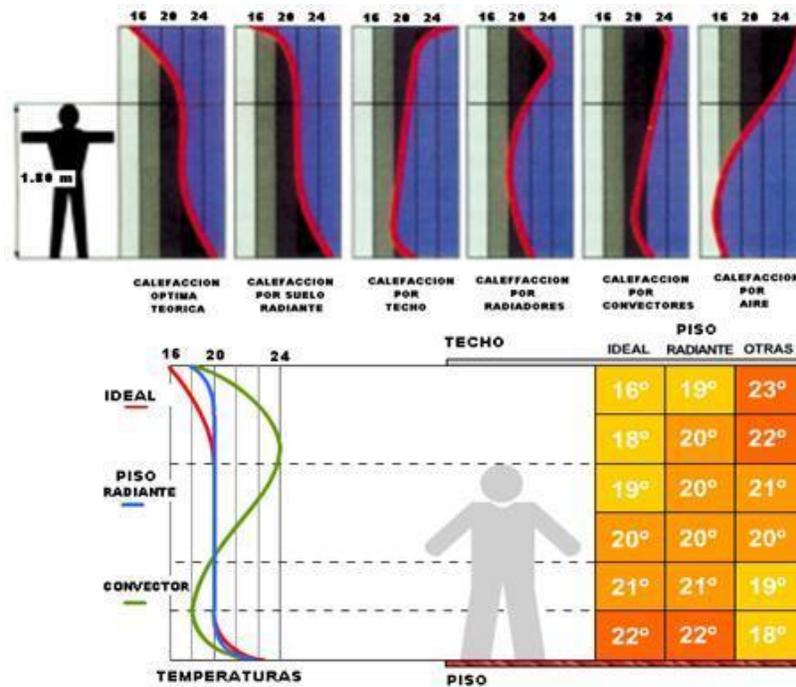
Los costos de instalación de estos sistemas dependen principalmente del área de colección, ya que si se quiere operar en forma solar, estos representan el mayor costo de inversión inicial. En la figura 2.15 se muestran los costos de instalación en la Comunidad Europea para las diferentes opciones de enfriamiento operadas con energía térmica según Balaras *et al*, (2007). Se puede observar que de los sistemas de absorción, el sistema de LiBr- H₂O resulta de menor costo que el de NH₃-H₂O, incluso es la mejor opción respecto al resto de las tecnologías de enfriamiento.



Fuente: Modificado de Balaras *et al* (2007)

Figura 2.15: Costo inicial de sistema en función del área de colección

Sistemas de calentamiento por piso radiante: representan una alternativa para propiciar calefacción de los espacios y son de las formas más eficientes según Woodson (1999), como se puede observar en la figura 2.16. Estos sistemas se encargan de regular pérdidas de calor del cuerpo humano durante las épocas frías del año, estableciendo un equilibrio térmico entre el cuerpo y el ambiente que lo rodea para así obtener el máximo bienestar fisiológico-térmico (Watson *et al.*, 2002).



Fuente: <http://cursogratis.emagister.com>

Figura 2.16: Comparativo de sistemas de calentamiento

La utilización de piso radiante es necesaria debido a los altos costos de energía derivados de la utilización de sistemas de calefacción que operan a partir de energía fósil. El piso radiante representa una técnica de ahorro en el consumo de energía. Entre sus principales ventajas están:

- Puede funcionar a través de fluido caloportador producto de sistemas térmicos operados con energía solar limpia que garantizan temperaturas entre 32 y 60°C, ver tabla 2.2.
- El calor se localiza cerca del suelo, no junto al techo como en los sistemas de aire caliente, calienta primero los objetos, paredes, piso, muebles y a las personas, en lugar de calentar únicamente el aire. Estos sistemas brindan una distribución uniforme y confortable en comparación con los sistemas convencionales, como se puede observar en la figura 2.16.
- No generan corrientes de aire caliente inconfortables, ya que no es necesario el movimiento de masa de aire. El aire se calienta poco a poco por contacto con paredes y objetos, originándose así una ligera corriente convectiva a 0.2 m/s que contribuye a mantener una temperatura constante y confortable en todos los estratos del espacio.
- No transportan polvo, ácaros y agentes alergénicos, que perjudica a la salud de los usuarios por medio de irritaciones y alergias producidas por otros sistemas de calefacción.

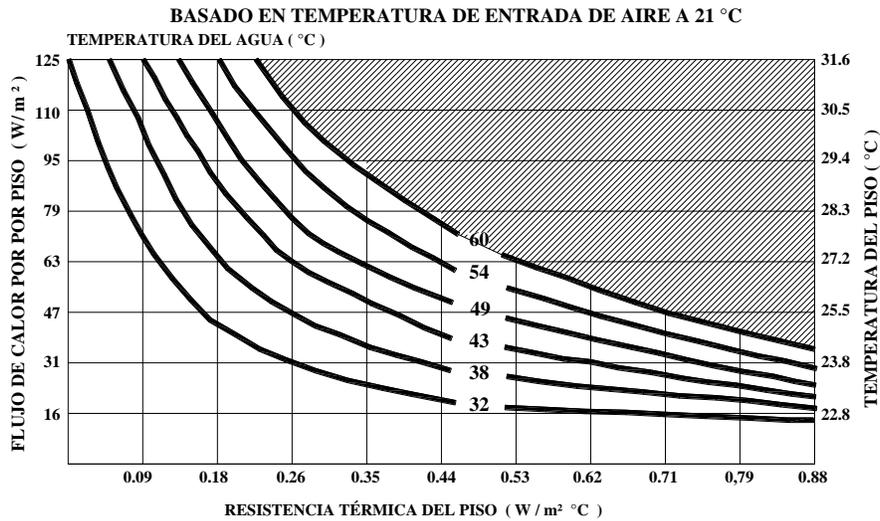
Los parámetros a considerar para un adecuado predimensionamiento de los sistemas de piso radiante varían en función del tipo de espacio a acondicionar como se puede mostrar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros de predimensionamiento de piso radiante

APLICACIÓN	RESIDENCIAL	COMERCIAL	INDUSTRIAL
Temperatura del cuarto (°C)	18 - 22	15.5 - 22	12.7 - 21
Temperatura del agua (°C)	35 - 60	32 - 60	29.5 - 50
Temperatura de la superficie (°C)	24 - 30	24 - 30	21 - 30
Flujo de calor (W/m ²)	45-95	45-95	31 - 80
Caída de temperatura del agua (°C)	8.3 - 11.1	8.3 - 11.1	8.3 - 11.1
Flujo de líquido caloportador (kg/h)	68	160	570
Longitud de tubería (m)	61	91	305
Diámetro de tubo (in)	3/8	1/2	3/4
Distancia entre tubos (m)	0.10 - 0.23	0.15 - 0.30	0.23 - 0.38

Fuente: Watson *et al.*, (2002)

La relación de flujo de calor para mantener la temperatura del piso entre 21 y 32 °C, depende de las condiciones de entrada del líquido caloportador y de la resistencia térmica del sistema constructivo propuesto, como se puede observar en la figura 2.17.

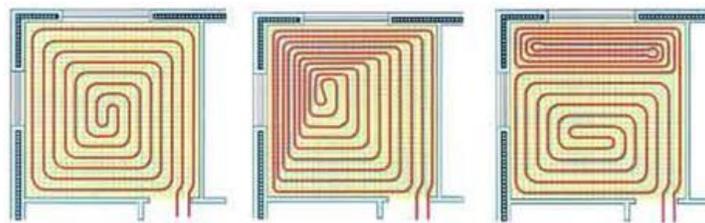


Fuente: Modificado a partir de Watson *et al* (2002)

Figura 2.17: Flujo de calor y temperatura del piso radiante

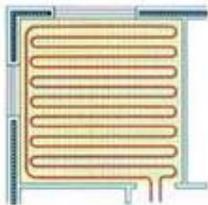
La distribución de la tubería del piso radiante, es importante en la distribución de calor y comportamiento de la temperatura del aire del espacio. Existen diferentes formas de distribución de tubería entre las que se encuentran:

Distribución en espiral: En espiral de forma cuadrada ó rectangular empieza por un extremo y avanza de fuera a dentro, se dejan huecos para volver al punto de partida al llegar al centro del local. Este sistema iguala perfectamente la temperatura del suelo ya que se alterna un tubo de ida con un tubo de retorno. La variación del sistema de espiral depende de los requerimientos de calor para las zonas en donde se encuentren ubicadas las ventanas como se puede observar en la figura 2.18.



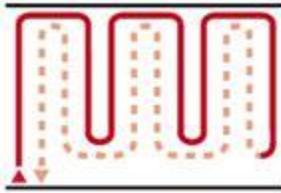
Fuente: ERREPAR (2007)

Figura 2.18: Distribución de ductería en espiral



Distribución en serpiente. La distribución del tubo empieza por un extremo del local y termina en el extremo opuesto, avanza en líneas paralelas equidistantes una de otras. Esta distribución es la más sencilla pero presenta una inconveniente, aún cuando se tiene una cantidad de tubo por metro cuadrado idéntica en cualquier punto del local, el reparto del calor no es igual ya que el agua se va enfriando a lo largo del circuito.

Fuente: (ERREPAR, 2007)

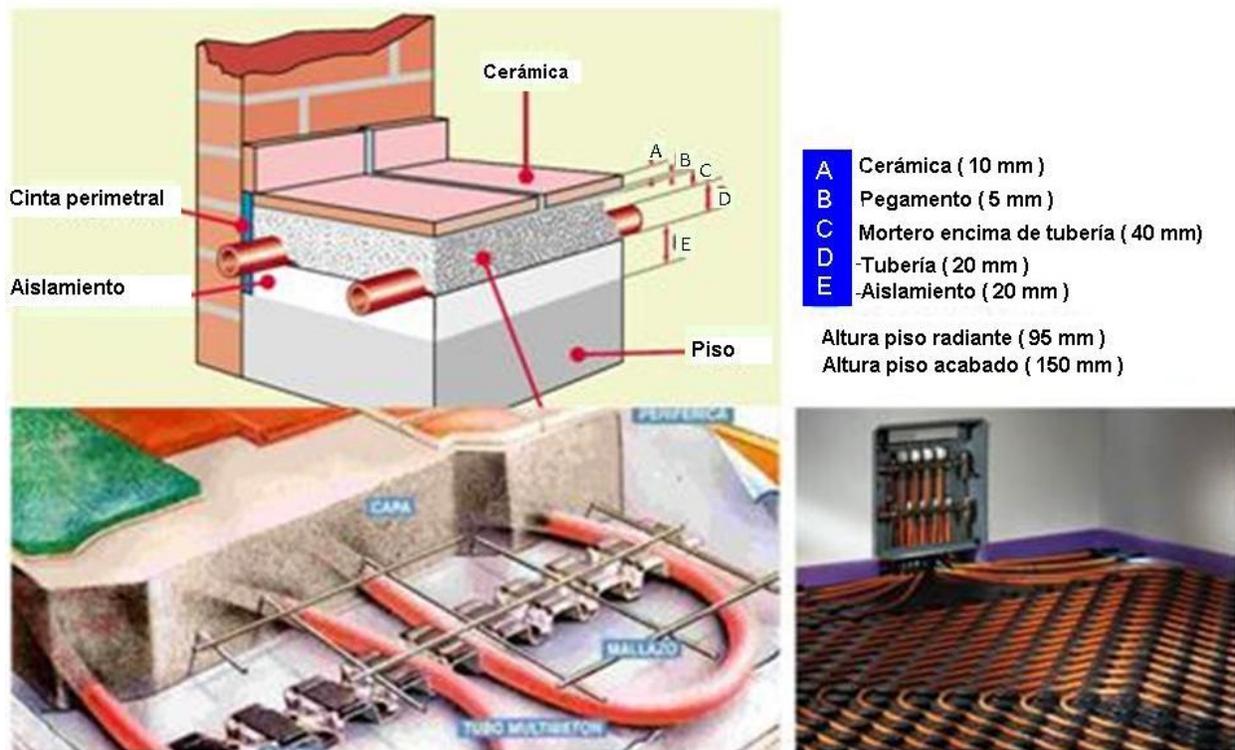


Distribución en doble serpentin. Al igual que la distribución en serpentin, se va de un extremo a otro avanzando en líneas paralelas equidistantes una de otras pero deja huecos donde se colocan líneas de retorno hasta llegar otra vez al punto de partida. Esta distribución elimina el inconveniente mencionado anteriormente y se adapta perfectamente a locales irregulares o alargados.

Fuente: (ERREPAR, 2007)

Construcción de piso radiante

Para la construcción del piso radiante, se requiere ubicar los distribuidores de agua caliente a un nivel más alto (0.70 m) que los circuitos para poder purgarlos (ver figura 2.19). Es necesario colocar un distribuidor por cada nivel de vivienda y en una zona central de donde se pueda distribuir hacia los diferentes cuartos que componen el edificio, por lo que se logran longitudes cortas de tubería. Además de que debe de ser de fácil acceso para realizar operaciones de mantenimiento.



Fuente: BARBI (2007)

Figura 2.19: Sistema constructivo de piso radiante

2.2.2 Aspectos ambientales y económicos de los sistemas térmicos

Las aplicaciones térmicas de la energía solar para calentamiento de agua, al igual que el resto de las energías renovables, presenta beneficios al medioambiente ya que disminuye la contaminación atmosférica por quema de combustibles fósiles. Con el uso de esta tecnología se tiene una reducción de gases de efecto invernadero originados por los sistemas de calentamiento convencional, lo cual es importante sobre todo cuando son utilizados en zonas donde el problema de contaminación es crítico. Este tipo de tecnología proporciona respeto con el medio ambiente, cuidado del entorno y calidad de vida. Con este tipo de tecnologías se obtendrían menos de emisiones de CO₂, con lo cual se reduce la contribución de efecto de calentamiento global, por no utilizar combustibles fósiles.

Aunque para la construcción de sistemas solares térmicos hay que usar materiales de cobre, aluminio, hierro, vidrio y aislantes que pueden producir efectos ambientales negativos durante su fabricación; el impacto ambiental es menos contaminante y peligroso que las fuentes energéticas convencionales. La energía solar, como fuente renovable, representa una fórmula energética radicalmente más respetuosa con el medio ambiente que las energías convencionales, debido a que se dispone de recursos inagotables a escala humana, para cubrir las necesidades energéticas. Si se quiere reducir el consumo de los recursos no-renovables y preservar el ambiente, es necesario incorporar las energías renovables en el nivel urbano.

Así mismo, los precios de las energías secundarias como la eléctrica, la gasolina, diesel entre otras tienden a subir permanentemente, dada su dependencia de los combustibles fósiles. La principal ventaja de los sistemas operados con energía solar es que no consume combustible, lo que significa que económicamente, en el largo plazo estos sistemas son viables y estables.

El alto costo inicial de los sistemas solares representa una desventaja desde el punto de vista económico. Para el caso de los sistemas térmicos de calentamiento de agua a bajas temperaturas, actualmente llegan a cortos tiempos de amortización (3-6 años), mientras que, los sistemas de conversión térmica de mediana y alta temperatura, hasta ahora, no han podido competir con los de generación de energía convencional.

2.3 Vivienda energéticamente sustentable

Para fines de ésta tesis se entenderá como vivienda energéticamente sustentable, al diseño de la construcción con estrategias de adecuación ambiental y la reducción de energía producto de fuentes fósiles a partir de sistemas térmicos operados con energía solar.

Esto debido a que el edificio es energéticamente más eficiente a partir de la implementación de las técnicas de adecuación ambiental y hace se reduzca la capacidad instalada de los sistemas de climatización. Además de reducir los consumos de energía al utilizar sistemas de climatización y agua caliente para uso doméstico operados con energía térmica.

La forma de realizar un proyecto energéticamente sustentable con técnicas de adecuación ambiental tiene diferencia respecto al método utilizado en un proyecto de diseño ambiental. En el campo del diseño ambiental, se debe buscar el bienestar y confort de los usuarios, hacer uso eficiente de la energía e integrar la edificación al medio ambiente para buscar confort de los usuarios del espacio por medios pasivos.

Esto en ocasiones no es posible ya que las condiciones climáticas son inhóspitas para poder lograrlo; es aquí cuando el uso de las energías renovables hace posible la adecuación ambiental de la edificación ya que se puede obtener climatización artificial, además de proporcionar otras necesidades de la vivienda, tales como: energía eléctrica, agua de uso doméstico y cocción de alimentos, entre otras.

El método planteado para el diseño de la vivienda energéticamente sustentable está basado en la secuencia mostrada en la figura 2.20.

En primer lugar se hace un estudio del clima y la energía solar, en donde se analiza la temperatura, humedad relativa, radiación solar y vientos de la ciudad de Mexicali; además se hace un estudio del potencial del recurso solar en diferentes planos para determinar la inclinación adecuada para las tecnologías de sistemas solares térmicos.

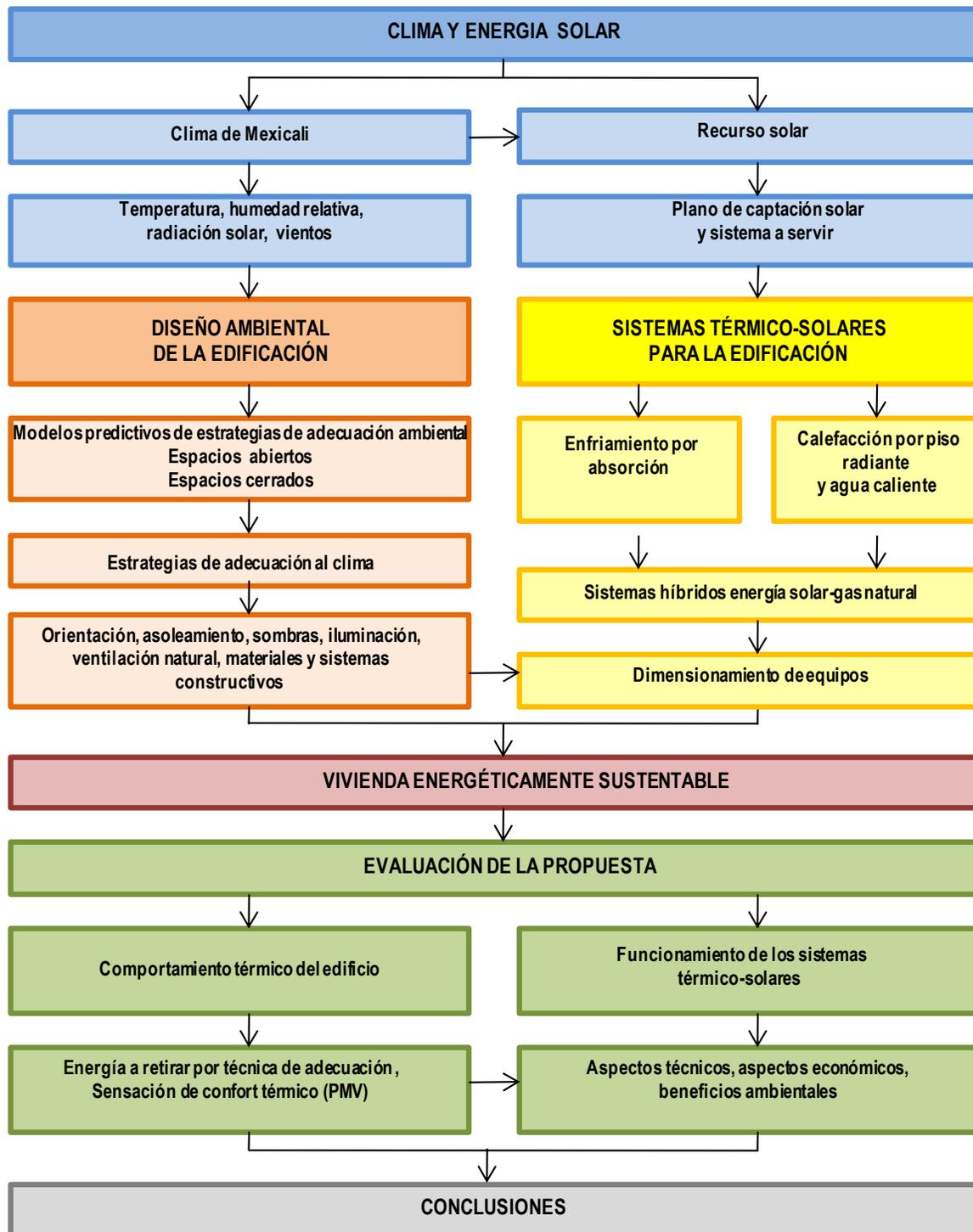
A partir de lo anterior, se procede al diseño ambiental de la edificación en el que se consideran para su evaluación los modelos predictivos de estrategias de adecuación ambiental tanto para el espacio abierto como para el espacio cerrado.

Al mismo tiempo se consideran aspectos tales como: orientación, asoleamiento, sombras, iluminación natural, ventilación natural, materiales y sistemas constructivos para la toma de decisiones de la propuesta de la vivienda energéticamente eficiente.

En forma paralela al diseño ambiental, se realiza el estudio de dimensionamiento de escenarios de sistema de enfriamiento, calentamiento y agua caliente para uso doméstico operado con energía solar térmica.

Posteriormente se lleva a cabo la evaluación con el simulador TRNSYS de la propuesta de vivienda en donde se determina el comportamiento térmico de la vivienda y la capacidad de enfriamiento necesaria para mantener el edificio en confort térmico.

De forma paralela, a partir de la misma herramienta de simulación se realiza la evaluación técnica de diferentes escenarios de enfriamiento por absorción y piso radiante, en términos de factibilidad técnica de implementación en la vivienda energéticamente sustentable. Por último se evalúan la factibilidad económica y los beneficios ambientales de la propuesta.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.20: Diagrama de flujo para diseño de vivienda energéticamente sustentable

2.4 Clima y edificación de Mexicali.

Con la finalidad de tener una visión clara del efecto de las variables climáticas, en el presente capítulo se describe el comportamiento del clima en zonas áridas, así como del clima en la ciudad de Mexicali y cómo influye éste en el comportamiento térmico del espacio abierto y el efecto que provoca a los espacios interiores de las edificaciones. Además, se describe la metodología aplicada para estimar el comportamiento climático de los espacios abiertos y cerrados.

2.4.1 Clima y confort térmico

En la integración del hombre con el medio ambiente que lo rodea, uno de los principales factores es el clima, el cual es importante ya que influye de modo significativo en la forma de vida de los humanos y en las costumbres de los habitantes, lo cual determina el uso de energía para poder estar en condiciones de confort térmico de una región geográfica determinada. Además de establecer el potencial energético para el uso de las fuentes alternas de energía.

La variación del clima en el territorio mexicano es grande, contiene climas secos a húmedos en una distancia de pocos kilómetros. El Trópico de Cáncer marca la franja de transición entre el clima árido y el semiárido que se presenta hacia el norte. Por su humedad, 56% del territorio corresponde a zonas muy áridas, áridas y semiáridas, del cual el 37% del territorio es cálido con temperatura media anual mayor de 22°C, el 39% semicálido (media anual entre 18° y 22°C), 23% templado (media anual entre 12° y 18°C) y el 1% restante semifrío y frío (media anual menor de 12°C) (figura 2.21) (UNAM, 1990).

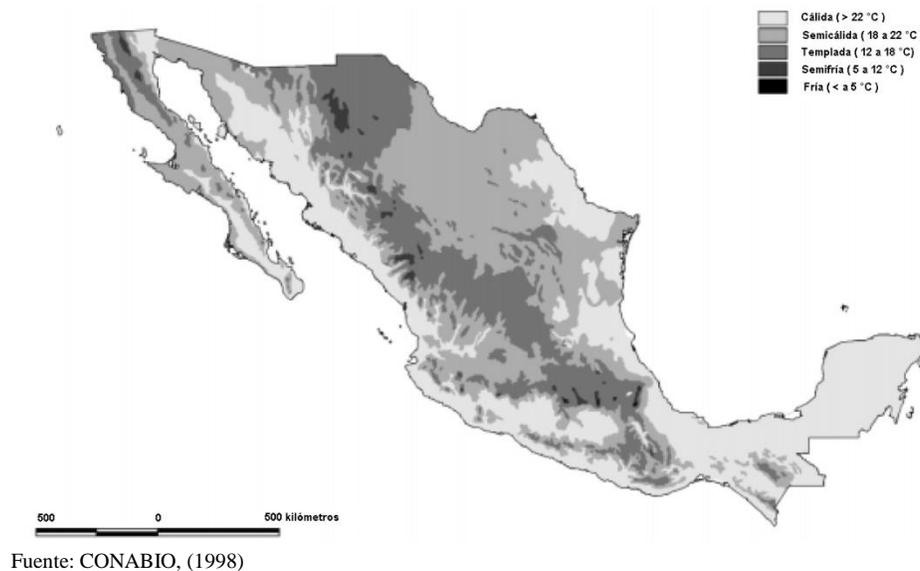


Figura 2.21: Temperaturas media anual, (UNAM, 1990)

Los elementos del clima son tomados como base para estimar el confort térmico, el cual desde el punto de vista fisiológico, es el estado de equilibrio expresado por el balance térmico, y se entiende por balance térmico la pérdida o ganancia de energía del cuerpo humano causada por el proceso químico del metabolismo y el proceso fisiológico de termorregulación en respuesta a los elementos externos del clima:

radiación, temperatura, humedad y movimiento del aire, como elementos principales, además del intercambio térmico que se efectúa entre la persona y el espacio donde realiza sus actividades (Critchfield, 1974).

El calor y la sequedad extrema inciden en forma importante en las condiciones fisiológicas de los habitantes del sitio. Las personas que habitan en climas cálidos secos, se sienten en condiciones confortables cuando su cuerpo es capaz de disipar todo el calor que recibe, en el que se incluye el calor perdido por evaporación de la piel y del sistema respiratorio. Según Singh (1987) el confort térmico en lugares cálidos secos, se puede encontrar cuando la temperatura media de la piel está por debajo de 34°C y sobre 31°C.

Una de las principales causas de la incomodidad dentro de los edificios en lugares cálidos secos es la energía del sol que incide en techos y muros, además de la que incide por ventanas para después aportar energía al edificio. La solución a este problema implica la búsqueda de elementos de protección, mediante los cuales se sombreen las construcciones que quedan expuestas al impacto de la radiación solar en el periodo cálido, además de que se dé un efecto inverso en el periodo frío para propiciar la ganancia de energía radiante que servirá como calor útil para propiciar calentamiento de las edificaciones.

Otra de las ventajas del recurso solar, es el potencial para producción de energía térmica para el acondicionamiento de los espacios, además de poderse utilizar en la producción de energía eléctrica a través de dispositivos fotovoltaicos. Aunque cabe destacar que es posible utilizarla en la producción de energía a través de las diferentes fuentes alternas de energía.

2.4.2 Clima de Mexicali B.C.

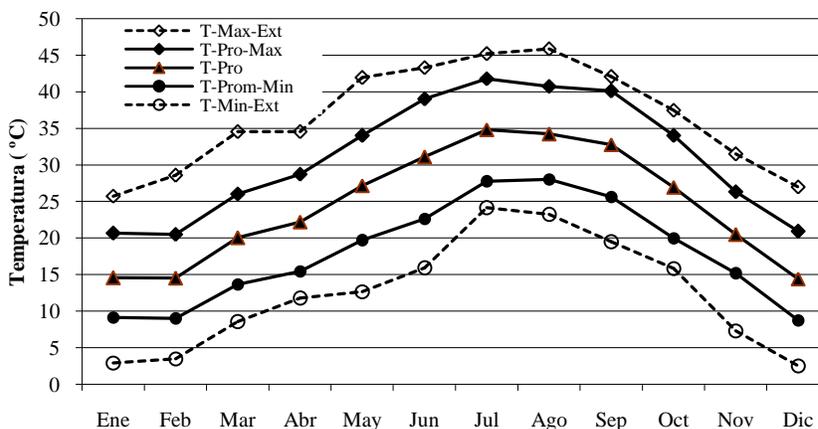
El clima es un factor importante para la operación del sistema de acondicionamiento de aire termosolar. Para el análisis climático de Mexicali, Baja California, se consideró un archivo de año típico meteorológico generado por Gallegos *et al.* (2006) con datos medidos del 2000 al 2005, proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional.

El 56% del territorio corresponde a zonas muy áridas, áridas y semiáridas que se encuentran en la parte norte y ciertas áreas del centro del país. (CONABIO, 1998). En la figura 2.21, se puede apreciar que la ciudad de Mexicali forma parte de la zona del tipo muy árida, con una posición geográfica a 32° 39' latitud norte y 115° 30' longitud oeste y una altitud de 4 m sobre el nivel medio del mar.

Las condiciones de aridez del Valle de Mexicali se deben en parte al patrón general de circulación de la atmósfera que genera a esa latitud movimientos de aire descendentes que no provocan precipitación. A esto se suma el efecto de sombra orográfica de la Sierra de Juárez. Los vientos cargados de humedad provenientes del Océano Pacífico descargan en la vertiente oeste de la sierra y al descender al Valle de Mexicali por la vertiente del este absorben humedad, lo que provoca una condición de extrema aridez. En general, se puede destacar que las condiciones climáticas de esta región están determinadas en gran medida por la presencia del sistema anticiclónico subtropical semipermanente del Pacífico (Gobierno del Estado de Baja California, 1999).

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen adaptado por García (1981), el clima de Mexicali B.C es del tipo BW(h')hs(x')(e'). El cual indica un clima cálido seco muy árido, régimen de lluvias en invierno y con una oscilación anual de temperaturas medias mensuales muy extremas.

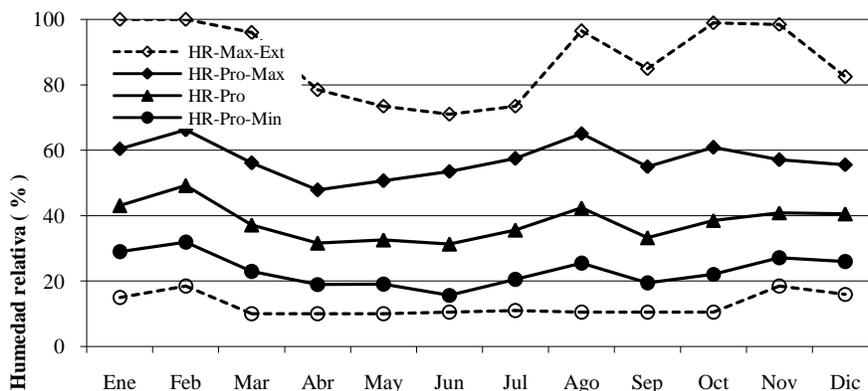
En la figura 2.22, se puede apreciar que en la ciudad de Mexicali la temperaturas promedios (T-pro) sobrepasan los 22 °C en los meses de mayo a octubre. Los registros máximos se dan en el mes de julio, con promedio de máximas de 42°C y máximas extremas de 45°C. El periodo frío está comprendido de los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre. El periodo crítico durante esta época se da en los meses de enero, febrero y diciembre con temperaturas promedio de mínimas de 9°C, con mínimas extremas de 2.5°C.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos climatológicos del SMN

Figura 2.22: Temperatura ambiente de Mexicali B.C., 2000-2005

En el caso de la humedad relativa, en la figura 2.23 se observa que los meses con mayores valores son enero, febrero y octubre con promedios máximos (HR-Pro-Max) de entre 60 y 65% y con humedades máximas extremas (HR-Max-Ext) de hasta el 100%. En lo que respecta a la humedad relativa promedio mensual (HR-Pro), se puede apreciar que se cuenta con 35% de humedad relativa durante la mayor parte de los meses del año. A partir del mes de julio se registra un incremento de humedad a valores promedio de máximas de entre 55 y 65% hasta el mes de agosto, con valores promedio mensuales de entre 33 y 42%.

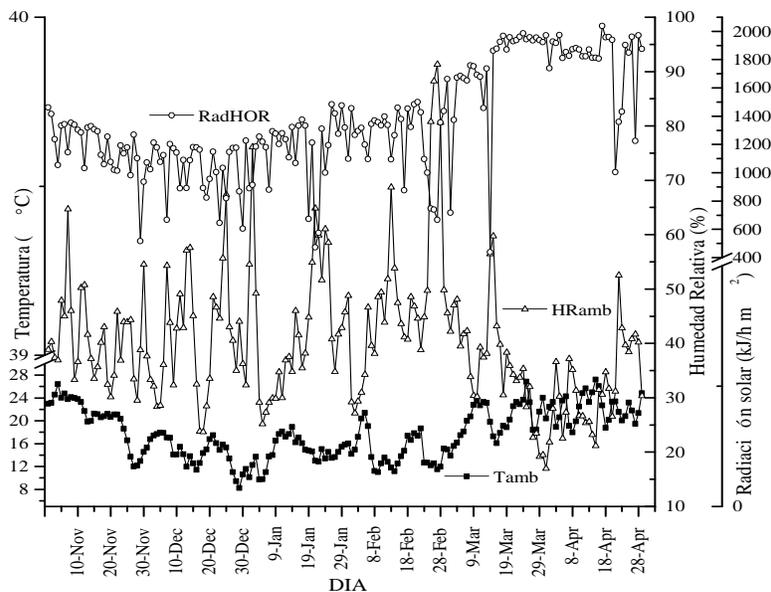


Fuente: Elaboración propia a partir de datos climatológicos del SMN

Figura 2.23: Humedad relativa de Mexicali B.C.

Con la finalidad de proporcionar información para el análisis e interpretación del sistema integral de climatización y agua para uso doméstico, se presentan los datos climáticos promedio horarios diarios de Mexicali. La información es dividida en dos periodos: (cálido y frío), los cuales se establecieron con base a simulación a través de corridas paramétricas con demanda de enfriamiento a una temperatura de consigna de 25°C.

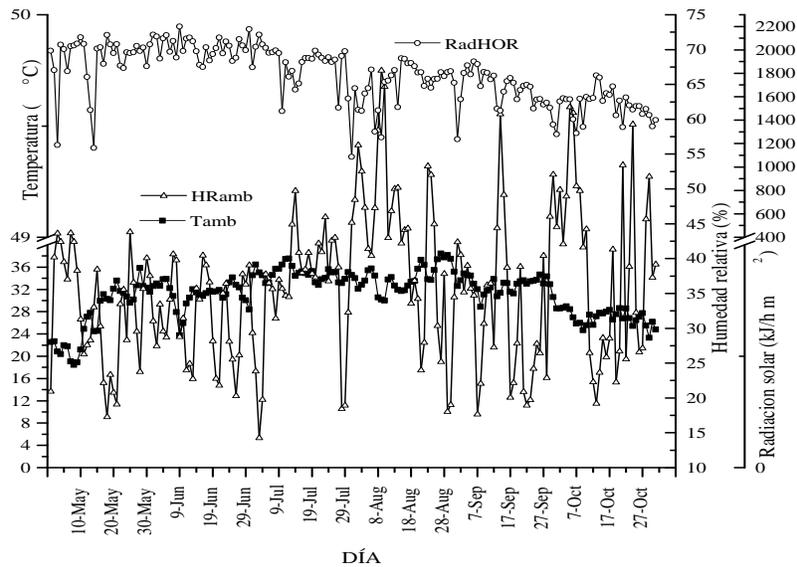
En la figura 2.24 se presenta la información climática promedio diaria del periodo frío y se puede observar que en Mexicali las temperaturas más bajas se presentan del 20 de diciembre al 10 de enero con valores que oscilan entre los 8 y 16°C, lo cual coincide con la menor radiación horizontal (RadHOR) del año. Es a partir de marzo cuando el clima empieza a tener un incremento en la temperatura al mismo tiempo que se incrementa la radiación solar.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos climatológicos del SMN

Figura 2.24: Datos climáticos promedio horario diarios del periodo frío, Mexicali B.C., 2000-2005.

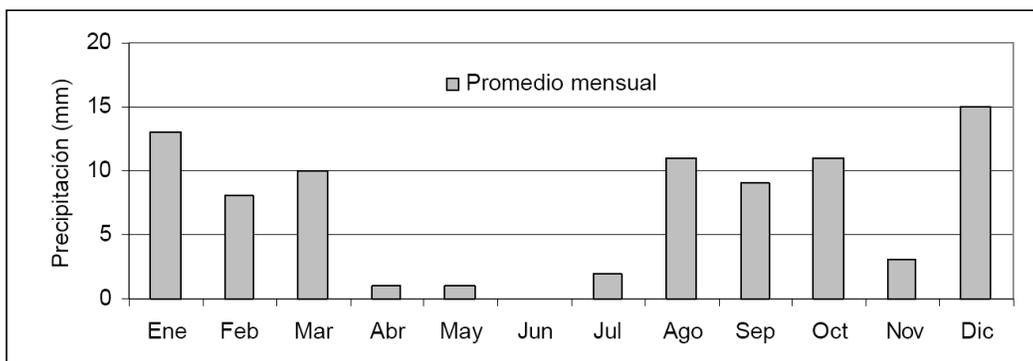
En el caso del periodo cálido en la figura 2.25 se muestra que el periodo cálido crítico es entre julio y agosto, sin embargo, se puede observar una disminución de temperaturas en los primeros 20 días de agosto acompañados de una alta humedad relativa y disminución de radiación solar.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos climatológicos del SMN

Figura 2.25: Datos climáticos promedio horario diarios del periodo cálido, Mexicali B.C., 2000-2005

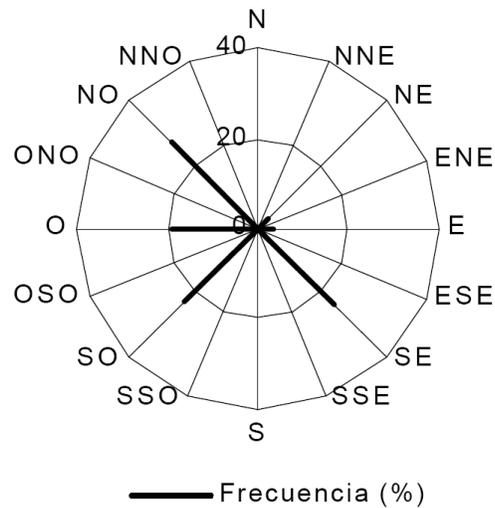
Los fuertes gradientes de temperatura como consecuencia del intenso calentamiento solar producen vientos moderados y alta convección térmica. La protección de las montañas y distancia respecto al océano limita la precipitación. La Figura 2.26 muestra la precipitación promedio mensual para el periodo 1981-1997. Se puede apreciar que la precipitación baja, con un promedio de 85 mm. Los meses con mayor precipitación se dan en los meses de diciembre y enero con 15 y 13 mm, respectivamente. En tanto que el período más seco corresponde a los meses de abril a julio.



Fuente: Gobierno del Estado de Baja California, (1999)

Figura 2.26: Precipitación promedio mensual Mexicali, 1981-1997.

El conocimiento de la dirección y frecuencia de vientos en Mexicali es importante para la edificación; ya que a partir de ellos se puede deducir la adecuada orientación de los elementos captadores de aire que servirán para disipar el calor de los espacios internos así como de propiciar una adecuada ventilación. En la figura 2-27 muestra la rosa de vientos en superficie de 1996, construida con información de la Comisión Nacional del Agua (Gobierno del Estado de Baja California, 1999).



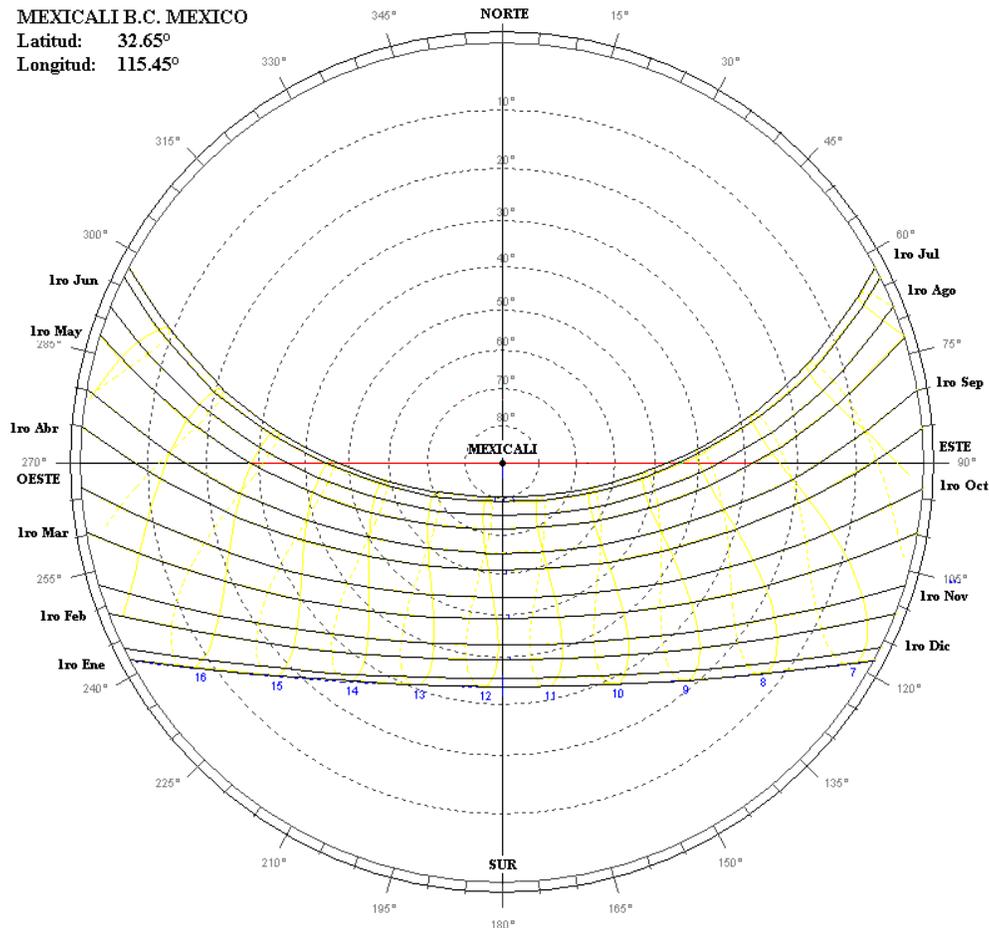
Fuente: Gobierno del Estado de Baja California, (1999)

Figura 2.27: Frecuencia y dirección de vientos en Mexicali B.C.

Se observa que el viento dominante con una frecuencia de 27% proviene del noroeste, siguiéndole en orden de importancia los vientos del sureste (24%), suroeste (22%) y oeste (19%); con menor frecuencia ocurren los vientos que provienen del noreste y del este.

El flujo de viento a lo largo del año se diferencia en dos patrones. Los vientos occidentales con una frecuencia de 69% se presentan desde las direcciones noroeste, oeste y suroeste y ocurren principalmente en los meses de octubre a junio. El patrón de vientos orientales con una frecuencia de 31% se presenta desde las direcciones noreste, este y sureste, principalmente en los meses de julio a septiembre.

Otro de los elementos del clima de suma importancia es la radiación solar, ya que afecta en forma directa en el comportamiento climático de una determinada ubicación geográfica y el comportamiento térmico de las edificaciones dependiendo de la trayectoria solar. En Mexicali B.C. a trayectoria solar tiene el comportamiento mostrado en la figura 2.28.



Elaborado a partir de programa SunTool de Marsh (1994)

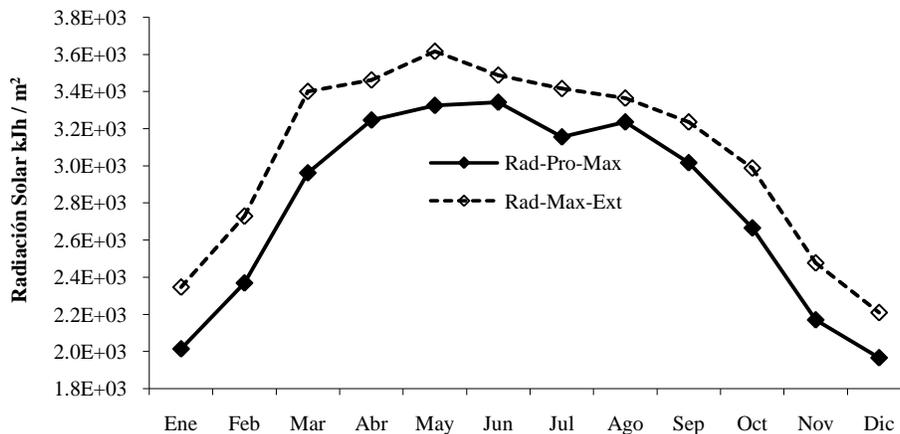
Figura 2.28: Movimiento solar en Mexicali B.C., México

Además de la trayectoria solar, es importante tener conocimiento de la disponibilidad de radiación solar ya que puede ser utilizada en la edificación para el calentamiento solar pasivo y aprovechamiento para sistemas de calentamiento de agua, producción de energía fotovoltaica entre otras aplicaciones térmicas.

En la figura 2.29, se muestra el comportamiento de radiación solar del 2000 al 2005 de Mexicali B.C; en la cual se aprecia que la radiación máxima extrema (Rad-Max-Ext) se da en el mes de mayo con 3618 kJ/h m² (928 W/m²).

Durante el periodo de mayor potencial (abril a junio) se tiene una radiación promedio de máxima (Rad-Pro_Max) de 3342kJ/h m² (928 W/m²), con máximas extrema en el mes de mayo. Se puede observar que en el mes de julio se registra un descenso de la radiación solar, debido a una serie de fenómenos físicos que generan un cielo parcialmente cerrado durante una parte del mes lo que genera una tendencia de disminución de radiación solar.

Los meses con menor disponibilidad de recurso solar corresponden a los meses de enero y diciembre con un promedio diario máximo de 2015 kJ/hm^2 (560 W/m^2).



Elaboración propia a partir de datos meteorológicos de SMN

Figura 2.29: Radiación solar global en plano horizontal, Mexicali B.C, 2000-2005.

2.4.3 Confort térmico y estrategias de adecuación bioclimática

El papel del arquitecto es fundamental; ya sea en la arquitectura habitacional, comercial, industrial, turística, de edificios públicos. En cualquier ámbito de participación profesional se debe poner todo el empeño y conocimientos para ofrecer espacios que, además de poseer un cierto valor estético, sean funcionales y adecuados a los nuevos requerimientos de organización social y productiva, que revaloricen los factores culturales, tradiciones e idiosincrasia regional y nacional; espacios saludables y confortables que propicien una mayor eficiencia y productividad.

El problema de disconfort ó malestar no es sólo tener una sensación de disgusto en un espacio, habitar en espacios inadecuados repercute en problemas de salud, eficiencia y productividad (Auliciems, 1981b). Es en este contexto que trabaja el diseño ambiental, cuyo principal objetivo es el de armonizar los espacios y crear óptimas condiciones de confort y bienestar para sus ocupantes. Crear espacios “habitables” que cumplan con una finalidad funcional y expresiva y que sean física y psicológicamente adecuados; que propicien el desarrollo integral del hombre y de sus actividades. A través del diseño adecuado de los espacios es posible, evitar ó disminuir el uso de la climatización artificial; así como aprovechar ampliamente la iluminación natural durante el día.

El término confort, es de hecho un galicismo, que puede ser substituido por el de bienestar, aunque éste parece ser más amplio y relacionado directamente con la salud. La Organización Mundial de la Salud define a la salud como el estado de bienestar físico, psicológico y social del individuo con relación a su entorno. Por otro lado se entiende por confort térmico “el estado físico y mental en el cual el hombre expresa satisfacción (bienestar) con el medio ambiente circundante” (Szokolay, 2005). Como se puede apreciar no existe diferencia significativa entre las dos definiciones, sin embargo, conceptualmente la primera se refiere a un estado temporal más amplio (aunque no permanente) y además incluye aspectos que no son considerados por el segundo.

El confort se refiere de manera más puntual a un estado de percepción ambiental momentáneo (casi instantáneo), el cuál ciertamente está determinado por el estado de salud del individuo, pero además por muchos otros factores, los cuales se pueden dividir en forma genérica en dos grupos según Brager *et al.*,(1998) : los factores endógenos, internos o intrínsecos del individuo, y factores exógenos ó externos y que no dependen del individuo.

Es decir que el confort ambiental define sólo a aquellos factores ambientales naturales ó artificiales que determinan un estado de satisfacción, bienestar físico ó psicológico. Si bien el confort se obtiene a través de la integración de todos los factores, con fines prácticos se divide en varios tipos de acuerdo al canal de percepción sensorial que se involucra; de tal forma que se cuenta con los siguientes tipos de confort (Fuentes, 2007b) :

- Confort térmico,
- Confort lumínico,
- Confort acústico,
- Confort olfativo,
- Confort psicológico.

El confort térmico, es percibido en forma diferente en los espacios abiertos y cerrados, ya que la envolvente arquitectónica juega un papel importante en la percepción del clima. La percepción del medio ambiente circundante se da principalmente a través de la piel por el intercambio térmico entre el cuerpo y el ambiente. La producción total de calor metabólico puede dividirse en: metabolismo basal, es decir, la energía calorífica producida por todas las transformaciones implícitas en los procesos automáticos y vegetativos; y el metabolismo muscular que es la energía calorífica producida por los músculos al llevar a cabo un trabajo controlado de manera consciente (DeDear *et al.*, 1997) . En la tabla 2.3 se aprecia la producción de calor por metabolismo, en función del grado de actividad del individuo.

Tabla 2.3: Disipación de calor por actividad metabólica promedio para un hombre adulto (Watts)

Actividad	Total	Basal	Muscular
Sueño profundo	70	70	0
Descanso acostado	88	88	0
Descanso sentado	115	92	23
Trabajo ligero sentado	130	92	38
Trabajo ligero de pie	150	92	58
Caminar despacio	160	92	68
Trabajo de escritorio	210	93	117
Trabajo de oficina de pie	235	93	142
Trabajo medio	265	93	172
Trabajo medio pesado	300	93	207
Trabajo pesado	400	94	306
Trabajo pesado durante 8 hrs.	440	94	346
Trabajo muy pesado (max 30 min)	1500	94	1160

Fuente: (ASHRAE, 2004)

El metabolismo es uno de los factores internos más importantes que intervienen en la obtención del confort (ASHRAE, 2004) . Algunos otros son: la edad, el sexo, forma y superficie corporal, acumulación

de grasa, condición de salud, tipos de alimentos y bebidas etc. Por otro lado los factores externos más importantes son:

Grado de arropamiento. Es la cantidad de vestimenta u otros medios que se encargan de establecer la transferencia de calor entre el cuerpo y el medio ambiente. El grado de arropamiento determina la resistencia térmica al flujo de calor al interactuar con medio ambiente determinado.

Temperatura del aire. Este es uno de los factores más importantes ya que entre mayor sea la diferencia entre la temperatura del aire y la del cuerpo, mayor será el flujo de calor. La temperatura del aire óptima en la cual el cuerpo disipa adecuadamente el calor generado depende de varios factores, entre ellos la aclimatación del individuo juega un papel importante, ya que, por ejemplo, una persona acostumbrada a vivir en un clima frío soporta temperaturas más bajas que otra que no lo está.

En lo que respecta al espacio abierto y estrategias de adecuación ambiental la temperatura óptima para que un individuo se sienta en equilibrio con el medio que lo rodea se le denomina temperatura neutra ó termopreferendum y representa un rango de temperatura en el cual el individuo expresa satisfacción (térmica) con el ambiente. El rango de confort térmico ha sido definido de distinta manera por varios autores. Los estudios más actuales a este respecto son los de Auliciems (1981a), a través de la siguiente ecuación:

$$T_n = 17.6 + (0.31 * T_m) \quad (1)$$

donde:

T_n = temperatura neutra

T_m = temperatura promedio mensual

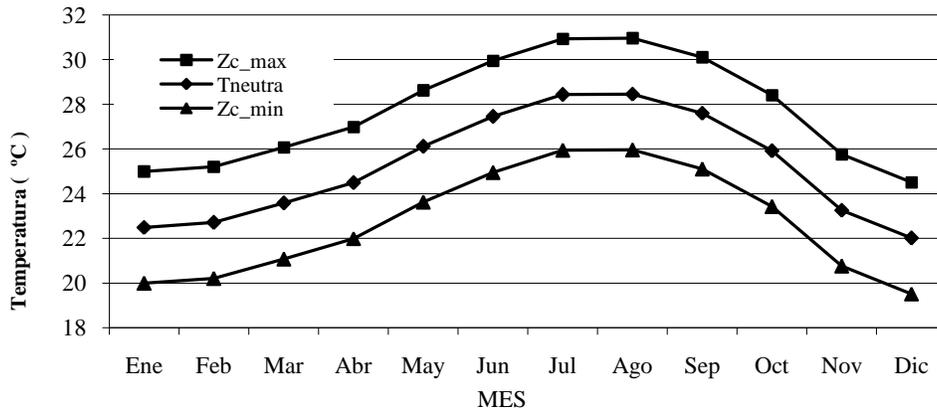
Además de que Auliciems, (1981a) establece que el rango de confort en un espacio naturalmente ventilado puede variar respecto a la temperatura neutra en $\pm 2^\circ\text{C}$ para usuarios con actividad ligera, por lo que la zona de confort se define como:

$$Z_c = T_n \pm 2 \quad (2)$$

donde:

Z_c = Zona de confort

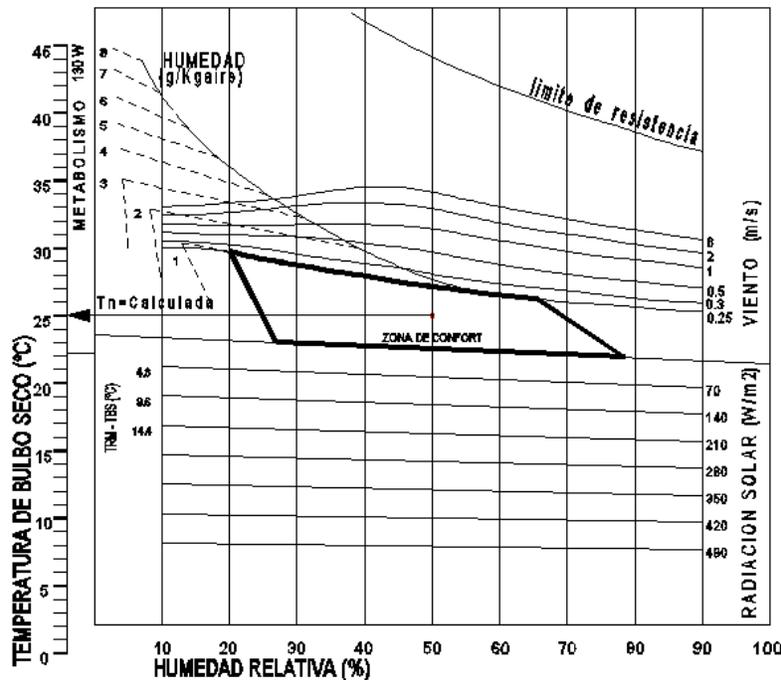
A través las temperaturas promedio mensuales y la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 se determinó la temperatura neutra (T_{neutra}) mensual, además de los límites de confort térmico para Mexicali B.C., los cuales se muestran en la figura 2.30. Se puede observar que debido a la oscilación de temperaturas a lo largo del año se tiene una marcada variación entre la temporada cálida y fría. En la temporada fría oscila entre los 22 y 24.5 °C, en el periodo cálido varía de 26 a 28.5°C y la temperatura neutra anual es de 25°C. Además se puede observar que el límite de confort térmico en el periodo cálido se encuentra entre 26 y 31°C y en el periodo frío entre 20 y 25°C.



Elaboración propia a partir de datos meteorológicos de SMN

Figura 2.30: Temperaturas neutras en Mexicali B.C.

Una vez determinado el termopreferendum anual y el de cada uno de los meses del año, se procedió a la interpolación de los datos horarios de temperatura y humedad relativa (ver tabla 2.5) en la grafica de Olgay (1998) mostrada en la figura 2.31, en la cual, se consideró una escala de actividad metabólica de 130 W (trabajo ligero sentado actividad ligera). A partir de dicha interpolación se determinaron las técnicas de adecuación mostradas en la tabla 2.4



Fuente: Modificado de Fuentes (Fuentes, 2007a)

Figura 2.31: Carta bioclimática de Olgay adaptada para Mexicali

Se puede apreciar a través de la tabla 2.5 que en los meses fríos de (enero, febrero, y diciembre) durante las primeras horas del día, se obtiene temperaturas de entre 5.6 °C y 13°C hasta las 11 horas y a partir de las 19 horas; con temperaturas extremas de hasta 0°C. Sin embargo, se cuenta con condiciones confortables por un periodo de hasta 4 horas al medio día que superan los 13 °C hasta alcanzar entre 19°C y 24°C. En lo que respecta a los periodos de transición que comprenden el periodo de marzo a abril y el mes de octubre, se aprecian temperaturas ligeramente superiores con mínimas de entre 11.7°C y 16°C por las mañanas y noches respectivamente, lo que propicia una extensión de periodo de confort térmico hacia las horas de medio día hasta por un periodos de 9 horas hacia el medio día con temperaturas máximas de 29°C.

En los meses de verano (mayo a octubre), se reduce la zona de confort hacia el medio día y se presentan temperaturas agradables solamente en las primeras horas del día en los meses de mayo, junio, septiembre y octubre con temperaturas de entre 19°C y 30°C por la mañana y tarde respectivamente. Sin embargo, para poder extender las condiciones de confort es necesario durante este periodo la presencia de vientos, que propicien disipación de calor corporal sobre todo entre 9 y 11 de la mañana y entre 17 y 19 horas.

En lo que respecta a las horas del medio día durante el periodo cálido se aprecia que es un periodo con presencia de altas temperaturas promedio de máximas que oscilan entre los 30°C y 39°C se logran temperaturas máximas extremas de hasta 46 y 48°C (ver tabla 2.5) que provocan una sensación térmica de incomodidad para los habitantes de la ciudad de Mexicali cuando se exponen al espacio abierto.

El periodo con mayores problemas por temperatura ambiente, son los meses de julio y agosto ya que las temperaturas promedio de mínimas son de 27°C y con promedio de máximas de hasta 42°C; con temperaturas extremas de 45 °C. Cabe destacar que aunque las temperaturas extremas son ligeramente menores en los meses de mayo y junio durante este periodo las temperaturas oscilan entre los 19 y 38.5°C

Tabla 2.4: Técnicas de adecuación para espacios abiertos, Mexicali B.C.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	F	F	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	VIE	CT	CAL	CAL	F
1	F	F	CAL	CAL	CAL	CAL	VIE	VIE	CT	CAL	CAL	F
2	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	CT	CAL	CAL	F
3	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CT	CT	CT	CAL	F	F
4	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CT	CT	CT	CAL	CAL	F
5	F	F	F	CAL	CAL	CAL	CT	CT	CAL	CAL	F	F
6	F	F	F	F	CAL	CAL	CT	CT	CAL	CAL	F	F
7	F	F	F	F	CAL	CAL	CT	CT	CAL	CAL	F	F
8	F	F	F	CAL	CAL	CT	VIE	VIE	CAL	CAL	F	F
9	F	F	CAL	CAL	CT	VIE	C	VIE	CT	CAL	F	F
10	F	CAL	CAL	CAL	VIE	C	C	C	VIE	CAL	CAL	F
11	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	C	C	C	C	CT	CAL	CAL
12	CAL	CAL	CAL	VIE	C	C	C	C	C	VIE	CAL	CAL
13	CAL	CAL	CT	VIE	C	C	C	C	C	C	CT	CAL
14	CAL	CAL	CT	VIE	C	C	C	C	C	C	CT	CAL
15	CAL	CAL	CT	VIE	C	C	C	C	C	C	CT	CAL
16	CAL	CAL	CT	VIE	C	C	C	C	C	C	CT	CAL
17	CAL	CAL	CT	CT	C	C	C	C	C	C	CT	CAL
18	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	C	C	C	C	VIE	CT	CAL
19	CAL	CAL	CAL	CAL	VIE	C	C	C	C	VIE	CAL	CAL
20	CAL	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	C	C	C	VIE	CAL	CAL
21	CAL	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	VIE	C	VIE	CT	CAL	CAL
22	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	VIE	VIE	CT	CAL	CAL
23	F	F	CAL	CAL	CAL	CT	VIE	VIE	VIE	CAL	CAL	F

F

ZONA FRÍA

CT

CONFORT TÉRMICO

C

ZONA CALIENTE

CAL

DISPOSICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR (CONFORT)

CAL

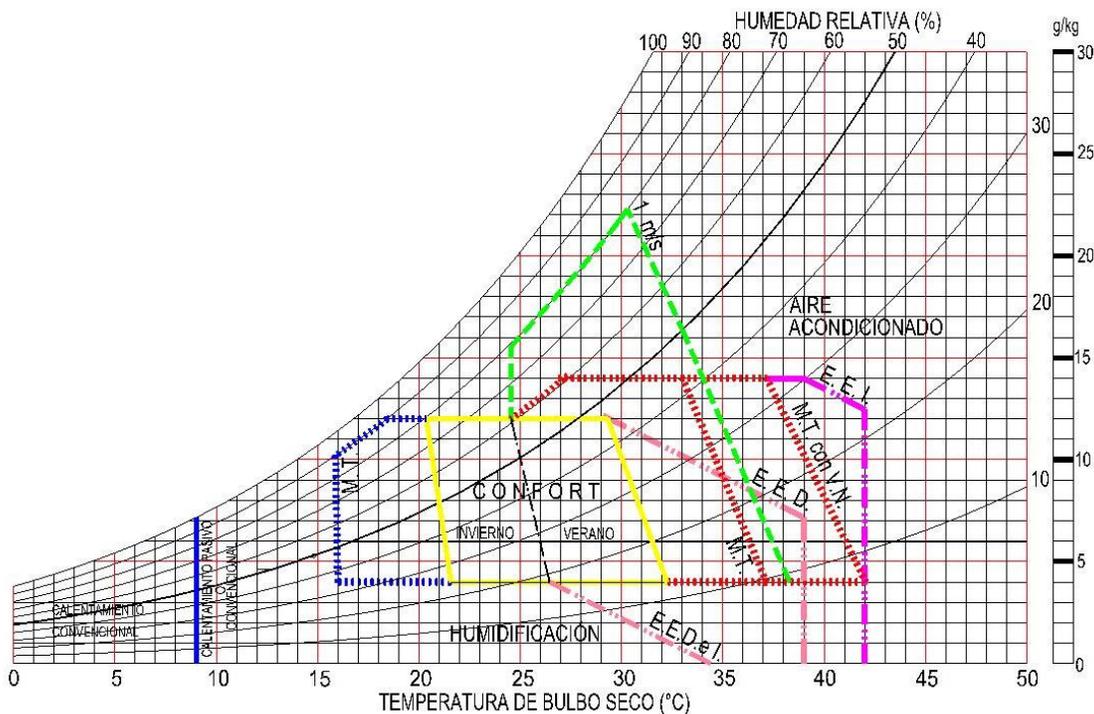
NO DISPOSICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR (FRÍO)

VIE

MOVIMIENTO DE MASAS DE AIRE (VIENTOS)

Fuente: Elaboración propia a partir de Olgay (1998)

Las estrategias de adecuación ambiental para la edificación en Mexicali B.C. se desarrollaron a partir de temperatura y humedad relativa, las cuales fueron utilizadas para estimar las estrategias de adecuación a través de los modelos de Docherty y Szokolay (1999). Entre las que destacan: Masa térmica (M.T.), ventilación natural a 1 m/s, Masa térmica con ventilación nocturna (M.T. con V.N.), Calentamiento pasivo, Humidificación, Enfriamiento evaporativo indirecto (E.E.I), Enfriamiento evaporativo directo (E.E.D). Además de establecer las zonas en la que es necesario el uso de sistemas activos de calentamiento convencional y aire acondicionado.



Fuente: Elaboración propia a partir de Docherty and Zsokolay (1999)

Figura 2.32: Carta psicrométrica con estrategias de adecuación ambiental para Mexicali B.C.

Para el trazado de las estrategias de adecuación ambiental mostradas en la figura 2.32, se utilizaron las temperaturas promedio de máximas y promedio de mínimas del lugar para determinar las temperaturas neutras mensuales mostradas en la figura 2.30; a partir de las que se determinó el límite superior e inferior de confort térmico tanto para el periodo de cálido como frío, además de establecer los límites de las estrategias de adecuación ambiental, a partir de la siguientes ecuaciones, los resultados de los límites estimados se pueden observar en el anexo A2:

- Calentamiento solar pasivo: el principal efecto de esta estrategia es calentamiento a través de la radiación global recibida por las ventanas verticales de la construcción. Para determinar la zona límite por calentamiento solar se tomó como base una vivienda de 100 m² con el 20% de apertura de ventanas con una eficiencia de captación solar de 0.6 y una radiación incidente de 3315 w/m².

Además se consideró una conductancia de la envolvente de $100 \text{ w/}^\circ\text{C}$, dichos parámetros fueron utilizados a través de la ecuación 3:

$$T_o = (T_L - C) * H_v \quad (3)$$

donde:

T_o = Temperatura más baja del ambiente, (a la que las pérdidas de calor pueden ser compensadas por ganancia solar)

T_L = Límite inferior de temperatura de la zona de confort en el mes más frío

C = Coeficiente que depende del área de ventana, eficiencia de captación de ventanas y coeficiente global de transferencia de calor de la construcción.

H_v = Radiación global recibida en las ventanas verticales de la construcción, Wh / m^2

- **Efecto de masa térmica:** el efecto de la masa térmica puede ser útil tanto en verano e invierno. Para el caso de un día cualquiera el rango de temperaturas en un día varía desde una temperatura mínima (4-6 am) a una temperatura máxima (2-4 pm), a lo que le podemos llamar dT . Para el caso de temperaturas exteriores, éstas varían a partir de las siguientes ecuaciones:

$$(T_{e_{avg}} - 0.5) * dT \quad \text{y} \quad (T_{e_{avg}} + 0.5) * dT \quad (4) \text{ y } (5)$$

donde:

$T_{e_{avg}}$ = Temperatura exterior promedio

dT = Diferencial de temperaturas entre máxima y mínima

Sin embargo en las construcciones con alta masa térmica, la variación de temperatura en el espacio interior podría mantenerse constante, acercándose a la temperatura exterior promedio, (si se considera que no hay ganancias de calor por radiación solar y ganancia internas). Por lo tanto el límite inferior (considerado como límite de invierno) estaría dado por:

$$(T_L - 0.5) * dT \quad (6)$$

donde:

T_L = Límite inferior de confort

Al Considerar que el flujo de calor no es tan perfecto se determina el límite de valor de temperatura para el funcionamiento de la masa térmica respecto a las temperaturas ambientales como:

$$T_{o,i} = (T_L - 0.4) * dT \quad (6)$$

donde:

$T_{o,i}$ = Límite inferior de efecto de masa térmica

dT = Diferencial de temperaturas entre la máxima y mínima

T_L = Límite inferior de confort

En el caso del límite por temperaturas máximas (límite superior), el efecto de la masa térmica se ve afectada por la radiación solar en forma considerable, al reducir el efecto de la misma; de tal forma que el coeficiente es más pequeño. Entonces el límite superior de efecto de masa térmica estaría determinado, (si el límite superior de confort es igual a T_s), de la siguiente manera:

$$T_{o,s} = (T_s + 0.25) * dT \quad (7)$$

donde:

$T_{o,s}$ = Límite superior de efecto de masa térmica

dT = Diferencial de temperaturas entre la máxima y mínima

T_s = Límite superior de confort

- **Masa térmica con ventilación nocturna.** Las construcciones tienden a enfriarse con mayor facilidad, al reducir su temperatura aproximadamente al valor de temperatura ambiente; por lo que el límite superior al considerar los efectos de radiación de las superficies está determinado por:

$$T_{o,vn} = (T_s + 0.45) * dT \quad (8)$$

- **Efecto de movimiento de aire.** El movimiento de masas de aire a través del cuerpo produce enfriamiento de tal manera que, cuando se tiene un volumen de aire más caliente que la piel (arriba de 38°C); el cuerpo acelera el proceso pérdidas de calor por evaporación, transpiración ó difusión de humedad. Existen algunos métodos complejos para cálculo de este efecto de enfriamiento, pero en forma aproximada para condiciones ambientales promedio es:

$$V_n = 6 * (v - 0.2) - (v - 0.2)^2 \quad (9)$$

donde:

V_n = Límite superior de efecto de enfriamiento

V = Velocidad del aire en m/s

Nota* para velocidades por debajo de 2m/s, velocidades de aire de 0.2 m/s son inapreciables

El límite práctico por ventilación es 1.5m/s, ya que valores mayores provocan incomodidad. El valor V_n es asignado con relación a la temperatura efectiva en condiciones de 50% de humedad relativa (curva de 50% de humedad relativa).

- **Enfriamiento evaporativo directo.** La definición de enfriamiento evaporativo está basado en que la evaporación es un proceso endotérmico, en donde se absorbe calor del aire cercano; de tal manera que la temperatura de bulbo seco y el calor sensible se reducen, lo que provoca adición de vapor de agua e incrementa el contenido de calor latente. El enfriamiento adiabático convierte el calor sensible en calor latente, en donde el fenómeno tiende a moverse hacia una reducción de temperatura y un incremento de humedad; y presenta un movimiento descendente a través de la línea de bulbo húmedo.

Entonces si las condiciones resultantes del aire están dentro de la zona de confort, se puede tomar la línea de temperatura de bulbo húmedo tangencial a la esquina de límite de confort superior (12g/kg as) y llevar la línea paralela a la temperatura de bulbo húmedo hasta llegar al límite máximo por temperatura.

Para el caso del límite inferior de enfriamiento evaporativo se determina a partir de la intersección del límite inferior de humedad absoluta (4 gr/kg as) y el cruce de temperatura

efectiva determinado a partir de límite inferior de confort. A partir del cual se trazará una paralela a la línea de temperatura de bulbo húmedo, hasta chocar con el límite de enfriamiento evaporativo por temperatura.

Para determinar el límite de efecto de enfriamiento evaporativo con relación a la temperatura de bulbo seco, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{ED} = Tn + 12^{\circ} C \quad (10)$$

donde:

E_{ED} = Límite de enfriamiento evaporativo directo

Tn = Temperatura neutra

- **Efecto de enfriamiento evaporativo indirecto.** El enfriamiento evaporativo es efectivo en atmósferas secas, cuando se cuenta con atmósferas húmedas, el potencial de enfriamiento se reduce y la adición de humedad podría resultar inaceptable ya que elevaría los contenidos de humedad del espacio.

En los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto un abanico provee un caudal de aire que es llevado a través de una cámara en donde es enfriado en forma indirecta a través de un intercambiador de calor, en donde no se mezcla aire húmedo y seco, de tal forma de no adicionar humedad al aire que será introducido a la habitación.

La saturación del aire enfriado se aprovecha, de tal forma que el enfriamiento sensible es mayor que con un sistema de enfriamiento directo. Para calcular el límite de efecto de estos sistemas se considera como:

$$E_{EI} = Tn + 15^{\circ} C \quad (11)$$

donde:

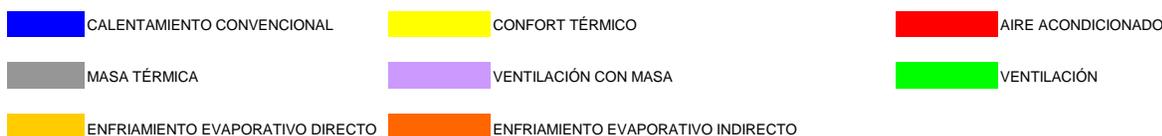
E_{EI} = Límite de enfriamiento evaporativo indirecto

Con la aplicación de este método a partir de los datos de temperatura promedio horaria de todos los meses del año se obtuvo la tabla 2.5, en cual se aprecia que la edificación en los meses de enero, febrero y noviembre, mantiene condiciones de confort óptimo de entre las 14 a las 16 horas, pero con el uso de masa térmica y la adecuada captación de radiación solar a través de ventanas el espacio se puede mantener confortable desde las 8 a las 17 horas, lo que representa una ventaja de 2 a 3 horas más de confort por las primeras horas del día, de acuerdo a las condiciones ambientales externas.

Tabla 2.5: Estrategias bioclimáticas Mexicali B.C.

HORA		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	T-0	9.6°C	11.8°C	15.1°C	19.4°C	22.9°C	26.9°C	31.7°C	30.9°C	28.1°C	21.7°C	14.1°C	10.0°C
	HR-0	52%	39%	22%	37%	32%	22%	35%	32%	24%	25%	49%	34%
1	T-1	8.3°C	11.1°C	14.2°C	18.7°C	22.2°C	26.1°C	31.0°C	30.2°C	27.2°C	20.8°C	13.3°C	9.2°C
	HR-1	54%	40%	25%	38%	33%	23%	36%	33%	24%	26%	51%	35%
2	T-2	8.1°C	10.5°C	13.5°C	18.0°C	21.6°C	25.5°C	30.4°C	29.6°C	26.4°C	20.0°C	12.6°C	8.6°C
	HR-2	55%	41%	26%	39%	34%	24%	37%	34%	25%	27%	52%	36%
3	T-3	7.6°C	9.9°C	12.9°C	17.5°C	21.2°C	25.0°C	30.0°C	29.1°C	25.8°C	19.4°C	12.1°C	8.1°C
	HR-3	56%	42%	27%	40%	35%	24%	37%	35%	26%	28%	53%	37%
4	T-4	7.1°C	9.5°C	12.4°C	17.1°C	20.8°C	24.6°C	29.6°C	28.7°C	25.3°C	18.9°C	11.7°C	7.6°C
	HR-4	58%	43%	27%	41%	35%	24%	38%	35%	26%	28%	54%	37%
5	T-5	6.3°C	9.2°C	12.0°C	16.8°C	20.4°C	23.0°C	28.3°C	28.4°C	24.8°C	18.4°C	11.3°C	7.3°C
	HR-5	58%	44%	29%	41%	36%	26%	38%	36%	27%	29%	55%	38%
6	T-6	6.5°C	8.9°C	11.7°C	16.5°C	19.4°C	23.3°C	28.4°C	27.3°C	23.2°C	18.1°C	11.0°C	7.0°C
	HR-6	59%	44%	28%	43%	37%	25%	39%	37%	26%	29%	56%	38%
7	T-7	5.8°C	8.1°C	10.7°C	16.1°C	20.5°C	24.3°C	29.7°C	28.1°C	23.6°C	16.8°C	10.2°C	6.8°C
	HR-7	61%	45%	29%	42%	36%	24%	38%	36%	28%	30%	58%	39%
8	T-8	5.8°C	8.7°C	11.9°C	17.9°C	22.8°C	27.8°C	32.0°C	30.0°C	25.2°C	17.7°C	10.5°C	6.3°C
	HR-8	61%	44%	28%	39%	33%	22%	35%	34%	26%	29%	57%	39%
9	T-9	7.1°C	10.4°C	14.2°C	20.5°C	25.7°C	30.8°C	34.8°C	32.7°C	28.1°C	19.8°C	11.9°C	7.4°C
	HR-9	58%	41%	25%	35%	29%	19%	31%	30%	24%	27%	54%	38%
10	T-10	9.5°C	13.1°C	17.1°C	23.3°C	28.5°C	33.8°C	37.5°C	35.4°C	31.4°C	22.7°C	14.4°C	9.5°C
	HR-10	52%	37%	22%	31%	25%	17%	27%	27%	21%	24%	48%	34%
11	T-11	12.4°C	16.1°C	20.0°C	25.8°C	30.9°C	36.2°C	39.7°C	37.7°C	34.5°C	25.7°C	17.3°C	12.3°C
	HR-11	45%	32%	19%	27%	22%	14%	24%	24%	18%	21%	42%	30%
12	T-12	15.1°C	18.6°C	22.3°C	27.7°C	32.5°C	37.8°C	41.1°C	39.4°C	36.9°C	28.4°C	20.1°C	14.9°C
	HR-12	39%	27%	17%	24%	20%	13%	22%	21%	16%	18%	36%	26%
13	T-13	17.2°C	20.5°C	23.9°C	28.8°C	33.3°C	38.5°C	41.8°C	40.4°C	38.5°C	30.2°C	22.1°C	17.0°C
	HR-13	33%	24%	15%	22%	19%	13%	21%	20%	14%	16%	32%	23%
14	T-14	18.5°C	21.5°C	24.7°C	29.2°C	33.4°C	38.5°C	41.8°C	40.6°C	39.2°C	31.3°C	23.3°C	18.3°C
	HR-14	30%	22%	14%	22%	19%	13%	21%	20%	13%	15%	29%	20%
15	T-15	19.0°C	21.6°C	24.8°C	28.9°C	32.9°C	37.9°C	41.3°C	40.3°C	39.2°C	31.6°C	23.7°C	18.9°C
	HR-15	29%	22%	14%	22%	19%	13%	22%	20%	14%	15%	28%	20%
16	T-16	18.7°C	21.2°C	24.3°C	28.3°C	32.1°C	36.8°C	40.4°C	39.5°C	38.5°C	31.3°C	23.4°C	18.7°C
	HR-16	30%	23%	15%	23%	20%	14%	23%	21%	14%	15%	29%	20%
17	T-17	18.0°C	20.2°C	23.4°C	27.2°C	30.9°C	35.5°C	39.3°C	38.5°C	37.4°C	30.4°C	22.6°C	18.0°C
	HR-17	32%	24%	15%	25%	22%	15%	25%	23%	15%	16%	30%	21%
18	T-18	16.9°C	19.0°C	22.3°C	26.1°C	29.6°C	34.1°C	38.0°C	37.3°C	36.1°C	29.3°C	21.4°C	17.0°C
	HR-18	34%	26%	17%	26%	24%	16%	26%	24%	16%	17%	33%	23%
19	T-19	15.8°C	17.7°C	21.0°C	24.8°C	28.3°C	32.5°C	36.8°C	36.1°C	34.6°C	28.0°C	20.1°C	15.7°C
	HR-19	37%	29%	18%	28%	25%	18%	28%	26%	18%	18%	36%	26%
20	T-20	14.2°C	16.3°C	19.6°C	23.5°C	27.0°C	31.2°C	35.5°C	34.8°C	33.1°C	26.6°C	18.7°C	14.4°C
	HR-20	41%	31%	20%	30%	27%	19%	30%	27%	19%	20%	39%	27%
21	T-21	12.9°C	15.0°C	18.3°C	22.3°C	25.8°C	29.9°C	34.4°C	33.7°C	31.7°C	25.2°C	17.4°C	13.2°C
	HR-21	44%	33%	21%	32%	29%	20%	31%	29%	20%	21%	42%	29%
22	T-22	11.6°C	13.8°C	17.1°C	21.2°C	24.7°C	28.8°C	33.4°C	32.6°C	30.3°C	23.9°C	16.2°C	12.0°C
	HR-22	47%	36%	22%	34%	30%	21%	33%	30%	22%	23%	45%	30%
23	T-23	10.5°C	12.7°C	16.0°C	20.2°C	23.8°C	27.8°C	32.5°C	31.7°C	29.2°C	22.8°C	15.1°C	10.9°C
	HR-23	49%	37%	23%	36%	31%	22%	34%	31%	23%	24%	47%	32%

Fuente: Elaboración propia con metodología de Docherty y Zsokolay (1999)



Para el caso del mes de diciembre, la estrategia con mayor predominancia es la utilización de la masa térmica con la ganancia de radiación solar pasiva, desde las 10 a las 16 horas. Cabe destacar que durante este mes las construcciones no se encuentran confortables en forma óptima a ninguna hora del día. Al comparar las condiciones exteriores con las del espacio cerrado se puede apreciar que se tiene una extensión de confort por la mañana de 3 horas con el uso de masa térmica y calefacción solar pasiva.

Los meses de marzo y abril, considerados como meses de transición entre la época fría y cálida son similares en cuanto a su comportamiento ya que la edificación se mantiene en condiciones de confort sin el uso de estrategias bioclimáticas desde las 11 a las 17 horas en el mes de marzo y desde las 10 a las 21 horas en el mes de abril, sin embargo, por las primeras horas del día es necesario el uso de la masa térmica y a partir de la salida del sol esta puede ser auxiliada por la ganancia de calor útil a través de las ventanas que componen la envolvente arquitectónica. Al comparar el edificio con el espacio abierto se observa una ventaja de una hora en el mes de marzo y 2 horas en el mes de abril por las primeras horas del día; mientras que por la tarde se cuenta con los mismos tiempos.

Para el caso de los meses de transición de verano a invierno (septiembre y octubre), se puede apreciar que son meses con ventajas térmicas para la edificación desde las primeras horas del día hasta las 10 de la mañana para el caso de septiembre; y hasta las 6 de la mañana en octubre. Sin embargo, el mes de septiembre requiere de una adecuada ventilación de 11 a 12 horas y de 18 a 21 horas, además de uso de enfriamiento evaporativo directo de 13 a 17 horas. En el caso del mes de octubre las condiciones ambientales demandan una pequeña variación en cuanto al uso de estrategias bioclimáticas y en este periodo es necesario utilizar la combinación de masa térmica con una adecuada ganancia de calor útil en las primeras horas del día hasta las 9 de la mañana. En el periodo de 10 a las 11 horas las condiciones ambientales son óptimas y no es necesaria ninguna estrategia bioclimática, posterior a este periodo hasta las 19 horas las condiciones de humedad en el ambiente demandan el adecuado uso de ventilación natural, para continuar con condiciones confortables a partir de las 20 horas.

Los meses que marcan el inicio del periodo cálido son mayo y junio, en los cuales se demanda una serie de estrategias a lo largo del día. En mayo se puede apreciar que se cuenta con condiciones de confort las primeras 3 horas del día, para posteriormente requerir el uso de una adecuada masa térmica hasta las 6 de la mañana. Sin embargo, se cuenta con condiciones de confort de las 7 a las 11 horas y de nuevo se requiere el uso de masa térmica de 12 a 16, pero auxiliada de una adecuada ventilación. A partir de las 17 horas, la edificación se mantiene en condiciones confortables hasta las 2 horas del siguiente día.

En el caso del mes de junio las condiciones ambientales permiten que la edificación se mantenga confortable desde las primeras horas del día hasta las 9 de la mañana y es necesario el uso de ventilación natural de 10 a 11 horas y de 18 a 19 horas; sin embargo, de 12 a 17 horas es necesario el uso de enfriamiento evaporativo directo.

Los meses con mayor problema en cuanto a las condiciones ambientales de la edificación son los meses de julio y agosto en los cuales desde las primeras horas del día es necesario el uso de la masa térmica con una adecuada ventilación natural ya que las temperaturas ambientales son muy elevadas y el contenido de humedad es alto. Sin embargo, en las primeras horas del día de 5 a 6 de la mañana se cuenta con condiciones de confort. En estos meses el periodo crítico comprende de entre las 11 y 19 horas y en este periodo es necesario el uso del enfriamiento evaporativo indirecto.

CAPITULO 3. VIVIENDA ENERGETICAMENTE SUSTENTABLE

La casa es el espacio donde se conjuntan diferentes áreas y elementos arquitectónicos que permiten al ser humano realizar sus actividades cotidianas y cubrir sus necesidades básicas, es un nicho que los cubre y los protege de los fenómenos naturales (Moore *et al.*, 1976). El principal reto al que se enfrentan los diseñadores de espacios arquitectónicos en Mexicali B.C., debido a su clima cálido seco extremo, es lograr propuestas confortables con soluciones ambientales que reduzcan los consumos de energía eléctrica.

Por lo tanto es necesario utilizar principios de la “arquitectura bioclimática”, la cual según Morillón *et al.*, (2002) se encarga de armonizar los espacios y crear condiciones óptimas de confort y bienestar para sus ocupantes. La creación de espacios debe ser funcional, proponer formas expresivas para el confort visual, ser física y psicológicamente adecuados; además de que propicien el desarrollo integral del hombre y de sus actividades. Rodríguez *et al.*, (2001) especifican que es necesario ver la arquitectura no solo como muros, fachadas y la cubierta sino como un espacio vital y que no basta generar una solución económica sino una solución saludable y agradable y que responda al clima del lugar.

En este contexto, en el presente apartado se describe los criterios de adecuación ambiental utilizados para el diseño de la vivienda energéticamente sustentable y su efecto en las condiciones de confort, además de describir la integración de los sistemas térmicos para proveer calentamiento, enfriamiento y agua para uso doméstico.

3.1 Descripción de vivienda energéticamente sustentable

La vivienda energéticamente sustentable se propone bajo los principios del diseño ambiental. Para tal efecto se aplican estrategias de diseño enfocadas a la climatización natural en temporadas con factibilidad, con la finalidad de lograr condiciones óptimas de confort y reducir al máximo los consumos de energía convencional.

Además se aplican algunas técnicas de adecuación ambiental que hacen al edificio energéticamente eficiente y se reduzcan las demandas de energía a los sistemas activos de enfriamiento y calentamiento en las edificaciones en las temporadas críticas en la ciudad de Mexicali, B.C.

Para la climatización de la vivienda en periodos críticos se propone un sistema integral operado a partir de energía térmica. El sistema integral esta compuesto por un sistema de enfriamiento por absorción que opera a partir de una solución LiBr-H₂O, un sistema de calentamiento por piso radiante, además de un sistema de calentamiento de agua para uso doméstico.

El programa arquitectónico para la vivienda corresponde a una vivienda de nivel medio alto para 5 usuarios, con dos niveles (ver figura 3.1). Las dimensiones de los espacios se pueden ver en el anexo 1

La **planta baja** tiene un área construida de 42 m² y está compuesta por: cochera para dos vehículos, pórtico, sala, comedor, cocina, ½ baño, área de lavado, patio posterior, pasillo de servicio y escaleras. En dicha planta se propone un área interconectada a través de un espacio distribuidor central para generar una interrelación entre los diferentes espacios.

El comedor se encuentra ubicado en la parte sureste y se maneja remetido respecto a la sala, con la intención de generar un efecto de sombreado sobre la pared sur, generando un espacio confortable.

La sala por ser el espacio con mayor afectación por radiación solar se propone con un muro doble de bloque relleno de arena para generar mayor masa térmica y propiciar una mayor inercia térmica en la pared sur, además de manejarse un sistema de pérgolas por la parte oeste para sombrear y reducir las ganancias de calor por radiación solar directa.

La cocina se ubica en la parte noreste, esto permite que la disipación de calor se de con mayor facilidad a través de la ventilación cruzada. La escalera sirve como elemento disipador de calor a través de sus ventanales ya que está interconectado con todos los espacios de planta baja.

El área de lavar por su ubicación en la parte norte permite la ventilación cruzada por medio del pasillo de servicio lo que provoca la disipación de humedad de dicha zona.

La *planta alta* tiene un área construida de 59 m² cuenta con una recámara principal con baño, dos recámaras con baño compartido con un espacio distribuidor central. La recámara principal está ubicada en la parte suroeste, por la parte sur se maneja un sistema de muro doble de bloque relleno de arena para provocar retraso térmico; además el baño sirve como colchón térmico para reducir los flujos de calor.

La recámara ubicada en la orientación sur este se maneja remetida respecto a la recámara principal lo que genera un mayor efecto de sombreado sobre las horas críticas y un colchón térmico durante las horas con mayor temperatura ambiente.

La recámara con mayores ventajas durante el periodo cálido es la ubicada en la parte noreste, sin embargo por las horas de la tarde se ve afectada por radiación solar directa el muro oeste, para la solución de esta ganancia se propone un guardarropa que sirve como colchón térmico.

Al igual que en planta baja el espacio de escaleras sirve como elemento disipador de calor a través de los ventanales además de que amortigua térmicamente las ganancias de calor por las horas de la tarde.

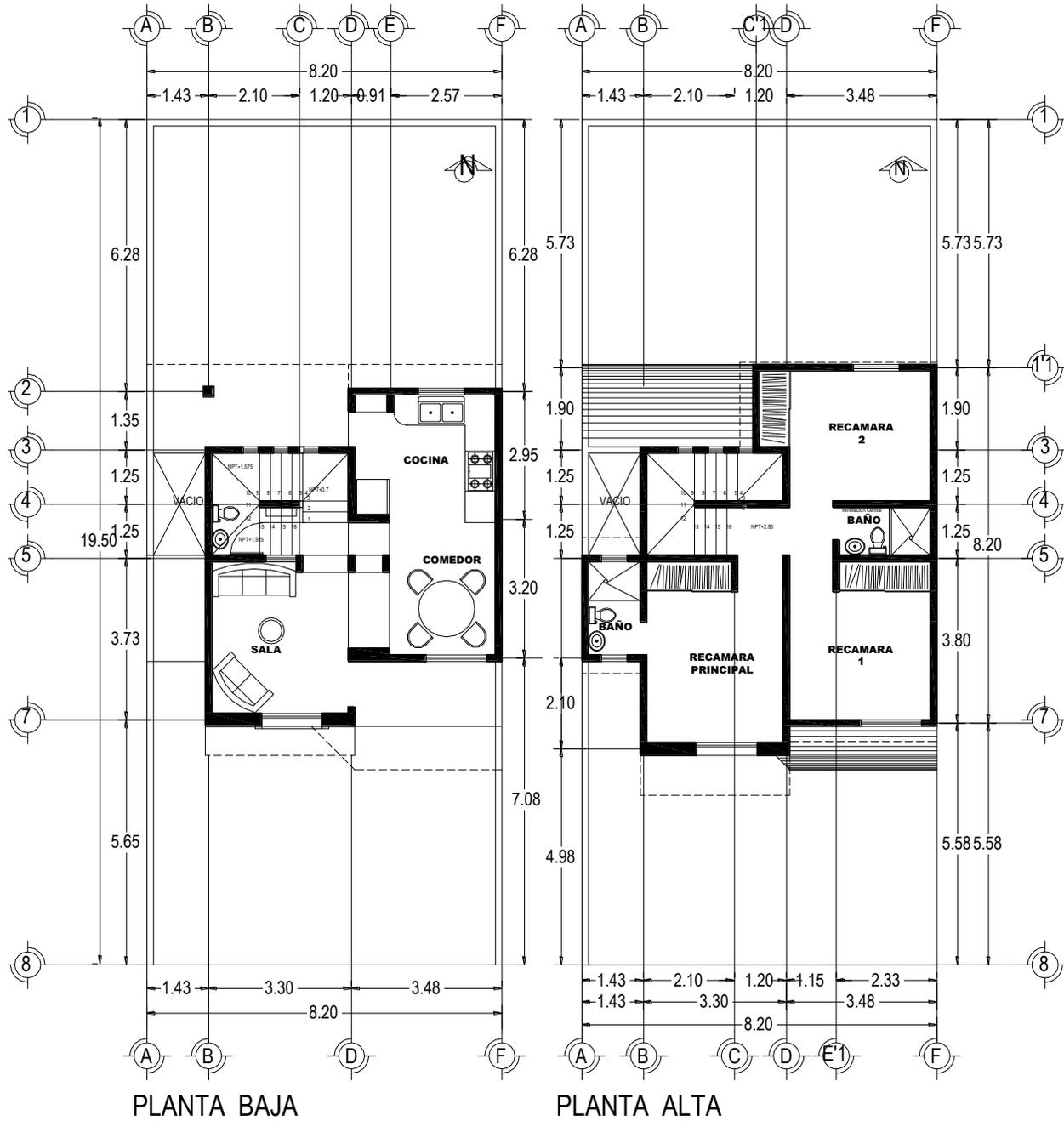


Figura 3.1: Plantas arquitectónicas de vivienda energéticamente sustentable

3.2 Análisis de diseño ambiental de proyecto energéticamente sustentable

En este apartado se realiza una descripción de las técnicas utilizadas en la vivienda energéticamente sustentable, así como el método de evaluación realizado y los resultados obtenidos de dichos análisis.

3.2.1 Materiales de construcción y sistemas constructivos

Es de suma importancia al momento de diseñar un espacio, conocer y seleccionar adecuadamente los materiales de construcción y sistemas constructivos, ya que es benéfico para obtener óptimas condiciones de confort por medios pasivos o naturales en la edificación. Además de que cuando se requiere del uso de sistemas activos se reduce la carga térmica, la capacidad instalada y el consumo de energía eléctrica. El diseño de los componentes constructivos de una edificación requiere, no sólo de consideraciones estéticas, estructurales o económicas, por mencionar algunas, sino también de consideraciones térmicas.

En la edificación con ausencia de un sistema de climatización, la temperatura interna depende de los flujos de calor por conducción transferidos a través de los cerramientos opacos (techo, paredes y piso). La conductividad térmica, el calor específico y la densidad de los materiales, determinan la ganancia de calor en el interior de las edificaciones. En la tabla 3.1 se muestran las propiedades de los materiales y sistemas constructivos utilizados en la vivienda.

Tabla 3.1: Propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos

PROPIEDADES				
	Conductividad térmica kJ/h m °C	Calor específico kJ/kg °C	Densidad kg/m ³	Resistencia térmica hm ² °C/kJ
^b Bloque 0.15	4.68	0.36	1800	
^b Espacio de aire vertical				0.05
^b Mortero	5.04	1	2000	
^b Poliestireno	0.122	1.21	29	
^a Cartón arenado	0.68	1.7	1100	
^a Asfalto	2.52	1	2100	
^c Concreto armado	1.74	1	2300	
^d Vigueta y bovedilla	1.69	1.0	1062	
^a Madera de pino	0.47	1.6	500	
SISTEMAS CONSTRUCTIVOS				
SISTEMA	CAPAS			VALOR "U" (w/m ² °C)
Muro sin aislamiento	Mortero, bloque hueco, poliestireno, mortero			3.477
Muros aislados	Mortero, bloque hueco, poliestireno, mortero			0.982
Piso	Piso radiante			1.010
Entre Piso	Piso radiante			1.010
Puerta de madera	Madera pino, aire, madera de pino			1.016
Techo aislado	Mortero, vigueta y bovedilla, asfalto, poliestireno, asfalto, cartón arenado			0.498
Techo con ático	Mortero, vigueta y bovedilla, asfalto, poliestireno, asfalto, cartón arenado			0.474
Ventana vidrio sencillo				3.24
Puerta	Madera de pino, espacio de aire, madera de pino			1.016

Fuente: Elaborada a partir de ^aASHRAE(2001), ^bITEM Systems(1995), ^cNOM-020-ENER (2007), ^dEstimada

Como se puede observar en la tabla 3.1, el sistema de muros corresponde a muros de bloques de concreto, esto debido a que es un sistema de fácil acceso y rapidez para la construcción de las viviendas en serie ya que se puede acceder a grandes volúmenes de material con facilidad. Sin embargo la conductividad térmica de dicho material es alta, por lo que para disminuir el flujo de calor se propone el uso de un material con alta resistencia térmica y baja conductividad térmica tal como el poliestireno en ciertas orientaciones críticas.

La propuesta de aislamiento en muros se propone básicamente para la orientación oeste sobre las superficies de la planta alta, ya que en planta baja se trabaja un efecto de sombreado. La aplicación de aislamiento térmico es debida a que entre las 2 y 4 de la tarde se cuenta con altas temperaturas ambiente, además de que es esta misma hora cuando la superficie recibe los rayos solares en forma directa, lo que hace se incremente el flujo de calor debido al diferencial de temperatura entre la superficie exterior e interior de la edificación.

En el caso de la superficie este, se consideró sin aislamiento térmico ya que la temperatura ambiente durante las horas de asoleamiento no es significativa para la aplicación de esta técnica. Además de que en el periodo frío esta orientación puede beneficiar al comportamiento de la vivienda ya que se puede captar energía que servirá para el calentamiento pasivo de la edificación.

La orientación sur se consideró sin aislamiento debido a que esta orientación puede ser tratada por medio de un adecuado sombreado que reduce el flujo de calor durante el verano, sin embargo en el periodo frío debido a la inclinación de los rayos solares se puede aprovechar la energía solar para calentar la superficie y emitir energía radiante al espacio, provocando calentamiento pasivo. En el caso de la orientación norte tampoco se utilizó aislamiento debido a que es una orientación que solamente recibe energía solar en los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto (ver figura 2.28) durante un periodo corto del día, por las mañanas y tardes.

Los techos propuestos para la vivienda se consideraron con aislamiento térmico, esto debido a que la ciudad de Mexicali el mayor problema por efecto de las condiciones ambientales se da en el período de mayo a octubre. Sin embargo el sistema de aislamiento térmico también beneficia a la pérdida de calor por energía radiante con la bóveda celeste, lo que hace se mantenga la energía interna de la edificación generando condiciones de confort para los usuarios del espacio durante el invierno. Otra técnica utilizada en el techo de la vivienda es un sistema de techo doble con ático ventilado debido a que un gran porcentaje de la techumbre será utilizada para la colocación del sistema de colección solar de tubos evacuados. Lo que genera un incremento de temperatura de la superficie, el cual, debe ser eliminado a través del ático para que no afecte en la ganancia de calor de la losa de techo por conducción.

3.2.2 Asoleamiento, sombreado e iluminación

El efecto de sombreado es una técnica utilizada para reducir la temperatura de la superficie, lo que beneficia en la reducción de calor ya que se tiene un menor diferencial de temperatura entre la superficie exterior e interior de la edificación, Sin embargo es necesario hacer un buen análisis de asoleamiento estacional (ver figura 2.28) ya que en el periodo frío es necesario que las superficies puedan recibir energía radiante para propiciar calentamiento pasivo a la edificación. Baker *et al.*, (2002) especifican que la radiación solar directa, difusa o reflejada se transforma en calor al incidir sobre las superficies, por lo que debe ser controlada y selectiva para el diseño de las edificaciones para asegurar sombreado en verano

y calentamiento solar en invierno. Para el estudio de sombreado y elaboración de imágenes se utilizó el programa SketchUp 6.

Otra de las ventajas del aprovechamiento de la radiación solar es el manejo de la luz natural, con lo que se reduce el consumo de energía por uso de sistemas de iluminación artificial durante el verano, además según estudios realizados por (Persson *et al.*, 2006) el adecuado diseño de las ventanas genera ahorros de energía en el periodo de alta demanda de enfriamiento, esto debido a la reducción de ganancias de calor por energía solar directa a través de las ventanas. Sin embargo según Paricio, (1999) en el diseño de una adecuada protección solar se debe tener en cuenta que no se reduzca la calidad de iluminación natural de los espacios

En la figura 3.2 se puede observar que la vivienda con *fachada* principal a la orientación *sur* mantiene sombra total al medio día solar del 21 de junio, esto debido al adecuado dimensionamiento de los aleros sobre la fachada. Lo que hace que la temperatura de la superficie se vea afectada solamente por la temperatura ambiente y a los efectos de radiación reflejada y difusa, pero no por efecto de la radiación solar directa a la superficie.



Figura 3.2: Fachada sur 21 de junio, medio día solar, Mexicali B.C.

Otra de las técnicas implementadas en la fachada sur es la utilización de un desfase de la recámara principal para generar un efecto de sombreado sobre las horas críticas, lo que genera un sombreado sobre la superficie de techo del acceso principal, además de sombrear la superficie sur de la recámara sur.

Cabe destacar que el efecto de sombreado cubre el 100% de la fachada sur de mayo a julio. Es a partir del mes de agosto cuando se empieza a recibir radiación solar en un 25% de la superficie (ver figura 3.3). Para septiembre se obtiene un 50% incrementándose hacia el mes de diciembre hasta un 80% (ver figura 3.4). De acuerdo a lo anteriormente descrito se puede apreciar que el efecto de sombreado cumple con las expectativas de sombreado en la mayor parte del verano y con calentamiento en el periodo frío.



Figura 3.3: Fachada sur 21 de agosto, medio día solar



Figura 3.4: Fachada sur 21 de diciembre, medio día solar

En el caso de la *superficie este*, la vivienda colindante produce un efecto de sombreado al 80% durante la mayor parte de las horas de la mañana durante el periodo cálido (ver figura 3.5 y 3.6); además de que el baño permite un sombreado al 100% sobre una sección de la superficie colindante. El periodo en el que se recibe la mayor parte de radiación solar en la superficie este es a partir de las 11 a las 12 horas.



Figura 3.5: Fachada este 21 de junio, 9 horas



Figura 3.6: Fachada este 21 de junio, 11 horas

En la *superficies oeste* de planta baja, la radiación solar no representa ningún problema ya que se propone un sistema de pérgolas que permiten un sombreado total desde abril a agosto. El resto de año se obtiene ganancia solar de menor a mayor hacia el mes de diciembre, permitiendo solamente la sombra del espesor de la pérgola como se puede observar en la figura 3.7. Esto hace que en el periodo frío la vivienda pueda calentarse en forma pasiva ya que esta superficie no cuenta con aislamiento térmico.

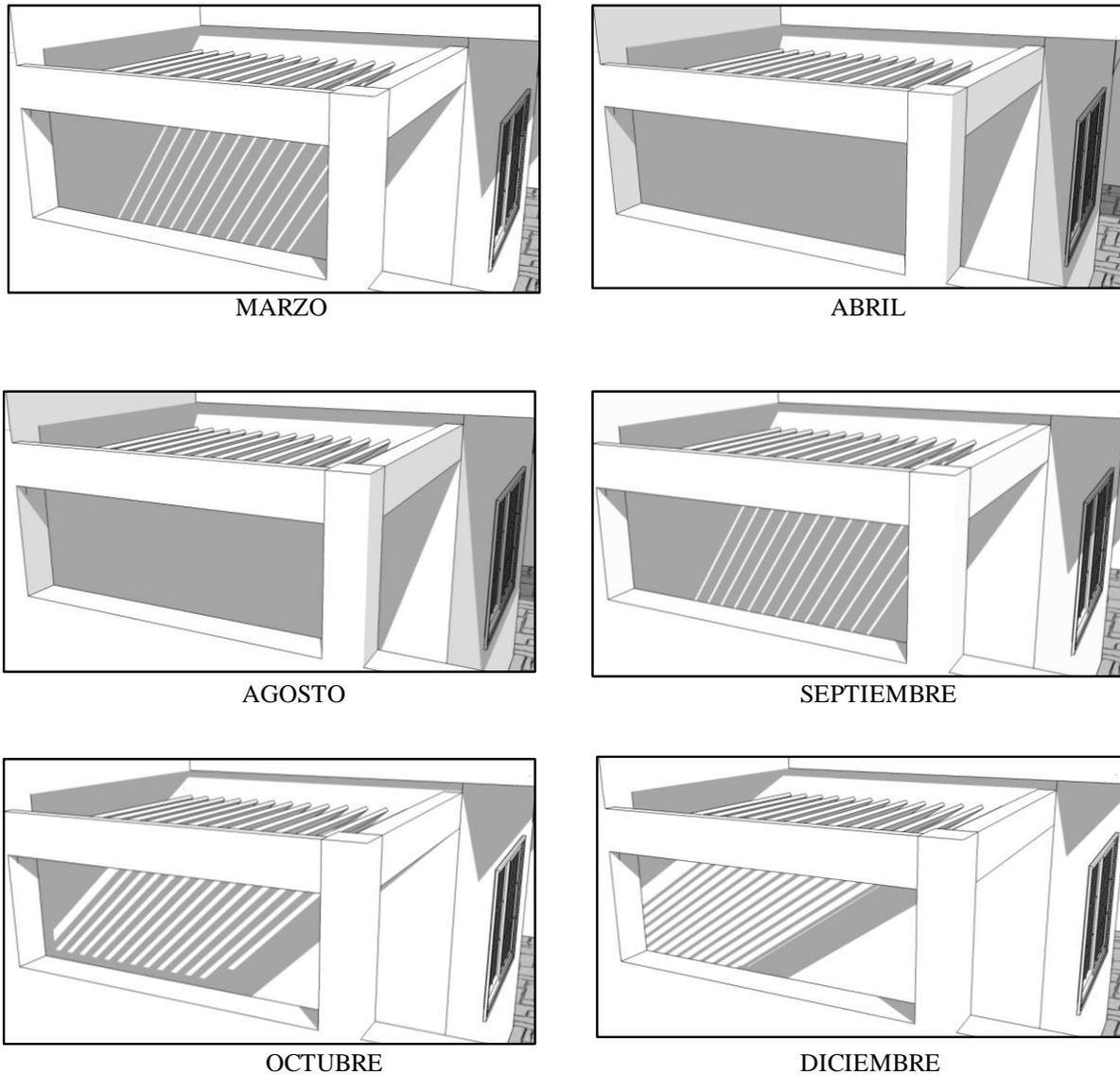


Figura 3.7: Sombreado de pérgolas en superficie oeste

La *superficie norte* no representa un gran problema por efecto de calentamiento a través de radiación solar directa; si embargo existen ciertas horas del día, sobre todo en los meses de abril a septiembre que reciben radiación solar por las primeras horas del día y hacia el final del día (ver figura 3.8 y 3.9).



Figura 3.8: Fachada norte, 6 horas



Figura 3.9: Fachada norte, 18 horas

Las ventanas del módulo de escaleras no tienen problema de ganancia solar directa hacia el espacio. Las horas con mayor afectación se dan a partir de las 3 de la tarde ya que existe una combinación de alta temperatura ambiente con gran disponibilidad de recurso solar. Las técnicas implementadas son: un sistema de ventanas verticales para evitar la ganancia de radiación solar por vidrios, además de aprovechar el efecto de sombreado de la vivienda colindante. Otra de las superficies con problemas de asoleamiento es la superficie norte de la recámara dos, la cual cuenta con un área de guardarropa como elemento de colchón térmico. Para el caso de la planta baja se propone un techo que hace la función de sombreado sobre la superficie del área de lavado además de provocar sombreado sobre la superficie de la puerta de salida al patio posterior.

Otro de los factores a cuidar es la adecuada *iluminación natural* de los espacios ya que de esta manera se genera confort lumínico para el quehacer diario de los usuarios, además de que se evita al máximo el uso de sistemas de iluminación en el periodo con disponibilidad de recurso solar. Para tal efecto se utilizan ventanas en todos los espacios propuestos. Cabe destacar que de acuerdo a estudios realizados por Calderón (1995), en Mexicali la apertura de ventanas debe ser pequeña ya que se cuenta con un cielo claro con abundancia lumínica, incluso en el periodo estacional frío.

3.2.3 Ventilación natural

En la arquitectura, el control apropiado de los vientos tiene una gran importancia, ya que determina los niveles de confort higrotérmico de los usuarios y sobre todo la salud de los mismos, ya que la inadecuada ventilación afecta en forma directa en la calidad del aire de los espacios. (Allard, 1998; Boutet, 1987; Chávez *et al.*, 2005)

Entre las principales ventajas de utilizar la ventilación natural se encuentran: a) Mantener la calidad del aire en niveles aceptables de calidad. b) Reemplazo del aire interior viciado debido a las actividades de los usuarios, por aire fresco y limpio. c) Provocar enfriamiento convectivo de la edificación, cuando las condiciones de temperatura exterior son adecuadas. d) Provocar enfriamiento convectivo de los usuarios y evaporar la humedad superficial de la piel.

En las edificaciones de la ciudad de Mexicali el uso de ventilación debe ser restringido a unas cuantas horas durante el periodo crítico del 15 de mayo a septiembre (ver tabla 2.5), debido a las altas temperaturas ambientales. Sin embargo durante los meses de transición de invierno a verano (de marzo a mediados de mayo) y de verano a invierno (de octubre a mediados de noviembre), el uso de la ventilación tiene buen potencial de enfriamiento convectivo, el cual debe ser aprovechado para reducción de consumo de energía eléctrica por climatización artificial.

Para el diseño de la vivienda energéticamente sustentable se consideró la adecuada ventilación de la edificación. En la figura 3.10 se muestra que el edificio cuenta con ventilación cruzada en toda la planta baja ya que el diseño es un espacio abierto interconectado entre sala, comedor y cocina. Además se observa que el espacio de escaleras sirve como un elemento disipador de calor debido a la doble altura, lo que permite la extracción de calor a través de los ventanales verticales y la ventana cenital que converge a la chimenea central de ventilación general del edificio.

En el caso de la planta alta se plantea una solución integral entre el sistema de extracción de la unidad de enfriamiento y el sistema de ventilación natural (ver figura 3.10). Lo que representa aprovechamiento del sistema de rejillas de succión del aire acondicionado para provocar movimientos de masa de aire que disipen el calor de la edificación durante las temporadas en que el edificio pueda ser ventilado en forma natural, dependiendo de la calidad de temperatura del aire exterior.

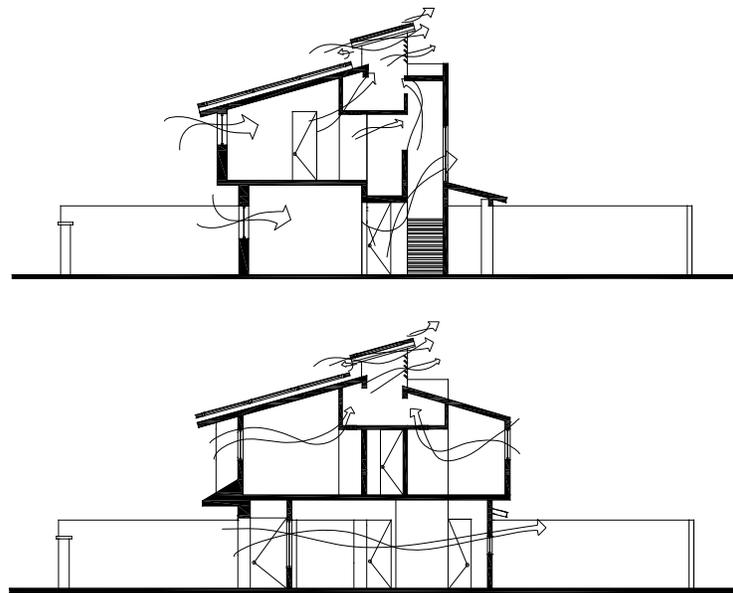
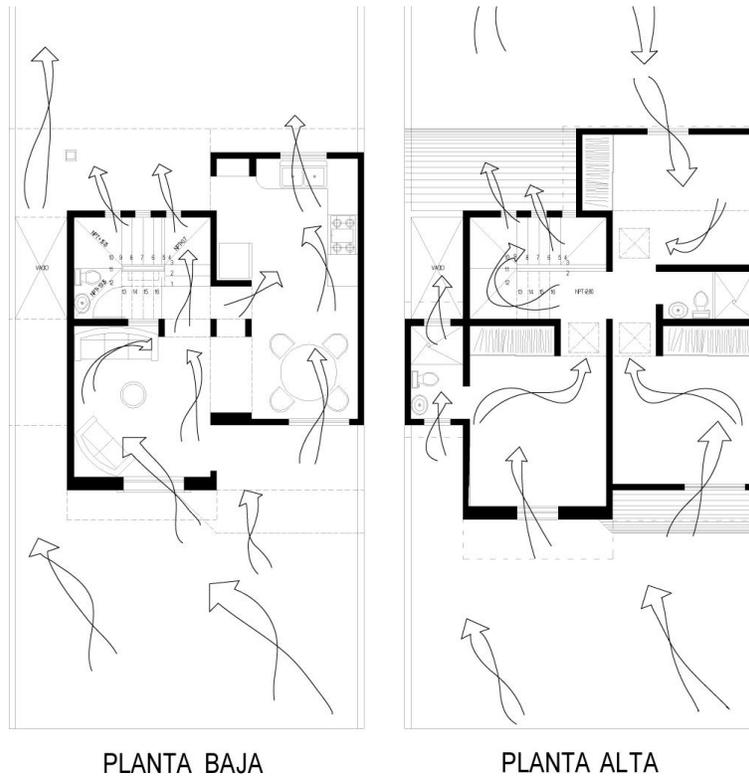


Figura 3.10: Ventilación natural de vivienda

Para conocer el potencial de la estrategia de ventilación natural se realizó un estudio horario de simulación térmica del edificio a partir de TRNSYS 16 a partir del que se elaboró la tabla 3.2 y 3.3, en las que se puede observar el confort térmico (PMV) de planta baja y alta respectivamente.

Tabla 3.2: Confort térmico (PMV) planta baja, con ventilación natural

HORA/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	-2.27	-2.21	-1.22	-0.81	0.16	0.98	1.91	1.94	1.41	0.26	-1.00	-2.31
2	-2.38	-2.33	-1.37	-0.97	-0.01	0.78	1.75	1.81	1.28	0.12	-1.10	-2.44
3	-2.48	-2.45	-1.49	-1.12	-0.18	0.59	1.61	1.68	1.11	-0.04	-1.22	-2.54
4	-2.58	-2.55	-1.59	-1.24	-0.30	0.40	1.47	1.58	0.99	-0.18	-1.32	-2.63
5	-2.66	-2.65	-1.69	-1.36	-0.42	0.24	1.35	1.48	0.91	-0.30	-1.41	-2.81
6	-2.73	-2.73	-1.78	-1.46	-0.50	0.20	1.28	1.41	0.82	-0.40	-1.48	-2.80
7	-2.80	-2.79	-1.83	-1.41	-0.39	0.40	1.39	1.46	0.83	-0.43	-1.54	-2.88
8	-2.86	-2.80	-1.70	-1.15	-0.12	0.72	1.64	1.66	1.06	-0.27	-1.50	-2.89
9	-2.68	-2.57	-1.34	-0.79	0.25	1.11	1.95	1.99	1.43	0.17	-1.22	-2.66
10	-2.32	-2.20	-0.95	-0.44	0.61	1.48	2.27	2.30	1.85	0.52	-0.83	-2.29
11	-1.97	-1.87	-0.64	-0.18	0.88	1.69	2.53	2.53	2.15	0.87	-0.50	-1.93
12	-1.63	-1.57	-0.39	0.06	1.12	1.98	2.76	2.73	2.42	1.17	-0.24	-1.59
13	-1.37	-1.36	-0.19	0.25	1.30	2.19	2.96	2.90	2.64	1.40	-0.04	-1.33
14	-1.20	-1.21	-0.05	0.39	1.46	2.38	3.14	3.07	2.82	1.57	0.10	-1.14
15	-1.03	-1.04	0.12	0.58	1.66	2.55	3.35	3.25	2.99	1.76	0.25	-0.98
16	-0.95	-0.99	0.19	0.67	1.76	2.67	3.47	3.33	3.06	1.83	0.28	-0.96
17	-0.99	-1.02	0.18	0.67	1.77	2.77	3.50	3.29	3.03	1.80	0.18	-1.07
18	-1.14	-1.14	0.10	0.63	1.73	2.75	3.47	3.15	2.89	1.63	-0.01	-1.26
19	-1.40	-1.37	-0.15	0.35	1.53	2.58	3.31	2.94	2.67	1.34	-0.27	-1.49
20	-1.56	-1.55	-0.38	0.11	1.29	2.33	3.07	2.74	2.46	1.12	-0.43	-1.61
21	-1.68	-1.67	-0.52	-0.06	1.08	2.07	2.85	2.58	2.24	0.95	-0.54	-1.78
22	-1.82	-1.81	-0.67	-0.26	0.86	1.76	2.62	2.40	2.00	0.74	-0.67	-1.94
23	-1.96	-1.96	-0.83	-0.47	0.64	1.48	2.38	2.22	1.81	0.54	-0.80	-2.06
24	-2.11	-2.09	-0.99	-0.65	0.43	1.23	2.16	2.07	1.56	0.36	-0.93	-2.18

Tabla 3.3: Confort térmico (PMV) planta alta, con ventilación natural

HORA/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	-2.84	-2.78	-1.48	-0.90	0.38	1.48	2.65	2.66	2.02	0.50	-1.15	-2.90
2	-2.96	-2.91	-1.63	-1.07	0.20	1.28	2.48	2.51	1.89	0.35	-1.27	-3.03
3	-3.07	-3.04	-1.76	-1.22	0.02	1.07	2.33	2.38	1.71	0.18	-1.39	-3.14
4	-3.18	-3.15	-1.87	-1.36	-0.11	0.85	2.18	2.26	1.56	0.02	-1.51	-3.24
5	-3.26	-3.25	-1.97	-1.48	-0.25	0.68	2.05	2.15	1.48	-0.12	-1.62	-3.45
6	-3.34	-3.34	-2.08	-1.61	-0.35	0.62	1.95	2.06	1.37	-0.23	-1.69	-3.44
7	-3.43	-3.42	-2.15	-1.59	-0.26	0.79	2.04	2.09	1.37	-0.28	-1.76	-3.53
8	-3.51	-3.44	-2.03	-1.32	0.03	1.12	2.28	2.28	1.60	-0.12	-1.74	-3.54
9	-3.32	-3.20	-1.64	-0.94	0.41	1.52	2.59	2.61	1.99	0.35	-1.44	-3.30
10	-2.93	-2.81	-1.23	-0.60	0.77	1.90	2.93	2.94	2.43	0.70	-1.02	-2.89
11	-2.53	-2.47	-0.95	-0.33	1.06	2.13	3.22	3.18	2.72	1.05	-0.68	-2.49
12	-2.19	-2.17	-0.71	-0.07	1.32	2.44	3.47	3.40	2.99	1.37	-0.42	-2.15
13	-1.92	-1.96	-0.49	0.14	1.52	2.69	3.70	3.61	3.23	1.60	-0.21	-1.89
14	-1.75	-1.79	-0.33	0.31	1.71	2.91	3.91	3.81	3.44	1.79	-0.06	-1.69
15	-1.59	-1.63	-0.15	0.51	1.92	3.09	4.14	4.01	3.61	1.99	0.08	-1.54
16	-1.50	-1.56	-0.05	0.62	2.04	3.24	4.28	4.10	3.69	2.08	0.14	-1.51
17	-1.51	-1.57	-0.03	0.64	2.07	3.37	4.33	4.06	3.70	2.09	0.06	-1.61
18	-1.67	-1.67	-0.09	0.62	2.04	3.35	4.31	3.92	3.56	1.92	-0.16	-1.81
19	-1.95	-1.91	-0.34	0.34	1.85	3.20	4.16	3.71	3.35	1.62	-0.43	-2.05
20	-2.12	-2.11	-0.58	0.07	1.59	2.93	3.90	3.51	3.15	1.38	-0.59	-2.16
21	-2.23	-2.23	-0.72	-0.11	1.36	2.63	3.65	3.34	2.89	1.21	-0.70	-2.34
22	-2.38	-2.37	-0.88	-0.32	1.13	2.29	3.40	3.14	2.63	0.99	-0.83	-2.52
23	-2.53	-2.53	-1.04	-0.54	0.90	2.00	3.15	2.96	2.44	0.78	-0.97	-2.64
24	-2.68	-2.66	-1.20	-0.72	0.68	1.74	2.92	2.80	2.18	0.60	-1.11	-2.76

ESCALA DE CONFORT ISO-7730	
< -3	Muy frío
-3 a -2	Frío
-2 a -1	Ligeramente frío
-1 a -0.5	Confortablemente frío
-0.5 a 0.5	Confort
0.5 - 1	Confortablemente caliente
1 a 2	Ligeramente caliente
2 a 3	Caliente
> 3	Muy caliente

Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el simulador TRNSYS 16

A partir de la tabla 3.2 y 3.3 se puede observar que la edificación puede ser ventilada en forma natural durante los meses de marzo, abril y noviembre. Otro de los meses en que se puede utilizar la ventilación en ciertas horas del día son los meses de mayo, junio y octubre. Sin embargo se obtienen mejores condiciones para los usuarios en planta baja debido a la menor influencia de las variables climáticas.

En marzo la planta baja se mantiene en confort de las 11 a las 22 horas, el resto de las horas, el espacio esta ligeramente frío con mayor descenso de las temperaturas (frío) entre las 6 y 8 horas. El mes de noviembre tiene un comportamiento similar. Estos meses representan el periodo de transición entre la temporada fría y cálida (marzo) y de la cálida a fría (noviembre). En el caso de la planta baja durante estos meses el espacio tiene mejores condiciones ya que la máxima escala permanece en el rango de ligeramente frío y el periodo de confort se extiende hasta el final del día.

En abril tanto la planta baja como la planta alta obtiene un mayor aprovechamiento de la ventilación natural ya que se obtienen condiciones de entre confort y confortablemente frío, con mayores descensos de temperatura entre las 2 y 8 horas.

En el mes de mayo el aprovechamiento de la ventilación natural se reduce a las horas nocturnas entre confort y confortablemente caliente para la planta alta, pero de las 11 a las 22 horas se incrementa la temperatura del espacio obteniendo condiciones ligeramente calientes de las 11 a las 15 y de las 19 a las 22 horas. El periodo con mayores problemas durante este mes es el periodo de las 16 a las 18 horas ya que el espacio se mantiene caliente. En el caso de la planta baja, el espacio tiene un mejor comportamiento ya que el espacio solamente llega a esta ligeramente caliente de las 12 a las 21 horas.

En el mes de junio, el periodo en el que se puede utilizar la ventilación natural en planta alta se ve reducido de las 4 a las 7 horas. Las condiciones de confort incrementan a condiciones en el rango de caliente y muy caliente de las 11 a las 23 horas. Sin embargo la planta alta presenta condiciones confortables hasta las 8 horas con valores máximos en el rango de caliente de las 13 a las 21 horas.

Los meses en que la estrategia de ventilación natural no puede ser aprovechable son julio, agosto y septiembre ya que se tienen condiciones de entre ligeramente caliente y muy caliente.

Es a partir del mes octubre cuando la ventilación natural puede ser nuevamente utilizada en planta alta, sobre todo hasta las 10 horas y de las 22 a 24 horas. El espacio se pone ligeramente caliente a partir de las 11 a las 15 horas y de las 18 a 21 horas. El periodo crítico para este mes es de las 16 a las 17 horas ya que el espacio se mantiene caliente. Cabe destacar que este mes presenta similitud respecto a mayo. En planta baja las condiciones del espacio son ligeramente mejores ya que se mantiene a un rango máximo de ligeramente caliente.

Los meses en que el espacio se ve afectado por las bajas temperaturas son enero, febrero y diciembre; lo que hace que la planta alta supere el rango de muy frío entre las 2 y 9 horas. Mientras que el resto del día el espacio se mantiene entre ligeramente y frío. En planta baja las condiciones del espacio son mejores ya que se mantienen en el rango de ligeramente frío y frío.

La *evaluación térmica* de la vivienda es muy importante ya que en la actualidad el campo de la construcción es muy extenso y variado en la disponibilidad de materiales de construcción, sin embargo es necesario realizar una adecuada selección de los mismos. Esto debido a que la vivienda de Mexicali B.C.

demanda una gran cantidad de energía eléctrica para el acondicionamiento de los espacios, lo que representa un mayor costo operativo.

Ante esta situación, es necesario amortiguar las ganancias térmicas por la envolvente, aplicando estrategias bioclimáticas que disminuyan la demanda energética, en conjunto con una adecuada selección de materiales de construcción.

Para el estudio de impacto térmico de las estrategias implementadas en la vivienda energéticamente sustentable se utilizó como herramienta de evaluación TRNSYS 16. Se consideró como caso base una vivienda de bloque, con techo de vigueta y bovedilla sin ninguna estrategia de adecuación ambiental.

A partir del caso base se fueron implementando estrategias y se evaluó la reducción en carga térmica. En la figura 3.11 se muestra el comportamiento de la vivienda con cada una de las estrategias evaluadas.

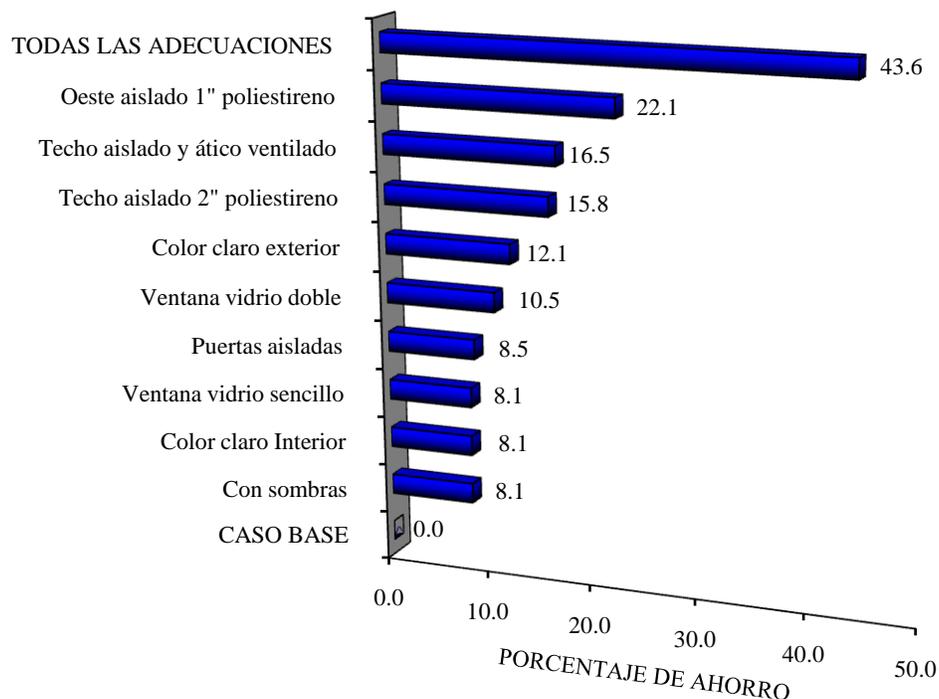


Figura 3.11: Energía a retirar según estrategia, vivienda energéticamente sustentable

A partir de la figura 3.11 se puede observar que la estrategia que reduce en mayor proporción el flujo de calor es el aislamiento de muros oeste con 1" poliestireno y representan un ahorro del 22.1% respecto al caso base. Por otro lado las estrategias que representa un menor ahorro de energía es el uso de sombras y puertas aisladas y ventanas con vidrio sencillo con solamente un 8.1%. Cabe destacar que para que el edificio opere en forma eficiente es necesario se implementen un conjunto de estrategias que para el caso analizado representa un ahorro total del 43.6%.

La capacidad instalada para retirar la energía del caso base representa un equipo de 6.09 toneladas de refrigeración (21.4 kW). Cuando se aíslan los muros oeste la capacidad de la unidad disminuye a 4.74 (16.7kW) toneladas y cuando se implementa el conjunto de estrategia, estas representan 3.43 de refrigeración (12 kW) instaladas.

El efecto de la implementación de estrategias en el confort térmico del espacio se evaluó a partir de ISO-7730(2005) a través del simulador TRNSYS, en la figura 3.12 se muestra el comportamiento de PMV (Predicción del Voto Promedio) a las 15 horas del día 27 de agosto con el sistema de enfriamiento activo, bajo temperaturas ambientales exteriores máximas de 45°C. Se puede observar que el uso de estrategias tiene beneficios directos en la sensación térmica de los usuarios ya que la planta alta esta muy cercano al límite de confortablemente caliente (+1), sin embargo los espacios mayormente utilizados por las horas diurnas son los de la planta baja lo cuales propician una sensación térmica cercana al rango de confort óptimo de ± 0.5 . Esto debido a que la planta baja sirve como colchón térmico, lo que reduce la temperatura de las superficies interiores y tiene un menor índice de emisividad de la superficie que mantiene al usuario en condiciones de mayor confort.

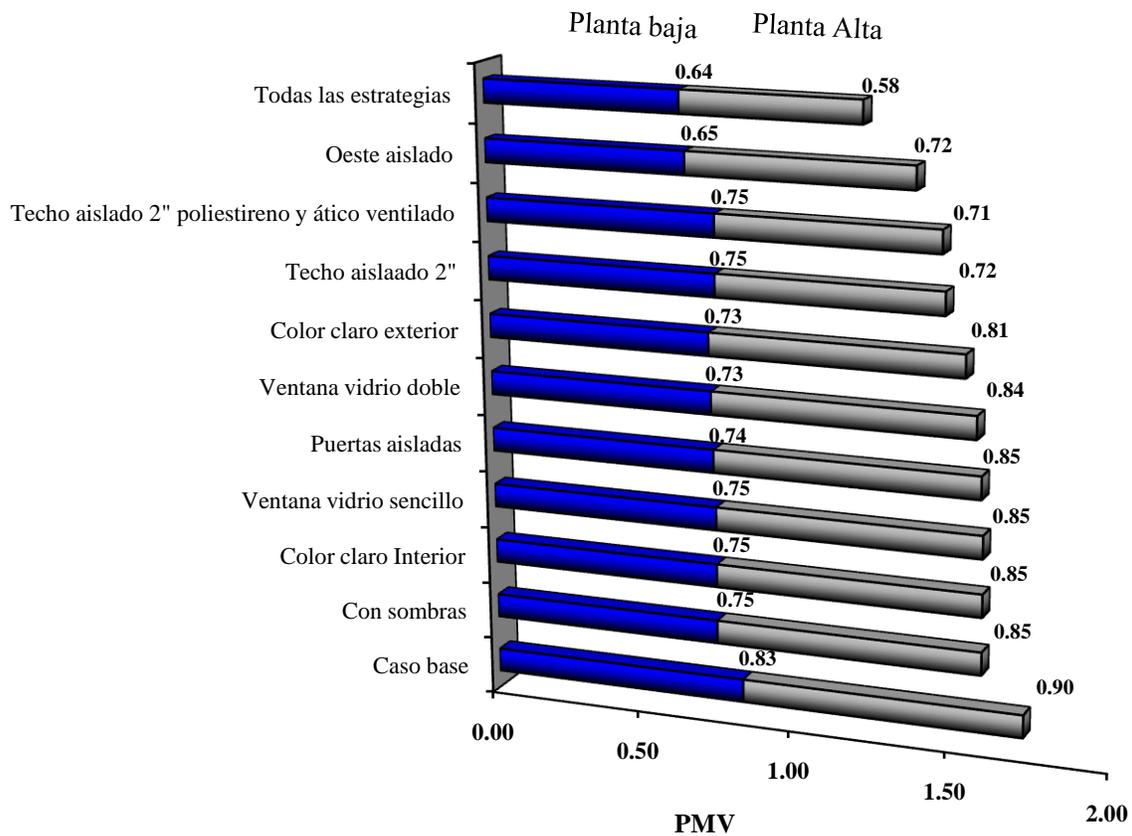


Figura 3.12: Sensación de confort (PMV) según estrategia implementada

3.3 Acoplamiento de tecnologías energéticas sustentables a la edificación

El acoplamiento de las tecnologías energéticamente sustentables tales como el sistema de enfriamiento por absorción, el sistema de calentamiento por piso radiante y el agua para uso doméstico, se integra a la vivienda de tal manera que no generen un impacto estético en la forma del edificio. En la figura 3.13, se puede observar que los techos de las viviendas fueron propuestos de acuerdo a la inclinación de mayor captación de energía solar en el periodo cálido (ver figura 2.7), esto debido a que la mayor demanda de energía para el sistema integral se da en el periodo cálido para proveer enfriamiento de la vivienda.



Figura 3.13: Módulos de viviendas

En la figura 3-14, se muestra el sistema integral de climatización propuesto para la vivienda energéticamente sustentable. Se puede observar el sistema de conexión del sistema de colectores con el tanque de almacenamiento, así como la conexión del tanque a la alimentación de energía térmica para el sistema de enfriamiento por absorción y el sistema de calentamiento por piso radiante.

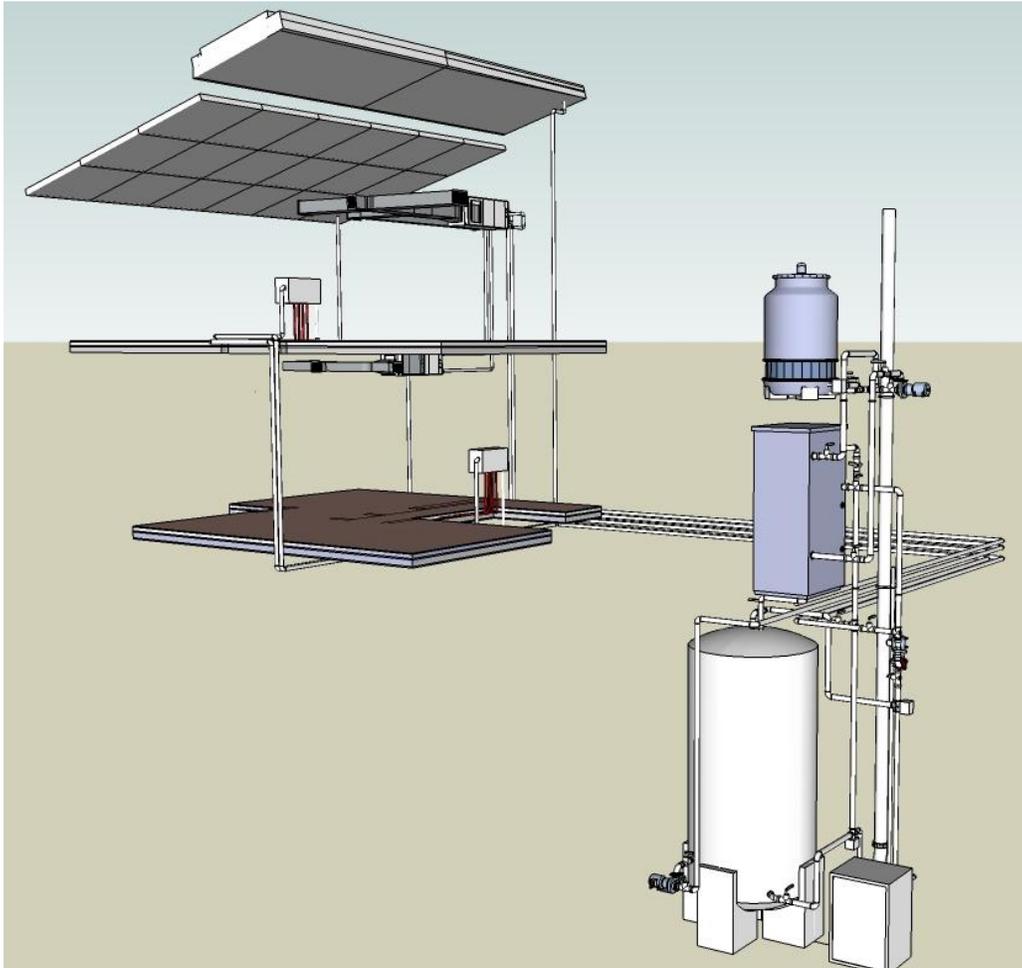


Figura 3.14: Esquema de conexión de sistema integral

En la figura 3.13 se puede observar que se plantea un sembrado de vivienda en módulos de cuatro viviendas acondicionados a partir de un solo sistema integral, el cual se encuentra en el patio central de las cuatro viviendas. El comportamiento operativo de dicho sistema se analiza a detalle en el capítulo 5.

Cabe destacar que se realizó el diseño de la vivienda con fachada principal al norte, considerando las bases del diseño ambiental para su solución. En la figura 3.15, se muestra el prototipo con fachada sur y en la figura 3.16, el prototipo con fachada norte.



Figura 3.15: Sembrado de vivienda con fachada sur



Figura 3.16: Sembrado de vivienda con fachada norte

CAPITULO 4. ESTUDIO DE SISTEMAS TÉRMICOS DE LA EDIFICACIÓN

En este capítulo se describe el método de dimensionamiento y comportamiento operativo de los diferentes sistemas térmicos propuestos para la vivienda energéticamente sustentable en la ciudad de Mexicali, entre los que se encuentran: sistema de enfriamiento por absorción, sistema de calentamiento por piso radiante y sistema de calentamiento de agua para uso doméstico. En el caso del sistema de enfriamiento por absorción se realiza un estudio comparativo de sistemas operados a la mayor fracción solar, híbrido (energía solar y gas natural) y operado 100% a gas natural. El análisis se realiza a nivel horario y promedio horario diario (en adelante, promedio diario).

4.1 Sistema de enfriamiento por absorción.

Los sistemas de enfriamiento por absorción cuentan con un mercado prometedor, (Tsoutsos *et al.*, 2003) ya que existen una serie de fabricantes como ARKLA, ROBUR, YAZAKY, THERMAX, entre otros, que están produciendo unidades con capacidades adecuadas para el uso en el sector residencial. Actualmente se pueden encontrar unidades desde 5 toneladas de refrigeración (17.58 kW), algunas de las cuales pueden ser operadas a partir de gas natural o bien a partir de energía limpia proveniente de un campo de colectores (Joudi *et al.*, 2001) o de biogás.

A continuación se describe el análisis comparativo de tres alternativas de operación del sistema de enfriamiento por absorción: a) 100% solar, b) 100% Gas natural y c) Híbrido a gas natural y solar. Las propuestas permiten evaluar el comportamiento de diferentes áreas de colección solar y tamaños de termotanque; al mismo tiempo de estimar el efecto en la fracción solar y operación de la unidad.

4.1.1 Funcionamiento de sistema de enfriamiento por absorción

En la figura 4.1, se muestra el esquema del sistema de enfriamiento solar e híbrido, compuesto por 6 subsistemas: 1) Edificación, 2) Captación solar, almacenamiento térmico y suministro de agua caliente, 3), Agua de enfriamiento, 4) Sistema de enfriamiento, 5) Agua fría y 6) Aire frío.

La unidad utilizada es un equipo YAZAKY de 35.2 kW (1.2×10^5 kJ/h), modelo WFC-SC10 que emplea la solución de LiBr-H₂O como fluido de trabajo y opera a través de un fluido caliente entre 75 y 105°C (agua-etilenglicol). El fluido caliente produce la ebullición de la solución de LiBr-H₂O y posteriormente conduce el vapor de agua generado (refrigerante de enfriamiento) hacia el condensador. En el condensador, el vapor es enfriado y condensado por el agua de la torre con temperatura de entre 24 y 31°C. La torre extrae el calor tanto del condensador como del absorbedor. El refrigerante condensado, es dirigido en forma líquida al evaporador a través de una válvula de expansión que mantiene la baja presión en la sección del evaporador y absorbedor, lo que provoca que el agua evapore a baja temperatura.

Por otro lado, la corriente de agua a enfriar ingresa al evaporador a 13°C, lo que representa suficiente gradiente de temperatura para evaporar el refrigerante procedente del condensador; a la vez que se provoca el enfriamiento de la corriente de agua que pasa por el evaporador. De forma simultánea, la solución en el absorbedor procedente del generador atrapa el vapor de agua y se obtiene una solución diluida de LiBr-H₂O que es llevada por medio de una bomba al generador. Cuando la solución de LiBr-

H₂O es llevada por la bomba hacia el generador, pasa a través de un intercambiador de calor que tiene la función de enfriar la solución procedente del generador y calentar la solución que va hacia el generador, con lo que se obtiene integración energética interna. Finalmente, la solución diluida llega al generador para iniciar de nuevo el ciclo.

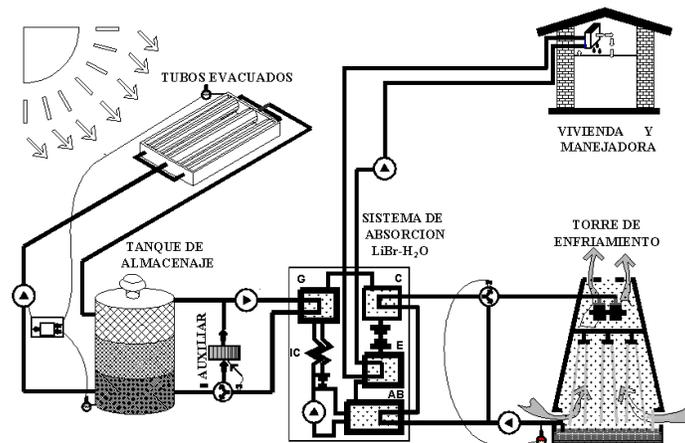
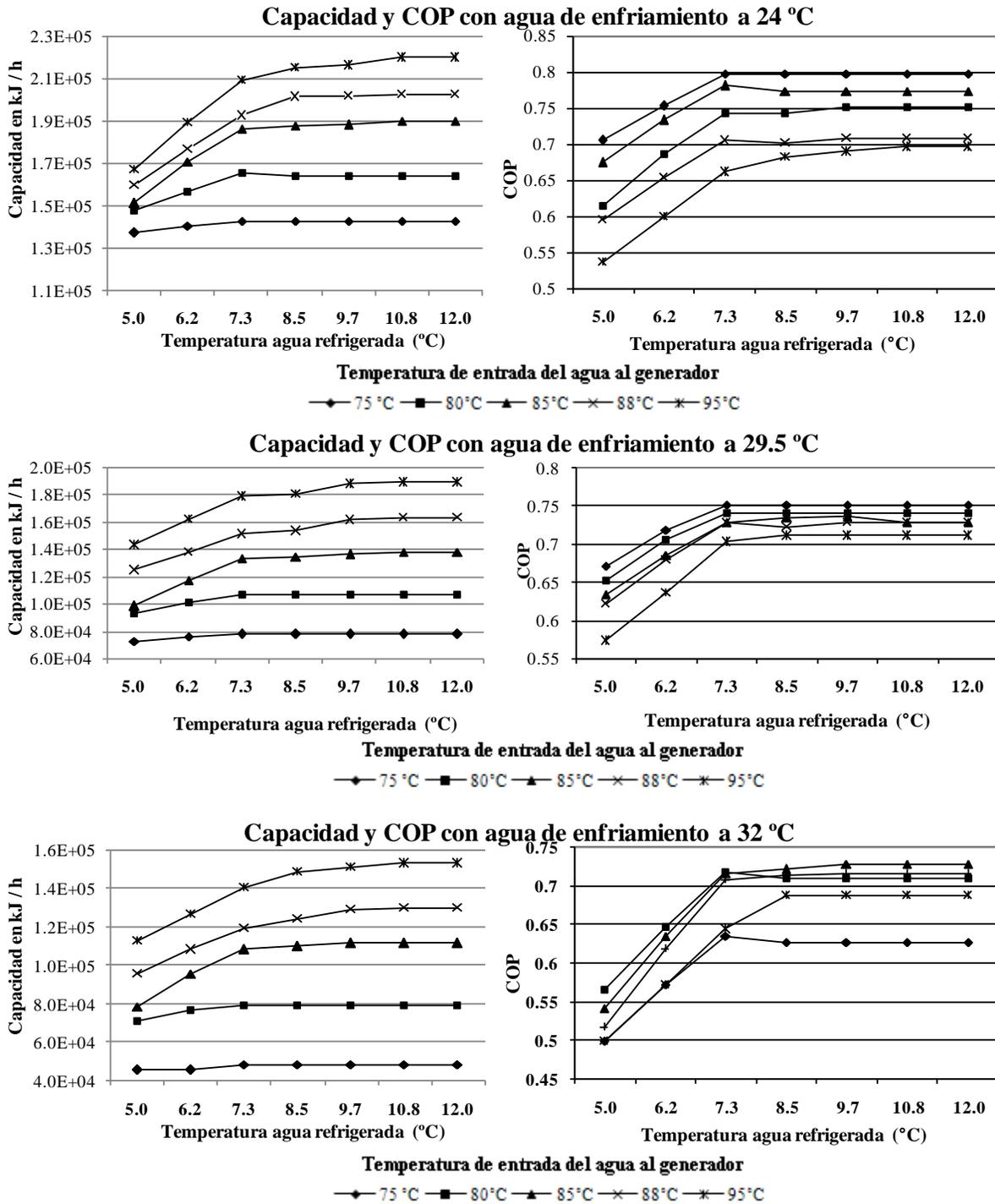


Figura 4.1: Sistema de enfriamiento solar

El sistema de enfriamiento propuesto requiere para una óptima operación, un fluido caloportador de entre 75 y 95°C con temperaturas máximas de 105°C, además de que la torre de enfriamiento debe enviar al sistema agua con temperaturas de entre 24 y 32°C. La unidad puede ser operada con temperaturas de salida del agua fría de entre 5 y 12°C (ABSORSISTEM, 2003).

En la figura 4.2, se puede observar que la capacidad de enfriamiento y el COP de la unidad están en función de las temperaturas del agua de enfriamiento, agua caliente y agua fría. A partir de la figura se puede deducir por ejemplo, que cuando la unidad opera a partir de agua caliente a 95°C y agua de enfriamiento a 24°C y la demanda de agua fría es de 7°C; la unidad tiene una capacidad de enfriamiento de 206,000 kJ/h (57.2 kW) a un COP de 0.64, capacidad de enfriamiento superior a la capacidad nominal de 126,720 kJ/h (35.2 kW). Sin embargo bajo las mismas condiciones antes planteadas, pero con una calidad de energía de entrada al generador de 75°C (mínimo permitido para operación de la unidad), la capacidad frigorífica disminuye drásticamente a 142,000 kJ/h (39.4 kW). Si la unidad opera en condiciones críticas a partir de agua de enfriamiento a 32°C (límite superior permitido por el sistema de absorción) y agua caliente a 75°C, la capacidad de enfriamiento disminuye a 41,500 kJ/h (11.53 kW), con un COP de 0.62. Por lo tanto es indispensable que la unidad reciba agua caliente y agua de enfriamiento con buena calidad, para producir agua fría a 7°C.

Cuando el sistema opera con altas temperaturas de entrada al generador (95°C) y alta temperatura de agua de enfriamiento (32°C), se tiene un decremento en la capacidad de enfriamiento 136,666 kJ/h (37.9 kW) y el sistema se ve afectado obteniendo un COP de 0.63. Estudios realizados por Joudi K. (2001) y DeVega. M. (2006), muestran que las altas temperaturas de entrada al generador provocan un mayor cantidad de evaporación del refrigerante, lo que lleva a un incremento de la temperatura y presión del condensador, por lo que es necesario retirar una mayor cantidad de calor a través del agua de enfriamiento.



Fuente: Elaboración propia a partir de curvas de ABSORSISTEM (2003)

Figura 4.2: Capacidad y COP en función de agua caliente, de enfriamiento y fría.

4.1.2 Método de simulación de sistema solar, híbrido y operado a gas natural

Para dimensionar y conocer el comportamiento operativo del sistema de enfriamiento solar, se elaboró una estrategia de simulación utilizando TRNSYS 16. El simulador cuenta con una estructura modular que divide el sistema en una serie de componentes (“types”), que son interconectados entre si y compilados a través la interface TRNSYS Studio (Keilholz *et al.*, 2005). En la tabla 4.1, se muestran los componentes utilizados en la simulación.

Tabla 4.1: Componentes utilizados para simulación de sistema de absorción

COMPONENTE	No. Componente (Type)
Archivo meteorológico	109
Colector de tubos evacuados	538
Tanque almacenamiento térmico	4
Bomba de flujo variable	110
Control de encendido / apagado	2
Divisor y mezclador de flujo	11
Torre de enfriamiento	51
Sistema de absorción	107
Bomba de flujo constante	3
Calentador auxiliar	6
Manejadora de aire	508
Sombras y partesoles	34
Propiedades del aire ambiente (carta psicométrica)	33
Temperatura efectiva del cielo	69
Edificio	56

Con la finalidad de simular el sistema de aire acondicionado solar bajo condiciones similares a la operación real, la alimentación de información de los equipos se realiza con datos técnicos proporcionados por los fabricantes de los mismos. Una vez seleccionados los equipos, se realiza la interconexión a través de TRNSYS STUDIO y se realizan simulaciones horarias, a partir de las que se hace un análisis detallado para ajustar algunos parámetros siguiendo el método mostrado en la figura 4.3, con la finalidad de verificar si el sistema propuesto cumple con las condicionantes siguientes:

- Temperatura de salida del agua caliente del tanque de almacenamiento térmico entre 75 y 105°C, si esta condición se cumple la Fr_Sol del sistema solar debe ser mayor al 0.95 buscando la operación al 100% solar; si las condicionantes anteriores no se cumplen, la energía faltante se suministra a través de un sistema de calentamiento auxiliar.
- Sistema híbrido con Fr_Sol mayor a 0.50 y existir área de techo suficiente en la vivienda, para colocar el sistema de colección solar. No obstante el indicador a considerar es el análisis de factibilidad económica, por medio del cual, se establece la Fr_Sol óptima.
- Temperatura de alimentación del agua de enfriamiento entre 24 y 31°C, rangos especificados por el fabricante para el adecuado funcionamiento de la unidad.
- Temperatura de salida de agua fría hacia las manejadoras de 7°C, para acondicionar la temperatura del aire de salida de la manejadora a 16°C y mantener el espacio entre 23 y 28°C.
- Condiciones de confort térmico del espacio según norma ISO-7730 (2005), con PMV (Predicción del voto promedio) entre ± 1 (-1 confortablemente caliente, 1 confortablemente frío).
- Capacidad de la máquina de enfriamiento solar, suficiente para cubrir los requerimientos de demanda de enfriamiento total de las dos viviendas.

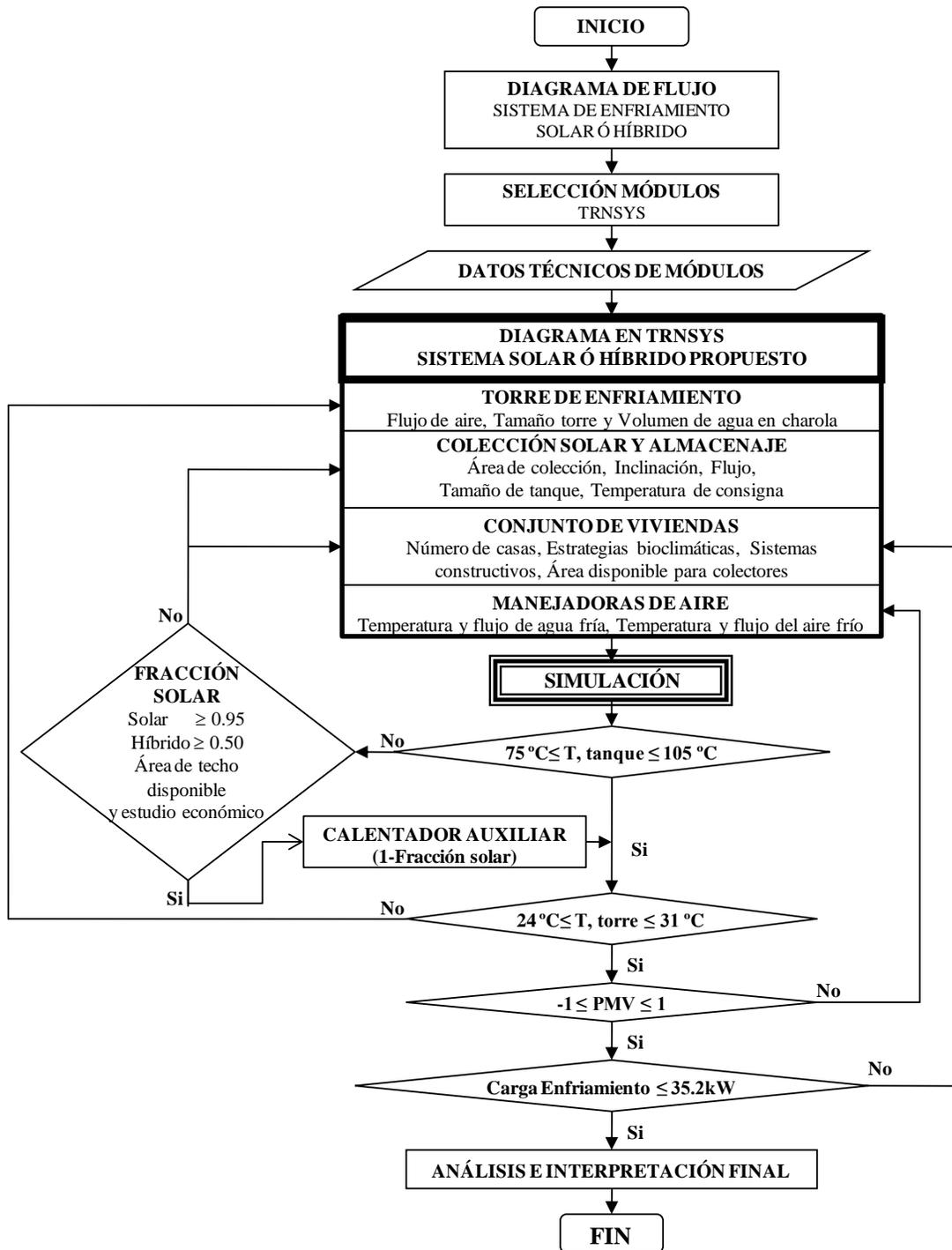


Figura 4.3: Diagrama de flujo para dimensionamiento de sistema solar e híbrido

Para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento asistido por combustible fósil a partir de gas natural, se procedió a partir del método en la figura 4.4. En éste caso no se contará con el arreglo de colectores y tanque de almacenamiento, por lo que la temperatura de consigna de la caldera debe enviar agua caliente al generador con una calidad de energía de entre 78 y 82°C según especificaciones del fabricante, para garantizar un óptimo funcionamiento. Para conocer la mejor opción de temperatura de consigna, se procedió a una serie de simulaciones en TRNSYS para seleccionar la mejor opción, coincidiendo con el valor promedio de 80°C.

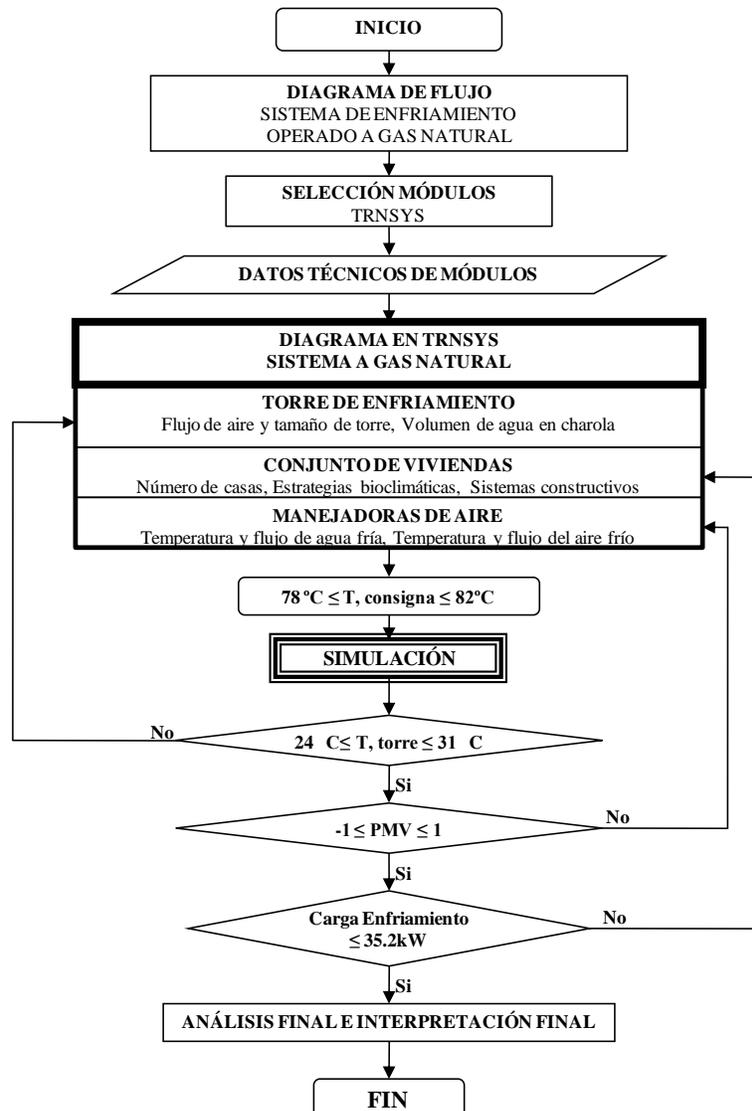


Figura 4.4: Diagrama de flujo para dimensionamiento de sistema a gas natural

4.1.3 Área de captación, tamaño de tanque y agua caliente a generador.

El agua caloportadora es la encargada del suministro de energía para la correcta operación del generador del ciclo de absorción, deberá estar entre 75 y 105°C; de tal manera que se garantice un coeficiente de operación (COP) mayor a 0.5 y se produzca una adecuada ebullición de la solución diluida. Para tal efecto, se propone un sistema auxiliar a gas natural Marca Raypak (Rheen, 2007), con una capacidad máxima de 2.5×10^5 kJ/h con una eficiencia de 0.87.

Con la finalidad de obtener la forma de operación del sistema solar e híbrido a una adecuada fracción solar (Fr_{SOL}), se realiza una serie de simulaciones exploratorias, fijando el sistema de colección solar y almacenamiento térmico, a partir del que se realiza un barrido a diferentes temperaturas de consigna de entre 75 y 100°C. Se puede observar en la figura 4.5., que la temperatura óptima de entrada al generador es 80 °C, ya que es el punto en el que se obtiene la máxima Fr_{SOL} y se requiere de un mínimo de Calor auxiliar (Q_{aux}) para cubrir la demanda de energía del sistema.

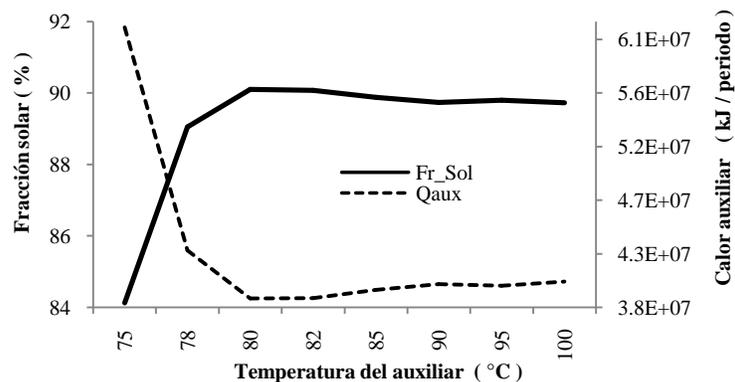


Figura 4.5: Optimización de temperatura de calentador auxiliar

Si se disminuye la temperatura de operación del calentador auxiliar al mínimo (75°C), es necesario un 59% más de Q_{aux} respecto al requerido con operación óptima de 80°C. También se observa que al incrementar el punto de consigna a 100°C, se requiere del 4% más de Q_{aux} . Cabe señalar que cuando la temperatura de operación se maneja en 82°C, no existe diferencia significativa en la Fr_{SOL} , ni en la demanda de Q_{aux} .

Una vez establecida la temperatura de consigna, se procedió a la búsqueda de la mejor alternativa de colección solar y almacenamiento térmico del sistema integral de climatización y agua caliente para uso doméstico de la vivienda energéticamente sustentable; por lo que se realizó el estudio con diferentes áreas de colección a partir de un campo de colectores de tubos evacuados con eficiencia al origen de 0.87.

Así pues en la figura 4.6, se muestra que cuando se disminuye el área de colección, se incrementa la demanda de Q_{aux} por lo que, se debe buscar un compromiso entre estos dos parámetros. Así mismo se observa que la zona de optimización entre el Q_{aux} y Fr_{SOL} se da con un área de colección solar de 150m² de colectores, obteniendo una Fr_{SOL} de 0.67.

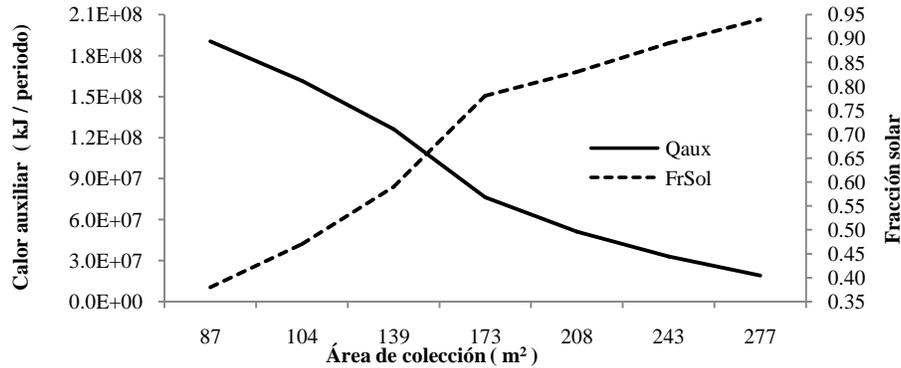


Figura 4.6: Optimización de colección solar

Por otra parte, es importante considerar que si el sistema opera en forma continua durante todo el periodo de demanda de enfriamiento a la mayor F_{r_Sol} , se requiere de un gran sistema de captación solar que en ocasiones, no es posible contar con superficie de techo suficiente para la colocación de colectores, así mismo es necesario realizar un estudio de factibilidad económica para determinar el área de colección y tamaño de tanque adecuado.

Al analizar el sistema que opera a la mayor F_{r_Sol} de 0.95, para la unidad de 1.2×10^5 kJ/h (35.2 kW) se puede observar en la figura 4.7 que es necesario un tanque de almacenamiento térmico de 18 m^3 , con un área de colección de 277 m^2 (arreglo de 16 series en paralelo y 6 colectores en serie). Aún así, es necesaria la operación del sistema auxiliar para suministrar energía en algunos pequeños periodos en que el sistema de colección solar suministra agua caliente con temperaturas inferiores a los 80°C , lo que representa demanda de energía del auxiliar de 5 días durante el periodo cálido.

De los resultados obtenidos, se puede establecer que para el sistema de enfriamiento híbrido el tamaño óptimo de tanque es de 9 m^3 con un área de colección de 156 m^2 (un arreglo de 9 series de colectores en paralelo con 6 en serie), que representan 32 días de operación del sistema auxiliar, a una F_{r_Sol} de 0.67 como se puede observar en la figura 4.7.

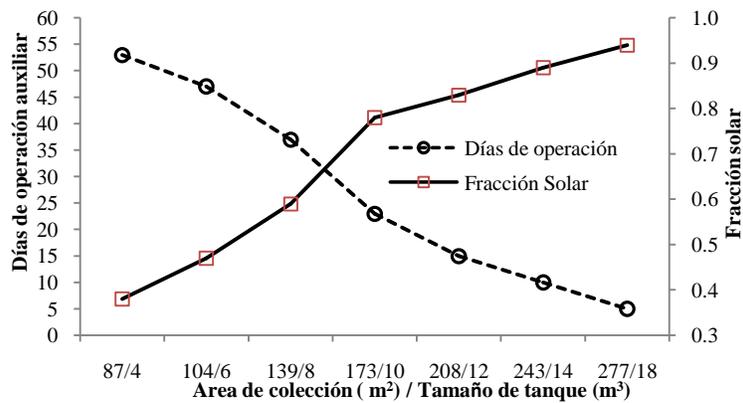


Figura 4.7: Optimización de área de colección y tamaño de tanque

Cabe mencionar que cuando se utiliza un tanque de menor dimensión operado en forma solar, la temperatura del fluido caloportador puede ser menor a los requerimientos del sistema de absorción durante las horas nocturnas, lo cual, ha sido estudiado por (Florides *et al.*, 2002) y encontraron que con tamaños de tanque pequeño no se puede mantener la temperatura del agua al generador en la temperatura de consigna sin el uso de un sistema auxiliar. Por lo tanto, es necesario utilizar un sistema híbrido con sistema de calentamiento auxiliar para dar servicio durante este periodo de tiempo. Además de que un tanque de almacenamiento de grandes dimensiones genera problemas para colocación dentro del terreno de la vivienda.

4.1.4 Sistema de enfriamiento con energía solar.

A continuación se describe el comportamiento operativo del sistema de absorción al 95% de fracción solar, el estudio considera: el comportamiento del sistema de captación solar y almacenaje, comportamiento energético del sistema de absorción, las condiciones del espacio. Los resultados se analizan de forma horaria para: 1) un día de operación normal (día en que la demanda de enfriamiento es el comportamiento representativo para el periodo cálido), 2) un día crítico (mayor demanda de enfriamiento), además de 3) datos promedio diarios del periodo cálido. Lo anterior se realiza para tres escenarios que son: a) sistema de enfriamiento con energía solar, b) sistema de enfriamiento híbrido (solar/gas natural) c) sistema de enfriamiento a gas natural. En este caso se describe el comportamiento operativo del primer sistema y en los dos apartados subsecuentes se describen los sistemas restantes.

El **funcionamiento del sistema solar para un día normal** se considero para el día 18 de agosto, el cual tiene un comportamiento climático como el que se muestra en la figura 4.8. Se puede observar que las temperaturas ambientales (T_{amb}) oscilan entre los 27 y 40°C, con temperatura mínima a las 6 horas y máxima a las 17 horas. Las condiciones de humedad relativa ambiente (HR_{amb}) son bajas a lo largo del día, obteniéndose un máximo de 52% a las 7 horas y un mínimo de 21% a las 14 horas. La disponibilidad de energía solar en el plano horizontal ($R_{ad,Hor}$) corresponde a un día claro con un máximo de radiación solar a las 12 horas de 928 W/m^2 (3,341 kJ/h).

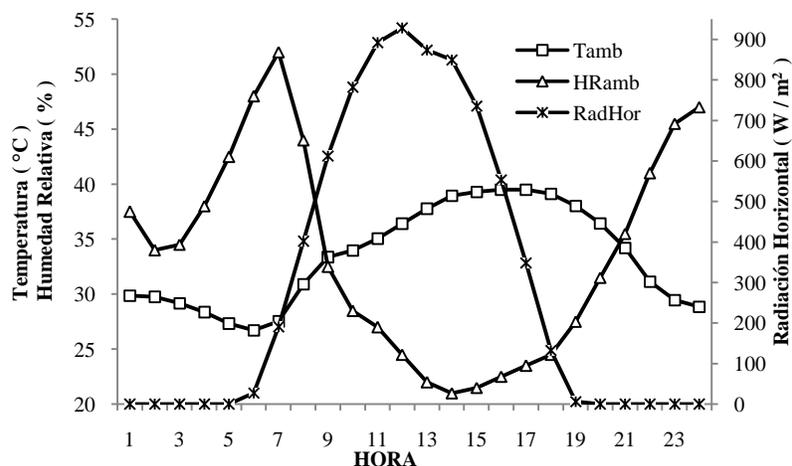


Figura 4.8: Clima en día normal

Para que el sistema de enfriamiento por absorción tenga una correcta operación, el *fluido caloportador* de entrada al generador debe estar entre 75 y 105°C; de tal manera que se garantice un coeficiente de operación (COP) mayor a 0.5 y se produzca una adecuada separación del refrigerante de la solución diluida LiBr-H₂O. Para tal efecto, se propone un sistema auxiliar a gas natural con una capacidad máxima de 2.5×10^5 kJ/hr. El sistema de colección y almacenamiento térmico consta de 277 m² de colectores de tubos evacuados en un arreglo de 6 líneas en paralelo con 6 colectores en serie cada una y un tanque de almacenamiento térmico de 16m³. El sistema está apoyado por una caldera a gas natural con una capacidad máxima de 2.5×10^5 kJ/hr, para mantener una temperatura de salida del líquido caloportador a 80°C.

El sistema de colección solar en un día normal de operación, presenta un excelente desempeño como se puede observar en la figura 4.9. Durante este día se cuenta con disponibilidad de recurso solar de las 6 a 18 horas y se obtiene Q_{util} de 9 a 16 horas. Sin embargo de 13 a 16 horas el sistema de colección opera en forma intermitente, debido a que la temperatura de operación del sistema de colección está limitada a 105°C para protección del sistema de absorción y la temperatura de salida del sistema de colección (T_{s_Col}) supera ésta condición. Con lo que se genera una pérdida de captación de Q_{util} , durante estas horas.

Por otra parte, se puede apreciar que el sistema de colección solar es suficiente para mantener la T_{s_Col} con una calidad de energía arriba de los 80°C, durante la mayor parte del día, no obstante el sistema interrumpe el flujo hacia los colectores (F_{col}) a las 13 y 15 horas, debido a que se obtienen temperaturas superiores a la temperatura de consigna de los colectores (105°C). A pesar de esto el sistema garantiza una adecuada operación del sistema de absorción asistido con energía solar térmica ya que se dispone con temperaturas del fluido del tanque con valores por arriba de los 80°C.

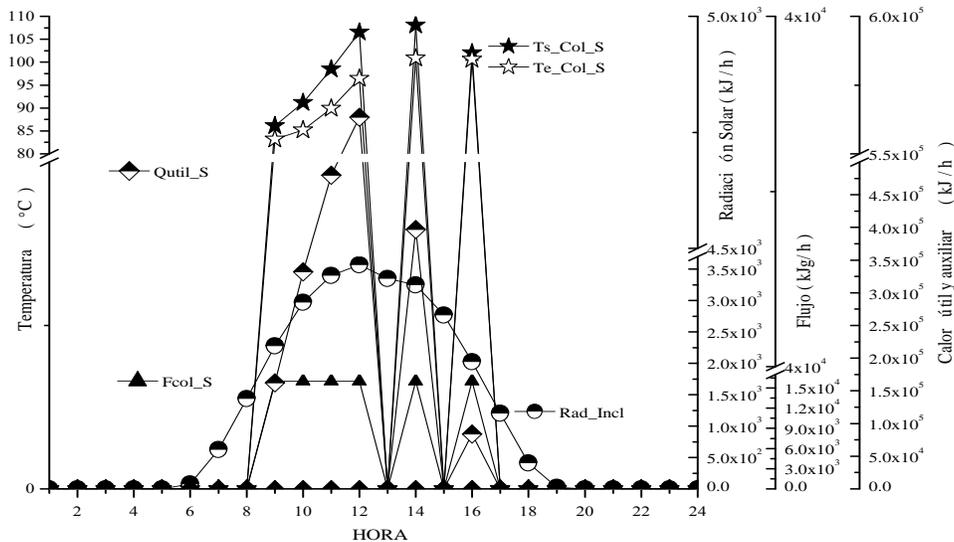


Figura 4.9: Subsistema de colección solar para sistema de enfriamiento, día normal

El comportamiento energético del sistema de absorción solar durante un día normal se muestra en la figura 4.10, además se presenta la calidad de energía de los diferentes fluidos de apoyo para la operación de la unidad tales como: líquido caloportador enviado al generador, agua de enfriamiento y temperatura del agua fría.

El fluido caloportador entregado al generador (T_{e_Gen}) cuenta con valores por arriba de los 80°C . El periodo en el que la unidad se acerca al mínimo permisible es entre 8 y 9 horas, debido al consumo de energía (Q_{r_AC}) por las horas sin disponibilidad de recurso solar y al bajo Q_{util} obtenido por el campo e colectores durante las primeras horas del día, ver figura 4.9.

Por otra parte, se puede apreciar que la demanda de energía del generador (Q_{r_AC}) es de cero entre las 2 y 7 horas, lo que indica, que el edificio no requiere operación de la unidad para mantener el espacio en confort, no obstante, la mayor demanda de energía al líquido caloportador durante éste día se da entre las 16 y 18 horas con 1.2×10^5 kJ/h.

A partir de lo anteriormente dicho se puede concluir que, con el sistema de colección y almacenamiento térmico propuesto, se puede propiciar energía térmica para operación continua durante las 24 horas del día durante los días de operación normal, por lo que no se requiere de energía auxiliar para operación del sistema de absorción durante la mayor parte del periodo de demanda de enfriamiento.

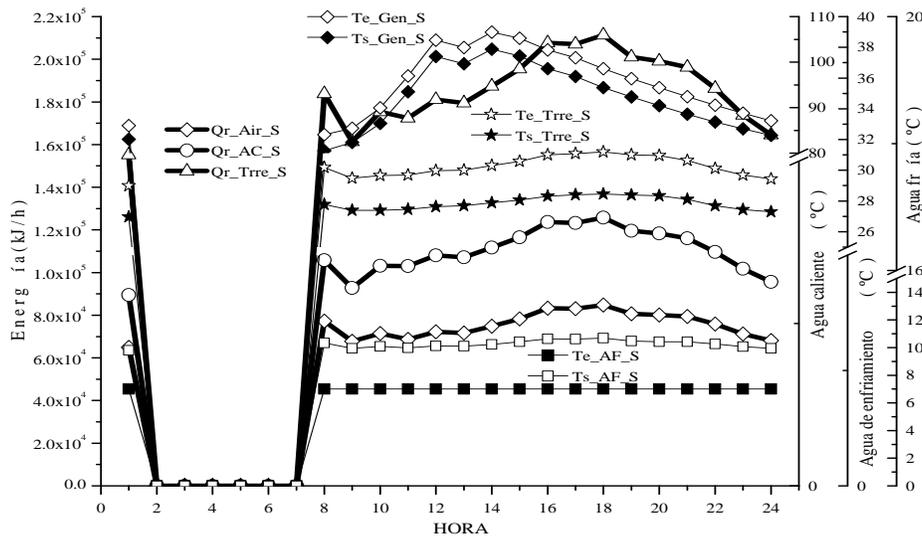


Figura 4.10: Calidad de energía en sistema solar, día normal

La torre de enfriamiento es muy importante para el adecuado funcionamiento del sistema de enfriamiento por absorción de LiBr- H_2O , por lo que es de gran importancia un correcto dimensionamiento. La unidad de enfriamiento simulada demanda temperatura de salida de la torre (T_{s_Trre}) de enfriamiento entre 24 y 31°C para garantizar el funcionamiento de la unidad y evitar problemas de cristalización del LiBr. Para tal efecto, se considera una torre de enfriamiento de ciclo abierto con flujo de agua de $18,360$ kg/h para remover un máximo de energía de 3.1×10^5 kJ/h. El flujo de aire es variable, desde un máximo de $9,000$ m^3/h a un mínimo de $2,250$ m^3/h .

Como era de esperarse, el máximo calor removido por la torre (Q_{r_Trre}) se da en las horas con mayor demanda de enfriamiento (16 a 18 horas), con una extracción de 2.1×10^5 kJ/h, a través de agua de enfriamiento de entrada (T_{e_Trre}) de 31.2°C que provee agua de enfriamiento a una temperatura de salida (T_{s_Trre}) de 28.5°C como se puede observar en la figura 4.10. El estudio de Wang *et. al.*, (2007) y Joudi

et. al., (2001), muestra que cuando la T_{s_TRe} entra con valores cercanos al límite de operación del sistema de absorción se ve afectada la producción de agua fría, ya que se genera un incremento de la concentración de la solución y disminuye la transferencia de calor del absorbedor y condensador; con lo que se provoca una disminución del potencial de absorción de la solución.

La temperatura del agua fría de entrada a las manejadoras de aire (T_{e_AF}), es la encargada de generar condiciones de confort en los espacios y debe entrar a 7°C , con temperatura de retorno máxima al sistema de absorción (T_{s_AF}) de 12.5°C , después de retirar la energía del aire (Q_{r_Air}) que proviene del conjunto de viviendas. En la figura 4.10, se muestra que el sistema envía agua fría a 7°C durante las horas de operación del sistema de absorción (Hora 1 y de las 8 a 24 horas). Mientras que de las 2 a las 7 horas, el sistema de absorción deja de operar, debido a que el sistema de absorción no necesita retirar energía del espacio (Q_{r_Air}).

Además se observa que T_{s_AF} al retirar el calor del espacio, trabaja por debajo del límite especificado (12.5°C). La máxima temperatura de la T_{s_AF} de las manejadoras es de 10.6°C y se da en las horas con mayor demanda de enfriamiento (16 a 18 horas), con una extracción de 8.4×10^4 kJ/h a las 18 horas.

Para analizar las *condiciones del espacio* a climatizar se tomaron como referencia el comportamiento del aire frío de salida de las manejadoras y la sensación térmica percibida por el usuario, bajo el método de PMV (Prediction Median Vote).

El aire frío de salida de las manejadoras (T_{s_Air}) es el encargado de enfriar y deshumidificar las viviendas para propiciar condiciones de confort de los usuarios. La manejadora de aire propuesta para la planta baja retira energía del aire a través de $1,237$ kg/h de agua fría y un volumen de aire de $1,658$ kg/h, a una capacidad nominal de enfriamiento de $18,992$ kJ/h (1.5 ton). La planta alta retira energía a través de $1,518$ kg/h de agua fría, con un volumen de aire de $2,487$ kg/h, a una capacidad nominal de enfriamiento de $44,313$ kJ/h (3.5 ton). La climatización del espacio se da a través de un aire frío a 16°C , para mantener la temperatura del espacio (T_{esp}) entre 23 y 28°C .

En la figura 4.11, se puede apreciar que la T_{s_Air} de las manejadoras se mantiene a 16°C , con lo que se obtienen T_{esp} a un promedio diario de entre 24 y 25°C durante las horas de operación, aun durante la hora en que la temperatura ambiente (T_{amb}) máxima es de 40°C . En el periodo de 2 a 7 horas, la T_{esp} se mantiene entre 26 y 28°C , esto debido a que el sistema deja de operar, ya que la demanda de enfriamiento no requiere de la operación del sistema de absorción y el ancho de banda de operación de la unidad a través del termostato se estableció entre 23 y 28°C .

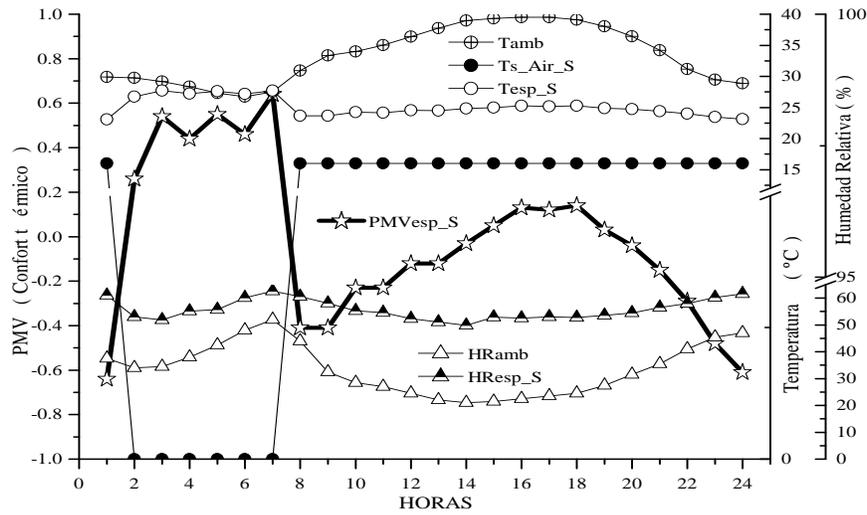


Figura 4.11: Confort térmico sistema solar, día normal

El confort térmico de un espacio (PMV_{esp}) puede determinarse a partir de la escala de confort térmico de la norma ISO:7730 (2005), el cual indica que un espacio se encuentra en condiciones de confort óptimo según los límites mostrados en la tabla 4.2, para usuarios que visten ropa ligera equivalente a 0.6 clo, con actividad metabólica ligera de 1.2 met.

Tabla 4.2: Escala de confort ISO:7730(2005)

-3	Extremadamente frío
-2	Demasiado frío
-1	Confortablemente frío
0	Confortable
1	Confortablemente caliente
2	Demasiado caliente
3	Extremadamente caliente

En la figura 4.11, se observa que el PMV_{esp} propiciado por la T_{air} de las unidades manejadoras está entre ± 0.7 . Lo que representa una T_{esp} de entre 24 y 27°C con contenidos de humedad relativa del espacio (HR_{esp}) de entre 50 y 63%, mientras que la T_{amb} oscila entre 28 y 40°C con HR_{amb} de entre 21 y 52%.

El periodo con peores condiciones de PMV_{esp} se da entre las 3 y 7 horas, esto debido a que la unidad deja de operar ya que la T_{esp} y la T_{amb} , no tienen suficiente gradiente respecto a la máxima temperatura de consigna de 28°C, aunque las condiciones del espacio se mantienen dentro del rango de confortablemente caliente por las mañanas y confortablemente frío por las horas críticas. Cabe destacar que durante las horas con mayor demanda de enfriamiento ($Q_{r,Air}$) por parte del sistema se obtiene un mejor funcionamiento, ya que el PMV_{esp} oscila entre +0.10 y -0.30 lo que significa un estado de confort óptimo según la norma ISO 7730(2005), esto debido a que existe suficiente gradiente para que el sistema opere en forma continua.

La *eficiencia total del sistema* se analiza con base en el producto de eficiencia del campo de colectores y COP del ciclo de absorción al que se le conoce como COP_{solar} (Casals, 2006). Entre los factores que afectan al COP_{solar} están la temperatura del agua caliente enviada al generador (T_{e_Gen}), la temperatura del agua de enfriamiento (T_{s_Trr}) y la temperatura de consigna del agua fría, los cuales se ven afectados en forma directa por la temperatura y humedad relativa ambiente, además de la radiación solar disponible.

Cuando se equilibra la eficiencia de colección del subsistema de colectores con el COP del ciclo de absorción, se adquiere el máximo COP_{solar} . Esto significa un mayor aprovechamiento de la energía solar para producción de agua fría en el sistema de enfriamiento solar. En la figura 4.12, se puede observar que el máximo COP_{solar} del sistema simulado durante un día de operación normal es 0.38 a las 12 horas. Esto debido a que los colectores trabajan a una eficiencia máxima de 0.57 y el sistema de absorción a un COP cercano al límite nominal de la unidad (0.70).

El máximo COP de la unidad de absorción se da a las 8 y 9 horas, esto debido a que la calidad de energía del agua caloportadora (T_{e_Gen}) es de entre 80 y 85°C además de que la torre de enfriamiento entrega agua a 28°C (ver figura 4.10). Bajo estas condiciones la unidad opera a un COP de entre 0.72 y 0.74 como se puede observar en la figura 4.12 y con una capacidad de enfriamiento de entre 6.9×10^4 a 7.7×10^4 kJ/h (ver figura 4.10). La energía máxima a retirar de la vivienda (Q_{r_Air}) en este periodo es de 8.4×10^4 kJ/h, lo cual hace que la unidad opere en forma óptima.

Por otro lado en el periodo de alta demanda de enfriamiento el sistema trabaja con temperatura de entrada al generador (T_{e_Gen}) de 100°C con una T_{s_Trr} a 29°C y el sistema opera a un COP de 0.68 (ver figura 4.10), sin embargo el Q_{r_Air} de la unidad se incrementa a 1.7×10^5 kJ/h, como se muestra en la figura 4.10. Se puede observar que la máxima demanda de enfriamiento (Q_{r_Air}) es de 8.4×10^4 kJ/h valor muy inferior a la capacidad disponible del sistema de absorción. Por lo tanto el sistema solar aún cuando trabaja a un menor COP en las horas críticas nos permite una mayor capacidad de enfriamiento. Estudios realizados por Joudi K., (2001) demuestran que la reducción de COP de la unidad, se debe al incremento de la relación de flujo másico del absorbedor y flujo másico del refrigerante, ya que cuando esto sucede el sistema requiere una T_{e_Gen} más baja.

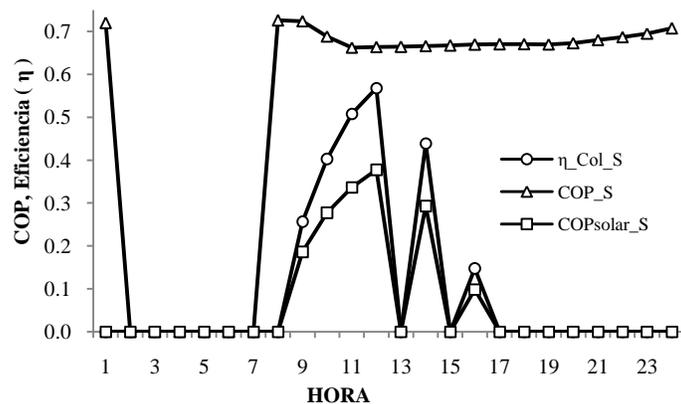


Figura 4.12: Eficiencia del sistema de enfriamiento solar, día normal

El funcionamiento del sistema solar para en el día crítico (13 de julio) trabajó con condiciones ambientales como las que se muestran en la figura 4.13. Se puede observar que en este día las temperaturas ambientales (T_{amb}) oscilan entre los 30 y 44°C, obteniendo temperatura mínima a las 7 horas y máxima a las 16 horas. Las condiciones de humedad relativa (HR_{amb}) son altas durante las primeras horas del día, con valor máximo de 71% a las 7 horas; sin embargo por las horas críticas la HR_{amb} es baja, con un valor mínimo de 25%. La disponibilidad de energía solar (R_{ad_Hor}) corresponde a un día claro con un máximo de radiación a las 12 horas de 861 W/m^2 (3,099 kJ/h).

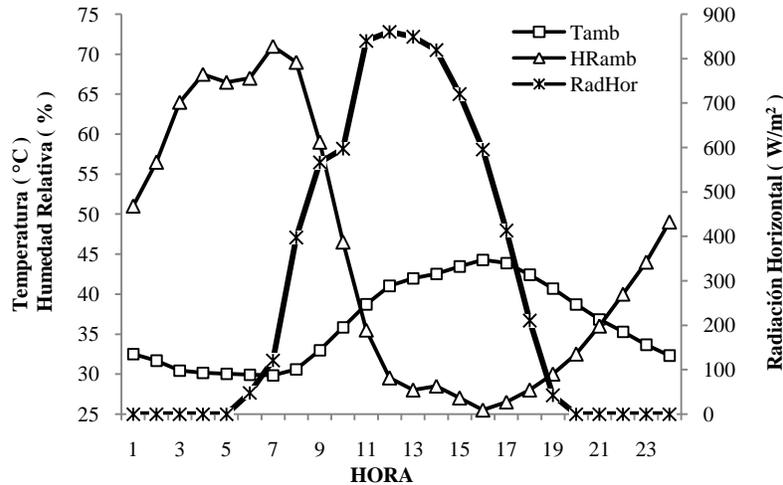


Figura 4.13: Clima en día crítico

La captación solar y almacenamiento durante el día crítico cuenta con disponibilidad del recurso solar (R_{ad_Hor}) de 6 a 19 horas, con un ligero decremento a las 10 horas. En la figura 4.14 se muestra que el sistema de colección solar obtiene Q_{util} a partir de las 8 horas y se interrumpe a las 9 horas, es decir no se aprovecha la energía solar, esto debido a a disminución de radiación solar; es a partir de las 10 horas cuando el sistema operar en forma continua hasta las 15 horas.

Ahora bien también se puede observar que en el periodo de las 16 a las 18 horas, aunque se cuenta con recurso solar, este no es suficiente para establecer una diferencial de temperatura entre la entrada y salida de los colectores; por lo que también es desaprovechado el Q_{util} .

El bajo aprovechamiento del sistema de colección solar en el periodo desde las 6 hasta las 9 horas hace que la temperatura de salida del sistema de colección entregue agua al tanque (T_{s_Col}) con valores por debajo del límite de 80°C, por lo que es necesario de Q_{aux} para obtener una adecuada calidad de energía para el sistema de absorción. Es hasta las 11 horas, cuando la temperatura de salida del agua de los colectores (T_{s_Col}) presenta valores superiores a los demandados por el sistema, manteniéndose así hasta las 15 horas.

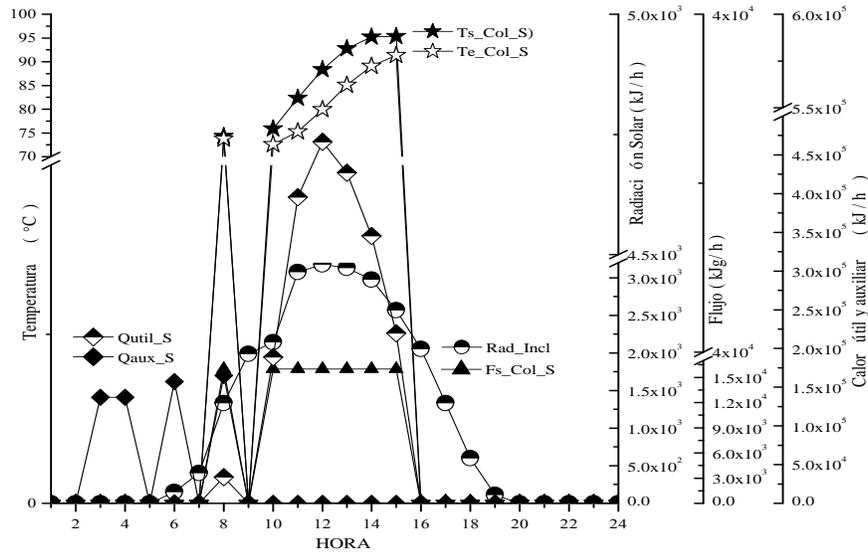


Figura 4.14: Subsistema de colección para sistema de enfriamiento solar, día crítico

El fluido caloportador entregado al generador (T_{e_Gen}) mantiene temperaturas por encima de los 80°C de las 11 a 21 horas, permitiendo una operación óptima del sistema de absorción, mientras que el resto del día, la T_{s_Gen} sufre un decremento como consecuencia de la alta demanda de enfriamiento, sin embargo el sistema sigue en operación continua ya que la T_{e_Gen} esta en el límite de 75°C .

De las 5 a 9 horas el sistema entra en operación intermitente debido a la baja demanda de enfriamiento del sistema de absorción (Q_{r_Air}). La máxima demanda de energía del agua caliente por parte del sistema se da a las 10 horas.

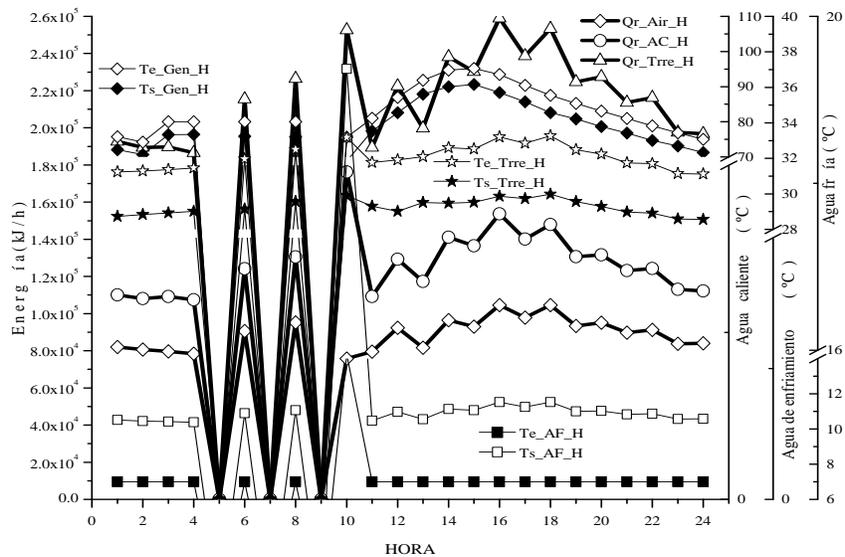


Figura 4.15: Suministro de energía al generador en sistema solar, día crítico

La torre de enfriamiento presenta una adecuada operación durante el día de máxima demanda de enfriamiento, ya que en la hora de mayor demanda se retira 2.5×10^5 kJ/h de energía a través de la torre de enfriamiento (Q_{r_Ttre}). La cual es extraída de un agua de retorno (T_{e_Ttre}) del sistema de absorción a 33.2°C y es enfriada (T_{s_Ttre}) a 30°C como se puede observar en la figura 4.15. Cabe destacar que durante este día la torre trabaja al límite de su capacidad ya que la temperatura enviada al sistema de absorción (T_{s_Ttre}) esta muy cercana del máximo permitido de 32°C .

El agua fría que produce el sistema de absorción envía agua a 7°C de la hora 1 a las 4 y de las 11 a las 24 horas. Sin embargo en el periodo de las 5 a las 10 horas el sistema realiza trabajo intermitente, esto debido a que la temperatura de consigna del espacio esta determinada entre 23 y 28°C y durante estas horas la T_{amb} es similar con un promedio de 30°C (ver figura 4.13).

El máximo calor extraído a través del agua fría (Q_{r_Air}) es de 1.0×10^5 kJ/h y se da a las 18 horas. Esto hace que la temperatura del agua fría (T_{s_AF}) se incremente a 11.5°C , temperatura muy cercana a la temperatura máxima de salida de la manejadora (16°C).

Para analizar las **condiciones del espacio** a climatizar se tomó como referencia el comportamiento del aire frío de salida de las manejadoras y la sensación térmica percibida por el usuario, bajo el método de PMV (Prediction Median Vote).

El aire frío de las manejadoras (T_{s_Air}) durante el día crítico mantiene una temperatura de salida de 16°C , con lo que se obtienen temperaturas del aire (T_{esp}) de las viviendas a un promedio diario de entre 24 y 27°C , durante todo el día de operación de la unidad de absorción.

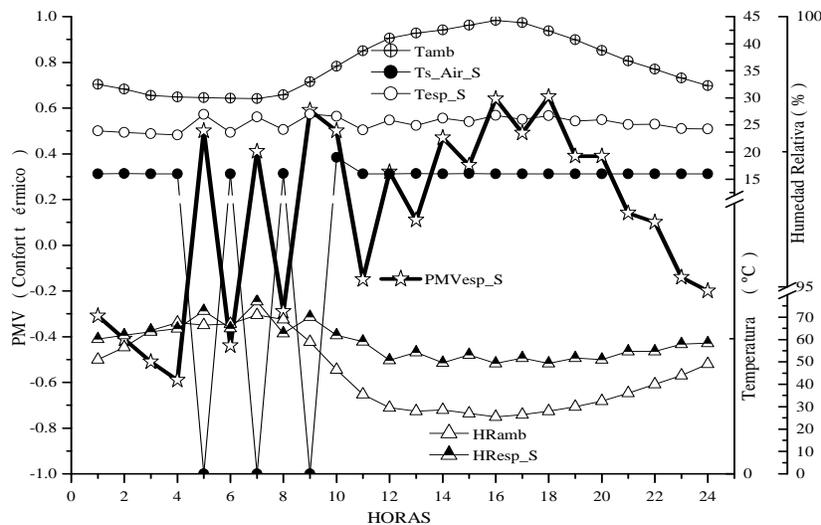


Figura 4.16: Confort térmico sistema solar, día crítico

El confort térmico del espacio (PMV_{esp}) durante el día crítico oscila con valores de entre ± 0.6 durante todo el día, manteniendo temperaturas del espacio (T_{esp}) de entre 24 y 27°C , con humedades relativas (HR_{esp}) de entre 50 y 75% . Esto considerando que la condiciones ambientales oscilan entre una T_{amb} de 30

a 44°C , con HR_{amb} de entre 25 y 71%. Esto indica que el día de mayor demanda de enfriamiento el sistema tiene un excelente comportamiento ya que se encuentra muy cercano al confort óptimo de ± 0.5 .

En el caso del la **eficiencia del subsistema de colección solar** se tiene un máximo (η_{Col}) de 0.53 a las 12 horas, esto debido a que el sistema tiene una gran demanda de energía del líquido caloportador ($T_{\text{e_Gen}}$), lo que hace que la temperatura del tanque disminuya y obtenga un mayor aprovechamiento de la energía solar con un mayor gradiente de temperatura.

El máximo COP de la unidad de absorción durante el día crítico se da entre la hora 1 y 2, esto debido a que la $T_{\text{s_Trr}}$ entra a 29°C y la $T_{\text{e_Gen}}$ a 75°C . Sin embargo, la unidad disminuye su capacidad de enfriamiento a $8.0 \times 10^4 \text{ kJ/h}$ (22.41 kW), como se puede observar en la figura 4.15

Por otro lado en el periodo de las 14 a las 16 horas el COP disminuye a 0.68 (ver figura 4.17) como consecuencia de la alta $T_{\text{e_Gen}}$ (95°C) y $T_{\text{s_Trr}}$ de 30°C como se puede observar en la figura 4.15. Esto es debido según estudios de Joudi K., (2001) y De La Vega *et al.*, (2006), al incremento de la relación de flujo másico del absorbedor y flujo másico del refrigerante, ya que cuando esto sucede el sistema requiere una $T_{\text{e_Gen}}$ más baja.

Bajo estas condiciones de operación la unidad presenta una capacidad de enfriamiento de $1.7 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ mientras que la máxima energía a retirar ($Q_{\text{r_Air}}$) es de $1.0 \times 10^5 \text{ kJ/h}$. Estudios realizados por Wang L. *et al.*, (2007), especifican que el efecto de T_{amb} superiores a los 43°C afecta al COP de la unidad debido a la alta presión que se obtiene en el generador.

En lo que respecta al acoplamiento de la unidad y la eficiencia de los colectores (η_{Col}), se puede observar que el $\text{COP}_{\text{solar}}$ es de entre 0.33 y 0.38 de 11 a 13 horas, valores similar al reportado por Casals *et al.*, (2006), para sistemas operados con energía solar.

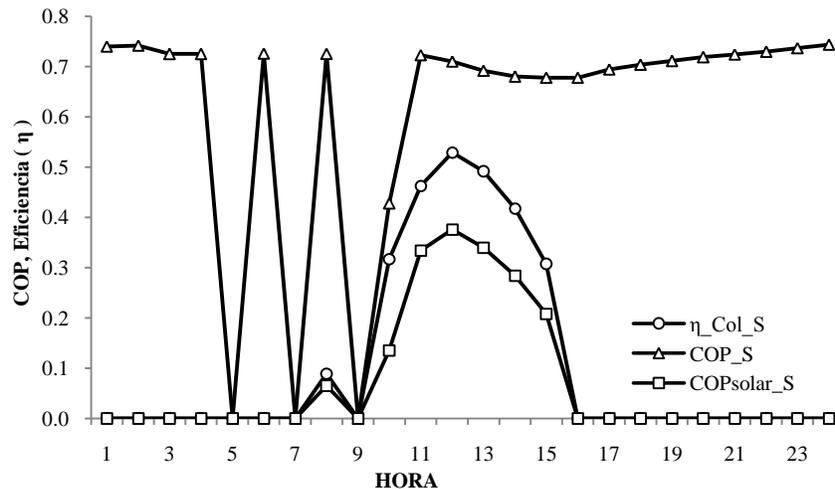


Figura 4.17: Eficiencia del sistema de enfriamiento solar, día crítico

El **sistema de enfriamiento solar durante en el periodo cálido** se analizó con base a los subsistemas de apoyo; con la finalidad de tener una visión general del comportamiento de la unidad durante la temporada de verano en términos de valores promedio horario diarios.

La captación solar y almacenamiento térmico del subsistema durante el periodo cálido muestra que durante julio y agosto, la alta demanda de energía del sistema de enfriamiento solar genera disminución de temperatura de entrada al arreglo de colectores (T_{e_Col}) (ver figura 4.18). Lo que provoca una mayor obtención de Q_{util} , sin embargo, es necesaria la aportación de un 5% de Q_{aux} , para operación óptima del sistema de enfriamiento.

Por otro lado, en el periodo de mayo a junio la temperatura del tanque de almacenamiento térmico opera dentro de los rangos especificados por el sistema (75 y 105°C), durante la mayor parte del periodo enviando el fluido caloportador (T_{s_Col}) a temperaturas mayores a 105°C en los primeros 15 días del mes de mayo. Esto debido a la baja demanda de enfriamiento en contraposición con la alta disponibilidad del recurso solar.

El mismo efecto de incremento de temperatura se repite en octubre, en el que se presenta el periodo con menor obtención de Q_{util} , ya que disminuye la radiación solar y la temperatura ambiente, lo que hace disminuir la demanda de enfriamiento en las edificaciones.

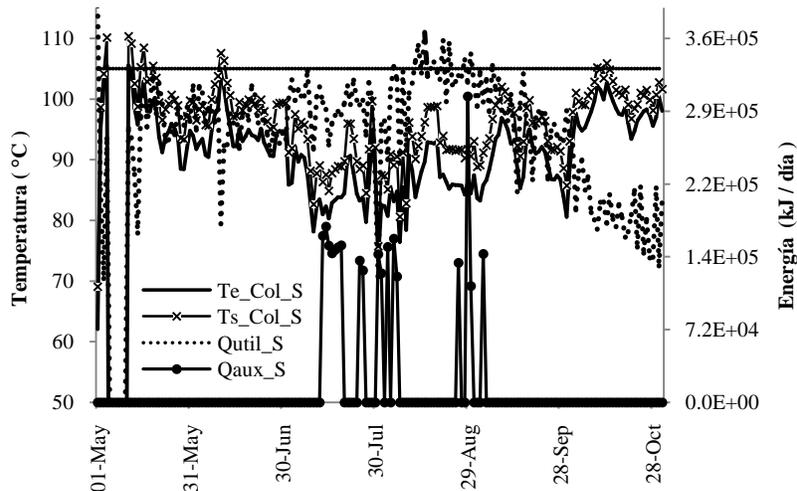


Figura 4.18: Colectores en sistema solar

Las mayores demandas de Q_{aux} del sistema de enfriamiento solar se dan del 13 de julio al 5 de agosto, con algunas demandas del 26 de agosto al 3 de septiembre. Esto debido a que durante estos periodos existe una reducción de disponibilidad del recurso solar como se puede apreciar en la figura 2.25.

La *energía suministrada al sistema* a través del líquido caloportador (T_{e_Gen}) cuenta con una calidad de entre 75 y 105°C como se muestra en la figura 4.19. En los primeros 15 días de mayo y primeros 15 días de junio las T_{e_Gen} se incrementan por encima de los 100°C, e incluso, llegan en algunos días a los límites

máximos permitidos por la unidad. El incremento de T_{e_Gen} es debido al decremento de la T_{amb} que provoca menor carga de enfriamiento en el conjunto de viviendas y esto hace que aumente la temperatura del fluido en el tanque de almacenamiento.

Para aprovechar el incremento de energía en el tanque de almacenamiento, se puede utilizar para dar servicio a un sistema de calentamiento de agua para uso doméstico, además de proveer calefacción de las viviendas a través de piso radiante; obteniendo de esta forma, un sistema integral de agua caliente, calefacción y enfriamiento durante el periodo anual, con ésta integración se hace más rentable el sistema de colección y almacenamiento solar.

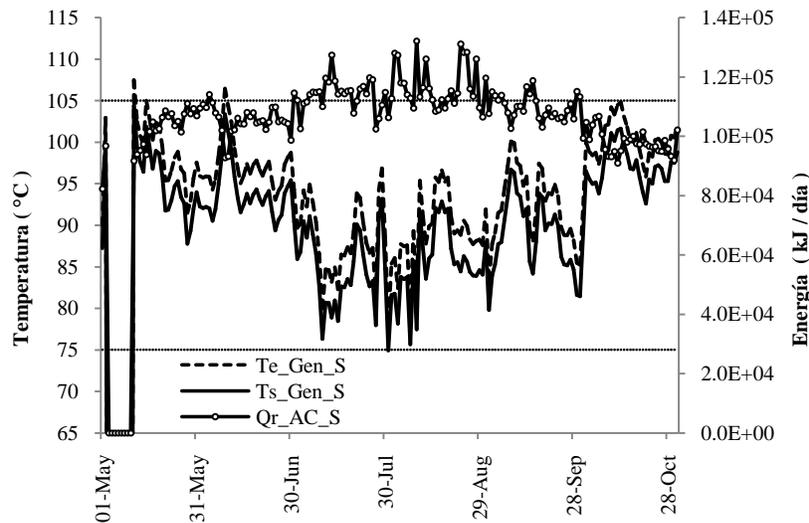


Figura 4.19: Generador en sistema solar

El sistema de colección solar, tiene la mayor demanda de energía térmica (Q_{r_AC}) por parte del sistema, en los meses de julio y agosto, lo que implica, una extracción promedio de 1.1×10^5 kJ/día. Sin embargo, durante los meses de mayo, junio y septiembre disminuye a 1.0×10^5 kJ/día, debido a la reducción de la T_{amb} ; con valores promedio diarios ligeramente superiores a los 30°C . Por otro lado, el Q_{r_AC} en octubre, disminuye a 9.6×10^4 kJ/día ya que la temperatura ambiente promedio diaria es menor a 30°C (Ver figura 2.25).

El agua de enfriamiento, como se esperaba, retira la mayor cantidad de energía del sistema de absorción (Q_{r_Ttre}) en los meses de julio y agosto, con una extracción de entre 1.7×10^5 y 2.2×10^5 kJ/día de agua con temperatura promedio diaria de entrada a la torre (T_{e_Ttre}) entre 29 y 32°C ; entregando al sistema una temperatura promedio diaria de salida (T_{s_Ttre}) entre 27 y 29°C , como se puede observar en la figura 4.20.

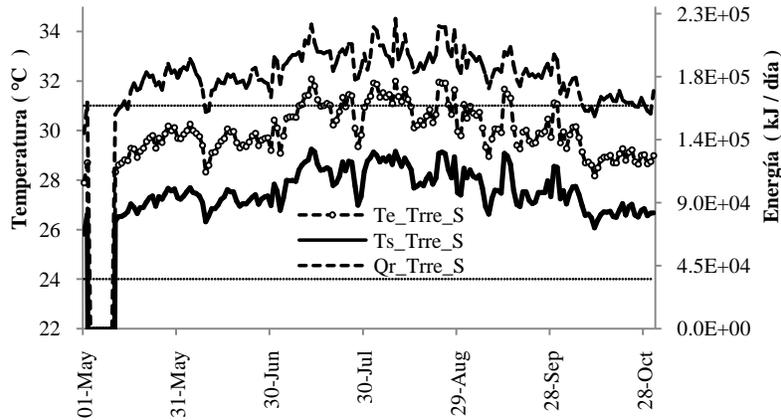


Figura 4.20: Torre de enfriamiento en sistema solar

El agua fría (T_{e_AF}) durante el periodo de mayo a mediados de julio y en octubre, presenta un comportamiento promedio diario de 7°C ; lo que garantiza operación óptima de las manejadoras de aire, como se puede observar en la figura 4.21. Sin embargo, en los meses de julio y agosto existen algunos días en que T_{e_AF} del sistema de absorción es mayor a la temperatura de diseño. Lo anterior es debido a que durante estos días, se demanda alta extracción de energía del espacio (Q_{r_Air}) y la temperatura del líquido caloportador decrece como consecuencia de una disminución del recurso solar. Por otro lado, durante estos días la humedad relativa ambiental se incrementa haciendo que la torre de enfriamiento envíe la T_{s_Ttre} con valores cercanos al límite máximo. El máximo Q_{r_Air} del agua fría (T_{e_AF}) se da el 13 de julio, con promedio máxima de 8.9×10^4 kJ/h.

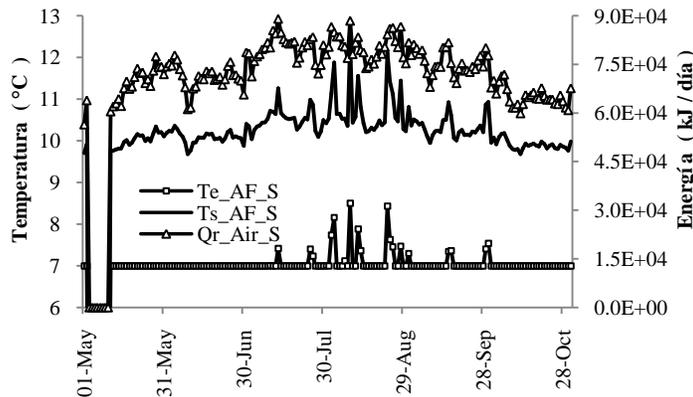


Figura 4.21: Agua fría en sistema solar

El aire frío es el encargado de propiciar *confort térmico* de los espacios. En la figura 4.22 se aprecia que la temperatura de salida del aire de la manejadora (T_{s_Air}) es de entre 16 y 16.3°C , con lo que se obtienen temperaturas del aire de las viviendas (T_{esp}) a un promedio diario de entre 25 y 26°C . La humedad relativa del espacio (HR_{esp}) se mantiene entre 52 y 64% la mayor parte del tiempo (ver figura 4.23). La mayor HR_{esp} se presenta en los meses de septiembre y octubre con valores promedio máximos de 74% .

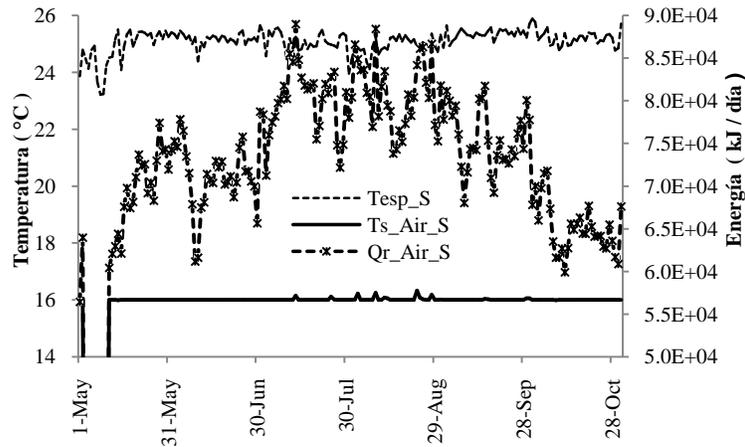


Figura 4.22: Aire frío de manejadora en sistema solar

En la figura 4.23, se observa a partir de la predicción del voto promedio del espacio (PMV_{esp}), que la calidad del aire de las manejadoras (T_{s_Air}) mantienen el espacio en confort térmico, ya que se mantiene a un promedio diario de ± 0.2 la mayor parte del periodo de máxima demanda de enfriamiento. Lo que indica que de acuerdo a la escala de confort térmico de la norma ISO:7730 (2005) el espacio se encuentra en el confort óptimo.

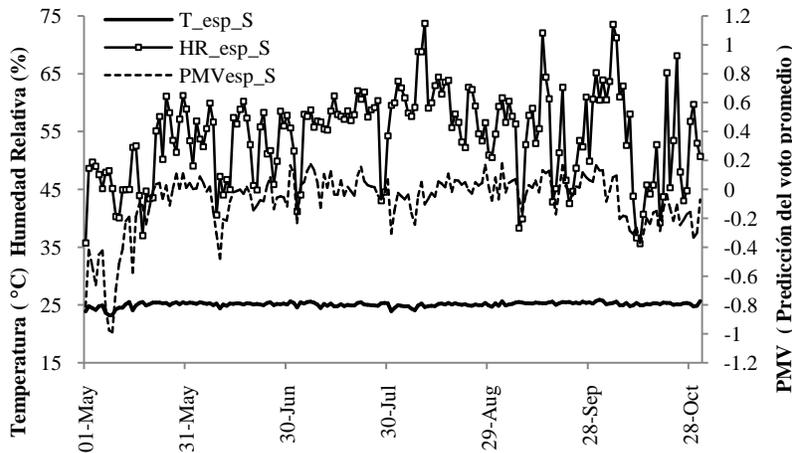


Figura 4.23: Confort térmico del espacio en sistema solar

La eficiencia solar ó COP_{solar} del sistema de enfriamiento operado a la máxima F_{r_Solar} , se encuentra a un promedio diario de entre 0.21 y 0.28, esto debido a la baja eficiencia promedio diaria de captación del subsistema de colectores solares (η_{Col}); ya que la unidad de absorción opera a un COP promedio diario de 0.68 la mayor parte del periodo de demanda de enfriamiento (ver figura 4.24). Los días en que la unidad trabaja en condiciones ineficientes, es cuando disminuye el recurso solar. Para el caso del periodo cálido los días críticos son: el 10 de julio, del 29 julio al 1 de agosto y todo el mes de octubre.

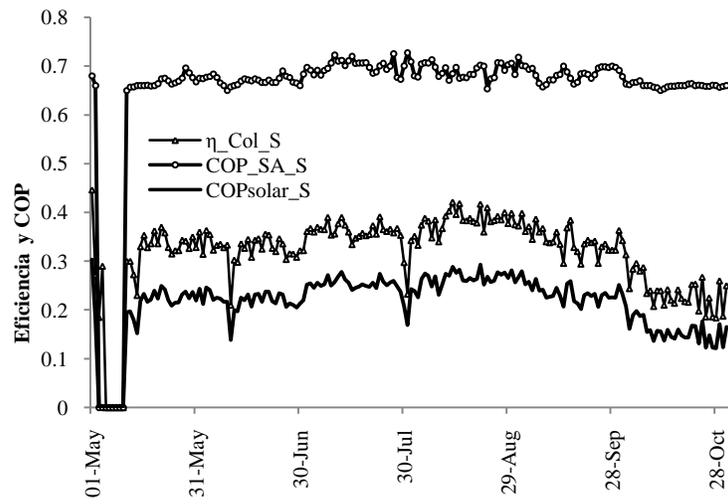


Figura 4.24: COP solar de sistema solar

4.1.5 Sistema de enfriamiento híbrido

A continuación se realiza el comportamiento operativo del sistema de absorción asistido a base de fuente de energía híbrida solar/gas natural al 47% de aportación solar, determinada con base a un estudio técnico/económico de una serie de escenarios de inversión. Los resultados económicos, serán ampliamente descritos en el capítulo 6. La información se presenta de igual forma que el análisis del sistema solar, a partir de un día normal y uno crítico, además de datos promedio horarios diarios en el caso del análisis del periodo cálido.

Para conocer el **funcionamiento del sistema híbrido para un día normal**, se procedió a la realización del dimensionamiento del mismo bajo el método mostrado en la figura 4.3. A continuación se describe el comportamiento de la unidad híbrida para el día 18 de agosto, cuyo clima se puede observar en la figura 4.8.

El estudio de *captación solar y almacenamiento térmico para un día normal*, se realizó con TRNSYS 16 a partir de un arreglo que consta de 104 m² de colectores de tubos evacuados en un arreglo de 6 líneas en paralelo con 6 colectores en serie cada una y un tanque de almacenamiento térmico de 6m³. El sistema está apoyado por una caldera a gas natural con una capacidad máxima de 4.5x10⁵ kJ/hr, para mantener una temperatura de salida del líquido caloportador a 80°C.

En la figura 4.25, se observa que los colectores obtienen Q_{util} a partir de las 8 a las 15 horas, sin embargo el fluido de salida de los colectores ($T_{s,Col}$) cuenta con buena temperatura hasta las 10 horas, ya que la temperatura es mayor a 80°C, obteniendo así aprovechamiento de energía solar (Q_{util}) por 8 horas del día; las cuales coinciden con el periodo de mayor demanda de enfriamiento.

Por otra parte, a partir del sistema de colección y almacenamiento térmico propuesto en el sistema híbrido no se tiene capacidad de suministro de Líquido caloportador (Q_{util}) con temperatura mayor a 80°C en todo el periodo sin disponibilidad de recurso solar ($R_{ad,Inc}$) y solamente se puede extraer energía de buena calidad hasta las 19 horas (tres horas posteriores a la última hora de obtención de calor útil) como se puede observar en la figura 4.26. De ahí que, es a partir de las 20 horas cuando es necesario del uso del sistema auxiliar a gas (Q_{aux}).

En el período de las 2 a las 7 horas el sistema de enfriamiento solar no demanda energía del tanque de almacenamiento, así que, no se tiene consumo de Q_{util} ni demanda de Q_{aux} , lo cual se puede apreciar a partir de la figura 4.26.

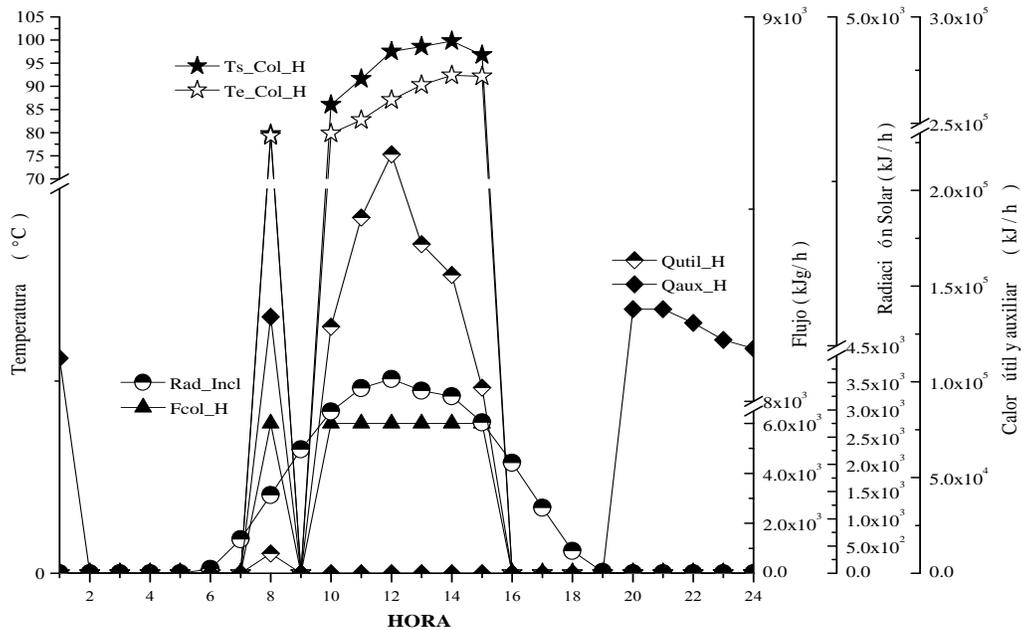


Figura 4.25: Subsistema de colección solar para sistema híbrido, día normal

La energía suministrada al sistema de absorción solar de un día normal, es recibida por medio de un fluido proveniente del tanque de almacenamiento o bien de alguna caldera (energía auxiliar) cuando la temperatura de salida del tanque es menor a 80°C .

En la figura 4.26 se observa que el sistema opera con Q_{aux} en la hora 1, y a partir de las 2 hasta las 7 horas el sistema deja de operar, ya que no es necesario retirar energía del espacio ($Q_{\text{r,Air}}$). De 8 a las 19 horas el sistema de absorción opera con $T_{\text{e,Gen}}$ superior a los 80°C , garantizando un buen funcionamiento. Cabe destacar que debido a la energía disponible en el tanque de almacenamiento se tienen 4 horas (16 a 20 horas) de Líquido caloportador de buena calidad como se puede observar en la figura 4.25.

Al igual que el sistema operado con energía solar, la mayor extracción de energía del líquido caloportador ($Q_{\text{r,AC}}$) durante éste día se da entre las 15 y 17 horas, sin embargo la demanda de calor para producción de frío disminuye con el sistema operado en forma híbrida a 1.1×10^5 kJ/h.

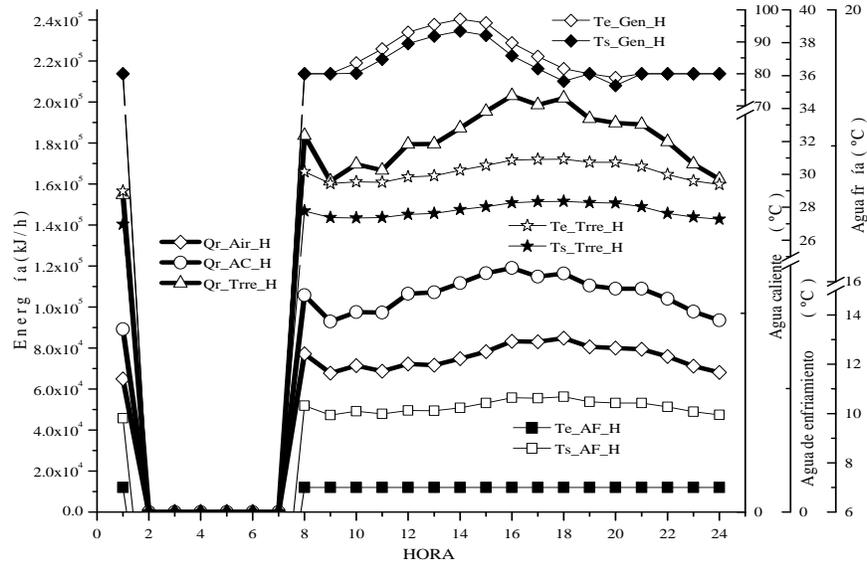


Figura 4.26: Calidad de energía en sistema híbrido, día normal

La torre de enfriamiento es la encargada de remover el calor del absorbedor y condensador de la unidad de enfriamiento solar. El máximo calor a remover a través del agua de enfriamiento de la torre ($Q_{r_Trre_H}$), se da entre las 16 y 18 horas, con un máximo de 2.0×10^5 kJ/h, a través de agua de retorno (T_{e_Trre}) a 31°C , la cual se logra enfriar (T_{s_Trre}) hasta una temperatura de 28.5°C , como se puede observar en la figura 4.26. Cabe destacar que durante el día normal, la torre de enfriamiento produce agua de enfriamiento en el rango demandado por la máquina de absorción con valor máximo de T_{s_Trre} de 28.5°C .

La temperatura del agua fría entregada por la unidad de absorción (T_{e_AF}) que se utiliza en las unidades manejadoras de aire, se mantiene con 7°C durante el periodo de operación de la unidad, garantizando con ello condiciones de confort en las viviendas. La mayor cantidad de energía removida del aire del espacio a través del agua fría es de 8.4×10^4 kJ/día y se da a las 18 horas, obteniendo una temperatura de retorno (T_{s_AF}) de 10.7°C , que se encuentra dentro del límite de temperatura de retorno al sistema.

Para analizar las *condiciones del espacio* a climatizar se tomaron como referencia el comportamiento del aire frío de salida de las manejadoras y la sensación térmica percibida por el usuario, bajo el método de PMV (Prediction Median Vote).

El aire frío de salida de las manejadoras se mantiene con temperatura de salida (T_{s_Air}) de 16°C , mientras que el sistema esta en operación como se puede observar en la figura 4.27. Las condiciones de temperatura del espacio (T_{esp}) se mantiene entre 24 y 25°C mientras el sistema se encuentra en operación, sin embargo, en el periodo en el que la unidad deja de producir agua fría debido a la baja demanda de enfriamiento (Q_{r_Air}) la T_{esp} se incrementa a un máximo de 28°C , como consecuencia del ancho de banda establecido en el control de temperatura, el cual se estableció entre 23 y 28°C .

El confort térmico del espacio (PMV_{esp}) tiene buen comportamiento durante la mayor parte del día, con valores dentro de los límites de ± 1 (confortablemente frío a confortablemente caliente), ya que se presentan valores de ± 0.6 , cercanos al confort óptimo de ± 0.5 , según lo establecido en la norma ISO-

7730 (2005), lo que se puede apreciar en la figura 4.27. El periodo con mayores problemas de estrés térmico (PMV_{esp}), se da las 2 a las 7 horas con valores de entre 0.42 y 0.52.

La relación de confort (PMV_{esp}), con base a las temperaturas del espacio oscila entre los 23 y 28°C, con un mayor incremento de las 2 a las 7 horas presentando valores de entre 26 y 28°C. En el caso de la humedad relativa del espacio (HR_{esp}), se puede observar que los mayores valores se dan de las 6 a las 8 horas.

Al comparar el comportamiento del espacio respecto al sistema operado a la mayor $F_{r,Sol}$, se encuentra que la unidad manejadora trabaja igual y las condiciones de confort del espacio son las mismas.

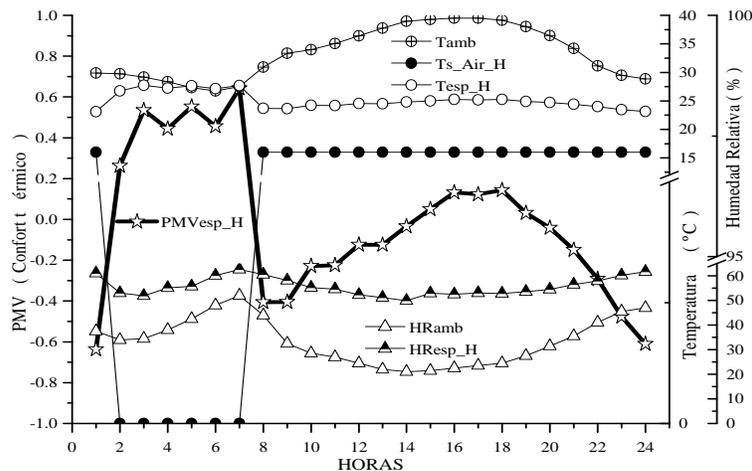


Figura 4.27: Confort térmico sistema híbrido, día normal

La eficiencia total del sistema de la unidad de aire acondicionado se analiza con base en el producto de la eficiencia del campo de colectores y COP del ciclo de absorción al que se le conoce como eficiencia total del sistema o COP_{solar}

La mayor eficiencia de colección (η_{Col}) del sistema de captación solar, se da al medio día entre las 11 y 13 horas con valores de entre 0.49 y 0.6, lo que se puede visualizar en la figura 4.28. Esto es debido a que durante estas horas se cuenta con buen recurso solar que es convertido a Q_{util} por el arreglo de colectores.

En el caso de la unidad de absorción, su desempeño es medido por medio del Coeficiente de Operación (COP) de la unidad, el cual depende principalmente de la temperatura de entrada del agua caliente, la temperatura del agua de enfriamiento y la temperatura del agua fría requerida. La relación entre las variables antes mencionadas, hace que la unidad incremente o disminuya su capacidad de enfriamiento y eficiencia. En la figura 4.28, se puede observar que el COP más alto de la unidad se da entre las 8 y 10 horas. Esto es debido a que se cuenta con una buena calidad de temperatura del agua de enfriamiento ($T_{s,Tre}$) de 27°C y agua caliente de 80°C, lo cual da una capacidad de enfriamiento de 1.3×10^5 kJ/h (37.96 kW) mayor capacidad de enfriamiento que la capacidad nominal de la unidad (ver figura 4.2).

El COP solar de la unidad presenta un buen comportamiento con un valor máximo de 0.39 a las 12 horas, esto debido a que los colectores trabajan a una eficiencia máxima de 0.6 y el sistema de absorción a un COP de 0.67.

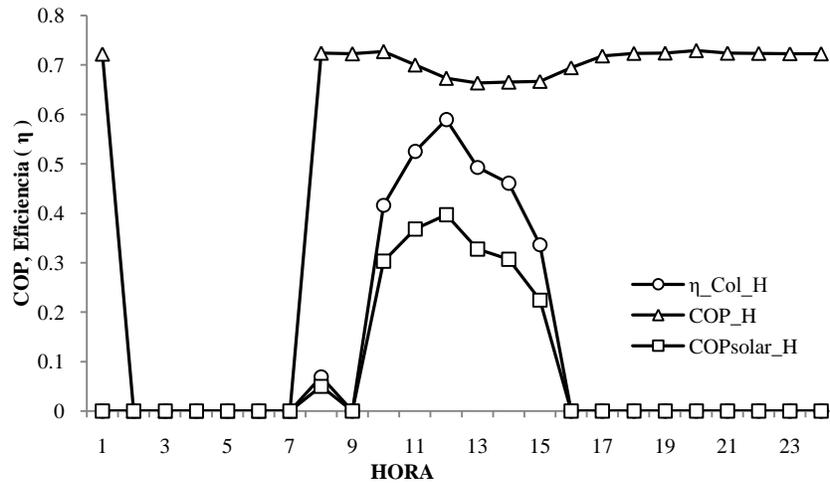


Figura 4.28: COP solar en sistema híbrido, día normal

El funcionamiento del sistema híbrido para el día crítico (13 de julio) de la unidad de absorción asistida con energía híbrida solar/gas natural se describe a continuación. En la *captación solar* y *almacenamiento durante el día crítico*, se puede observar que el arreglo de colectores obtiene Q_{util} a partir de las 8 horas y se interrumpe a las 9 horas, por lo que se desaprovecha el recurso solar (R_{ad_Incl}), fenómeno que se repite a las 16 horas. Es hasta las 10 horas, que el sistema de colección solar opera en forma continua hasta las 15 horas como se puede observar en la figura 4.29.

En el periodo de las 8 a las 10 horas, aún cuando existe recurso solar (R_{ad_Incl}) la temperatura entregada por los colectores es inferior a 80°C , por lo que es necesario utilizar la caldera (Q_{aux}) para incrementar la temperatura del líquido caloportador. El máximo Q_{util} obtenido por el sistema de colección es de 1.7×10^5 kJ/h a las 12 horas. El periodo en el que no existe demanda de energía del sistema de colección y almacenamiento térmico es a las 3, 5 y 7 horas, esto debido a que la T_{amb} y la T_{esp} presentan un pequeño diferencial, lo que hace que la unidad deje de operar, por lo que el sistema entra en operación intermitente como se puede observar en la figura 4.30.

Al igual que durante el día normal, el sistema de colección y almacenamiento térmico propuesto no tiene capacidad de suministro de Líquido caloportador (Q_{util}) con temperatura mayor a 80°C en todo el periodo sin disponibilidad de recurso solar (R_{ad_Inc}) y solamente se puede extraer energía de buena calidad (T_{s_Col}) de las 11 a las 15 horas.

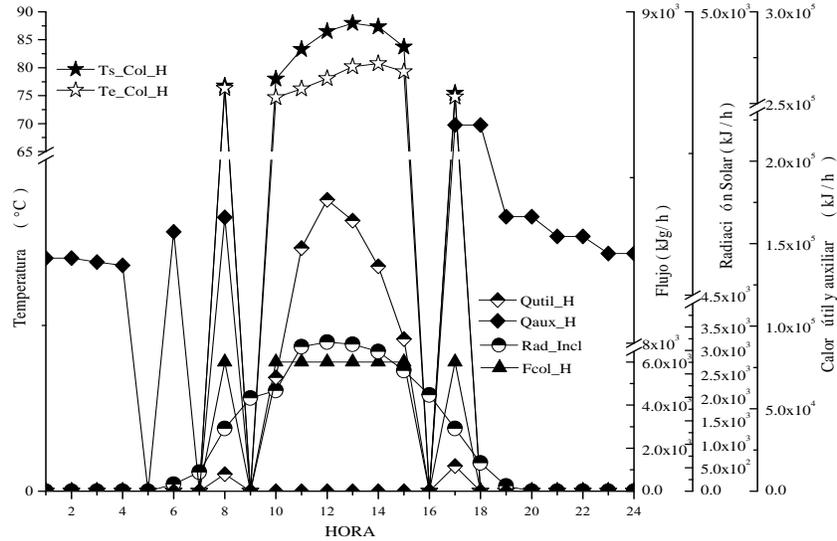


Figura 4.29: Sistema de colección para sistema híbrido, día crítico

El fluido caloportador entregado al generador en el día crítico, presentó temperaturas por arriba de los 80°C de las 11 a 15 horas (ver figura 4.30), lo que representa que el sistema opera con energía solar solamente durante 5 horas y el resto del día se requiere de Q_{aux} . La máxima demanda de energía ($Q_{r,AC}$) por parte del sistema se da de las 17 a 18 horas con 1.7×10^5 kJ/h, por lo que es necesario de Q_{aux} para obtener temperaturas de salida óptima (80°C); esto debido a la alta demanda de enfriamiento y a la mayor extracción de calor del líquido caloportador.

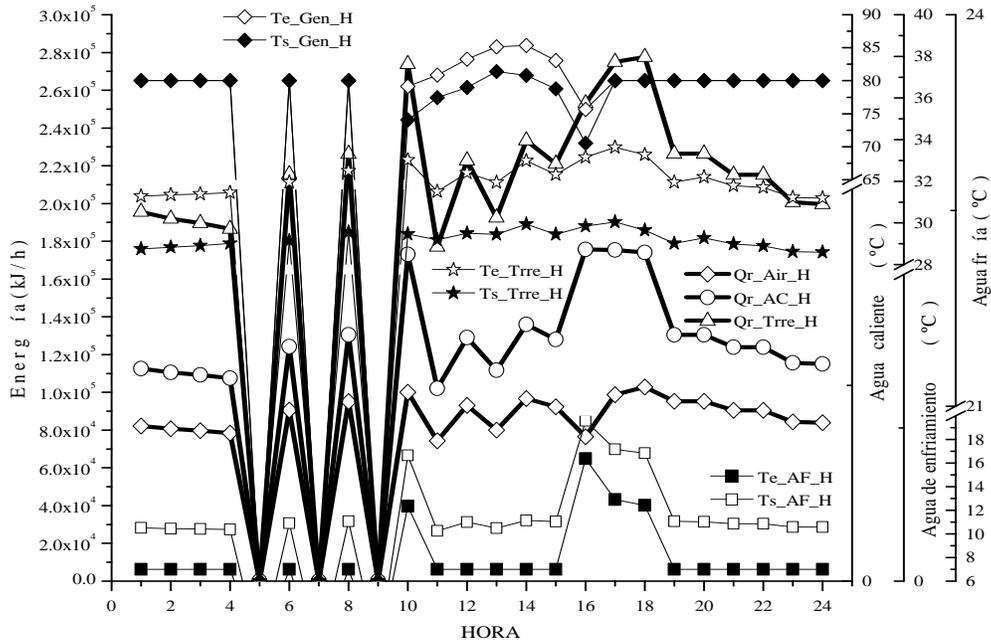


Figura 4.30: Suministro de energía al generador en sistema híbrido, día crítico

La torre de enfriamiento mantiene la temperatura de salida a la unidad de absorción (T_{s_Ttre}) entre 28 y 30°C durante el periodo de operación de la unidad. La mayor cantidad de energía retirada (Q_{r_Ttre}) es de 2.7×10^5 kJ/h a las 18 horas. La energía se extrae de un agua de retorno (T_{e_Ttre}) a 33.2°C y es enfriada a 30°C como se puede observar en la figura 4.30. Durante el día crítico la torre trabaja al límite de su capacidad, ya que la temperatura enviada al sistema de absorción esta muy cercana al máximo permitido de 31°C.

El agua fría (T_{e_AF}) entregada al sistema de absorción mantiene una temperatura de 7°C durante la mayor parte de las horas de operación de la unidad. Sin embargo en el periodo de las 16 a las 18 horas el sistema entra en operación crítica (ver figura 4.30), ya que el sistema envía agua fría entre 12 y 16°C, lo que afecta en la extracción de energía del espacio (Q_{r_Air}).

El incremento de temperatura, es debido a la disminución de la capacidad de enfriamiento de la unidad, por efecto de una disminución de temperatura del agua caliente (T_{e_Gen}) e incremento del agua de enfriamiento (T_{s_Ttre}) como se puede observar en la figura 4.30. El máximo Q_{r_Air} no coincide con la hora de máxima demanda, debido a lo antes expuesto y la máxima demanda de extracción de energía del aire a través del agua fría se da a las 16 horas.

Para analizar las **condiciones del espacio** a climatizar se tomó como referencia el comportamiento del aire frío de salida de las manejadoras y la sensación térmica percibida por el usuario, bajo el método de PMV (Prediction Median Vote). El aire frío de salida de las manejadoras (T_{s_Air}) muestra que la temperatura de salida se mantiene a 16°C la mayor parte del día, sin embargo de las 16 a las 18 horas se incrementa a un máximo de 18.6°C. Esto debido a que el agua caliente de entrada al generador (T_{e_Gen}) es menor a 80°C, al mismo tiempo que el agua de enfriamiento (T_{s_Ttre}) trabaja con temperaturas cercanas al límite permitido por el sistema; lo que genera temperatura de salida del agua fría hacia la manejadora (T_{e_AF}) con valores mayores a 7°C.

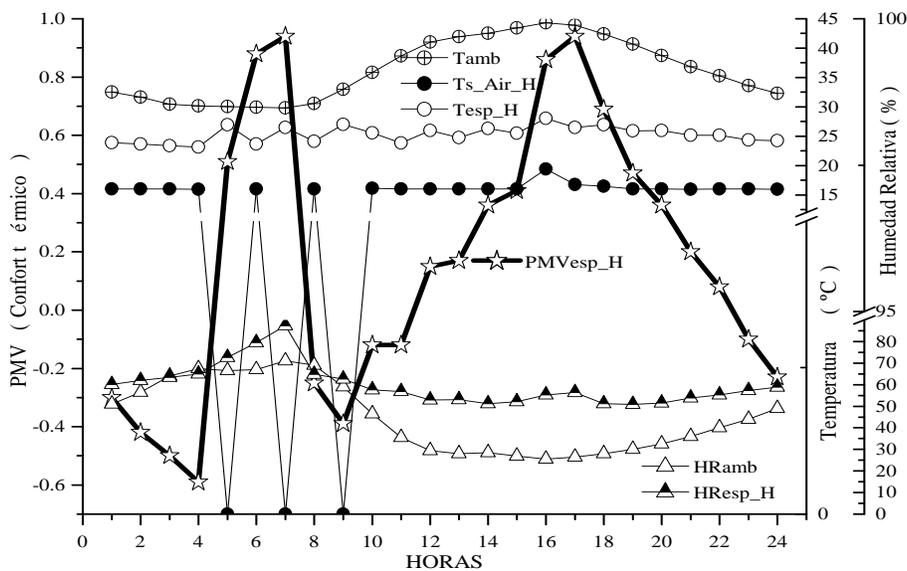


Figura 4.31: Confort térmico sistema híbrido, día crítico

El confort térmico del espacio (PMV_{esp}) tiene buen comportamiento durante la mayor parte del día, con valores dentro de los límites de ± 1 (confortablemente frío a confortablemente caliente), ya que se presentan valores de -0.6 a +1, como se muestra en la figura 4.31. Los periodos en que el estrés térmico es ligeramente mayor (PMV_{esp}) se dan de las 5 a las 8 horas ya que la unidad entra en operación intermitente debido al pequeño diferencial respecto a la T_{amb} . En el periodo de las 16 a las 18 horas, se incrementa el PMV como consecuencia del incremento de la temperatura del agua fría (T_{e_AF}) por arriba de los $7^{\circ}C$, como se puede observar en la figura 4.30. El periodo con condiciones de confort óptimo de los espacios se da de 1 a 4, de 8 a 15 y de 19 a 24 horas.

Aún cuando las condiciones de operación de la unidad son críticas en ciertas horas del día, se puede observar en la figura 4.31 que la T_{esp} se mantiene entre los 23 y $28^{\circ}C$ y la HR_{esp} del espacio con valores de entre 50 y 87%. En los periodos críticos se puede observar que al dejar de operar la unidad de absorción se da un incremento de la HR_{esp} con una mayor afectación por las mañanas.

En el caso del la *eficiencia* del campo de colectores presenta una eficiencia máxima (η_{Col}) de 0.53 a las 12 horas como se puede observar en la figura 4.32, esto debido a que se cuenta con el mayor recurso solar (R_{ad_Incl}), al mismo tiempo que el sistema tiene alta demanda de energía del líquido caloportador (T_{e_Gen}), lo que hace que la temperatura del tanque disminuya y al ser enviada al campo de colectores se obtiene un mayor aprovechamiento de la energía solar y un mayor gradiente de temperatura.

El COP de la unidad de absorción es de 0.73 a lo largo del día, sin embargo de las 16 a las 18 horas sufre un decremento hasta llegar a un mínimo de 0.43 a las 16 horas, esto debido a que la T_{e_Gen} es de $75^{\circ}C$ valor en el límite permisible para operación del sistema de absorción. Además de que la temperatura del agua de enfriamiento (T_{s_Trr}) es de $30^{\circ}C$ muy cercana al máximo permisible. Esto hace que la unidad baje su capacidad de enfriamiento a 6.3×10^4 kJ/h (Ver figura 4.30) valor muy inferior a la capacidad nominal de la unidad de absorción (1.2×10^5 kJ/h), mientras que la unidad requiere retirar (Q_{r_Air}) 1.7×10^5 kJ/h. Por otro lado estudios realizados Wang L. *et al.*, (2007), demuestran que entre mayor sea la temperatura ambiente se tiene una disminución de COP como ya se mencionó en la sección 5.1.4.

En lo que respecta al COP_{solar} se puede apreciar que cuando el sistema trabaja apoyado con energía solar se obtiene un máximo de 0.38 a las 12 horas, valores similares al reportado por Casals et. al., (2006), para sistemas operados con energía solar.

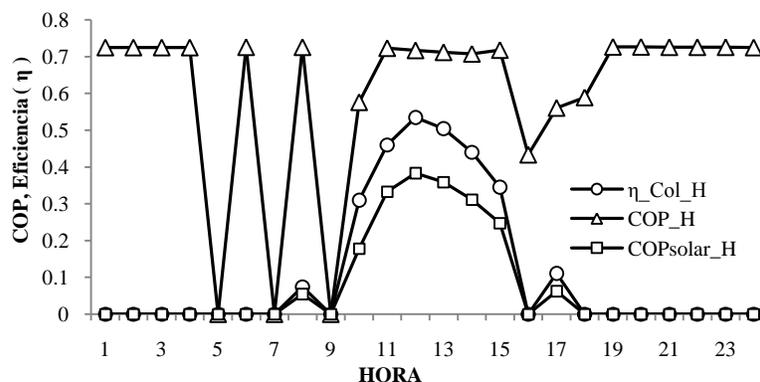


Figura 4.32: COP solar en sistema híbrido, día crítico

El **sistema de enfriamiento híbrido durante en el periodo cálido** se analizó con base a los subsistemas de apoyo; con la finalidad de tener una visión general del comportamiento de la unidad durante la temporada de verano en términos de valores promedio horario diarios.

La *captación solar y almacenamiento* térmico del sistema tiene un mayor aprovechamiento de Q_{util} en los meses de mayo y agosto como se puede observar en la figura 4.33. En el mes de mayo es debido a la alta disponibilidad de recurso solar, temperaturas ambiente bajas (Ver figura 2.25) y a la baja demanda de climatización ($Q_{r,AC}$) como se observa en la figura 4.34. Como consecuencia, la temperatura promedio del tanque incrementa a valores cercanos a los 105°C en los primeros días de mayo. En el periodo del 8 al 12 de junio se presenta de nuevo una disminución de la temperatura ambiente provocando el mismo efecto descrito anteriormente.

El mes de agosto es otro de los meses con mayor aprovechamiento del sistema de colección solar, pero es consecuencia de la mayor demanda de energía del agua caliente que afecta fuertemente la temperatura del líquido caloportador del tanque, por lo que se obtiene un mayor aprovechamiento, ya que el agua de los colectores entra mas fría obteniendo un mayor calor útil.

La energía requerida para complementar al calor útil de los colectores, representa el 53%, esto porque el sistema se propuso con un área de colección de 104 m^2 , ya que el área disponible del techo de las viviendas es de 188 m^2 . Además de que el estudio económico recomienda ésta alternativa de colección como la de mejor tiempo de recuperación de inversión, lo cual se discutirá en el capítulo 6.

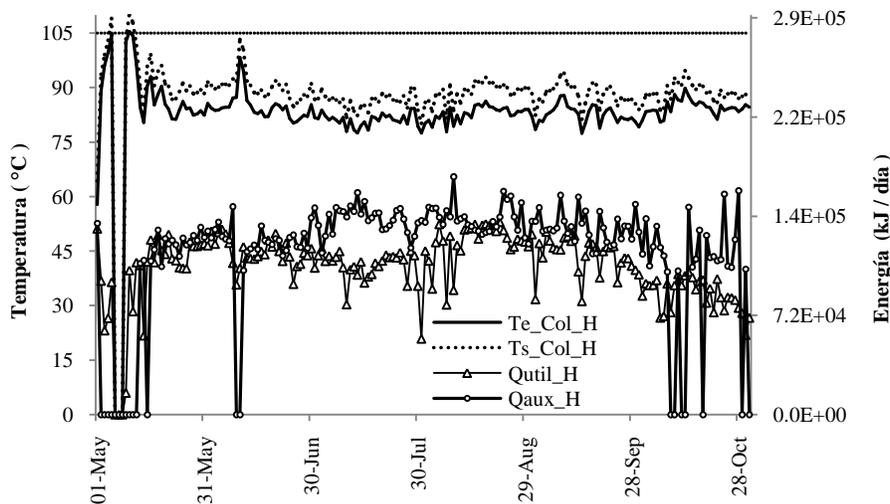


Figura 4.33: Colectores en sistema híbrido

La *energía suministrada al sistema* a través del líquido caloportador (T_{e_Gen}) cuenta con una calidad de energía de entre 75 y 105°C como se muestra en la figura 4.34. Entre el 10 y 20 de mayo y del 9 al 11 de junio la T_{e_Gen} se incrementa a valores promedio diarios cercanos a los 95°C . El incremento de la T_{e_Gen} del líquido caloportador es debido a que la T_{amb} provoca menor carga de enfriamiento en el conjunto de

viviendas y hace que la temperatura del fluido en el tanque de almacenamiento incremente, lo que representa un bajo aprovechamiento del sistema de colección solar.

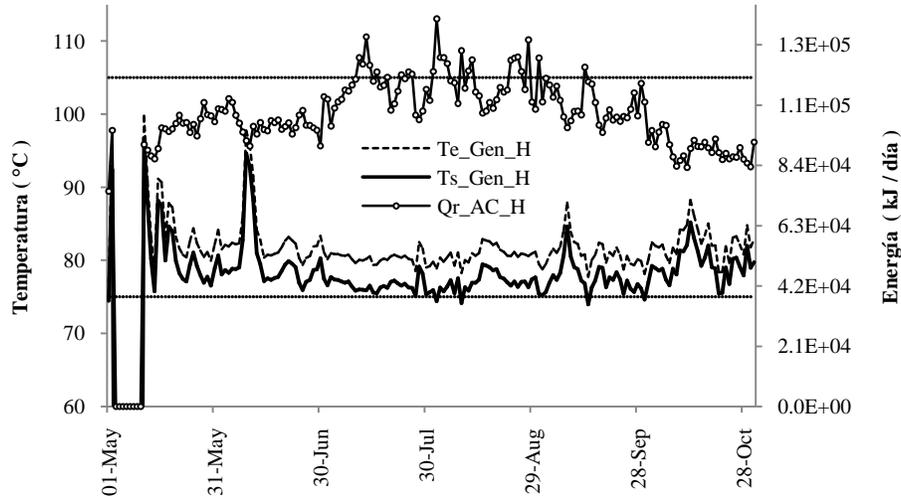


Figura 4.34: Generador en sistema híbrido

El incremento de energía en el tanque de almacenamiento puede ser utilizado por un sistema de calentamiento de agua para uso doméstico, además de utilizarse para calefacción de las viviendas a través de piso radiante; obteniendo de esta forma, un sistema integral de agua caliente, calefacción y enfriamiento durante el periodo anual, con ésta integración se hace más rentable el sistema de colección y almacenamiento solar. El subsistema de colección solar, tiene la mayor demanda de energía térmica (Q_{r_AC}) por parte del sistema de enfriamiento, en los meses de julio y agosto, lo que implica una extracción promedio de 1.1×10^5 kJ/día como se puede observar en la figura 4.34. Sin embargo, durante los meses de mayo, junio y septiembre disminuye a 9.8×10^4 kJ/h, debido a la reducción de la T_{amb} ; con valores promedio diarios ligeramente superiores a los 30°C (ver figura 2.25). Mientras que la demanda de energía (Q_{r_AC}) en octubre, disminuye a 8.6×10^4 kJ/día, ya que la temperatura ambiente promedio diaria decrece aún más.

El agua de enfriamiento retira la mayor cantidad de energía del subsistema (Q_{r_Trr}) de absorción en los meses de julio y agosto, con una extracción promedio diaria de entre 1.7×10^5 y 2.0×10^5 kJ/día, de agua con temperatura promedio diaria de entrada a la torre (T_{e_Trr}) entre 30 y 32°C , entregando al sistema una temperatura de salida (T_{s_Trr}) promedio diaria entre 27 y 29°C , como se puede observar en la figura 4.35.

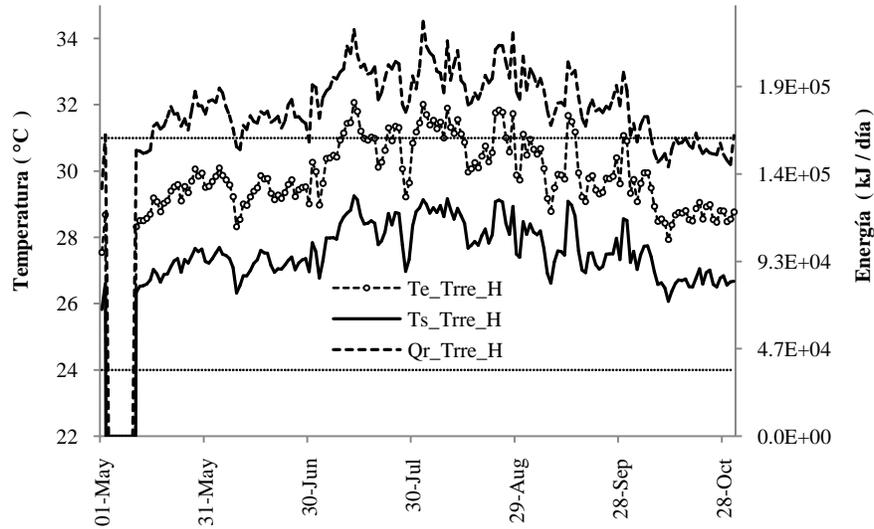


Figura 4.35: Torre de enfriamiento en sistema híbrido

El agua fría (T_{e_AF}) en el periodo de mayo a mediados de julio y en octubre presenta 7°C . Sin embargo, en la figura 4.36 se muestra que en los meses de julio y agosto existen algunos días en que la T_{s_AF} del sistema de absorción es mayor a la temperatura de diseño. Lo anterior debido a que el espacio durante estos días demanda alta extracción de energía y la temperatura del líquido caloportador disminuye su temperatura como consecuencia de una disminución del recurso solar (ver figura 2.25). Por otro lado durante estos días la humedad relativa ambiental se incrementa haciendo que la torre de enfriamiento envíe agua de enfriamiento con valores cercanos al límite máximo (ver figura 4.35). La máxima energía removida del aire (Q_{r_Air}) se da el 13 de julio, con una extracción promedio diaria de 8.7×10^4 kJ/h.

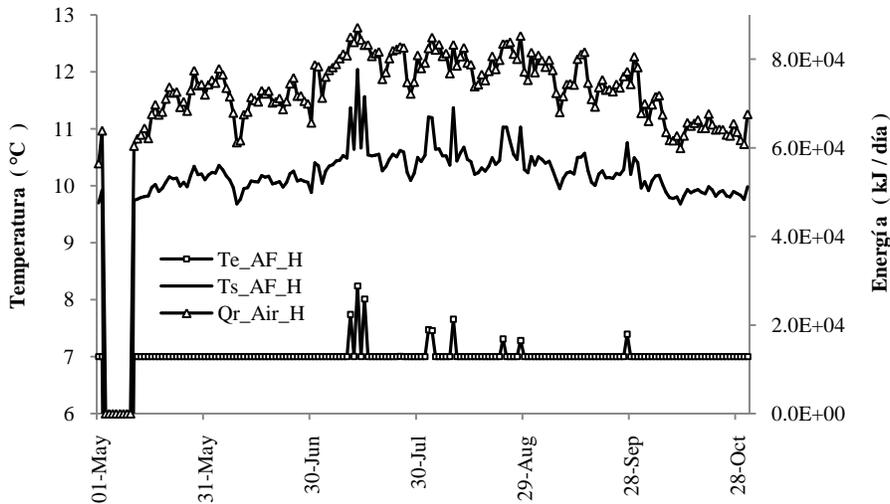


Figura 4.36: Agua fría en sistema híbrido

El aire frío (T_{s_AirF}) es el encargado de propiciar *confort térmico* (PMV_{esp}) a los espacios, en la figura 4.37 se puede apreciar que la T_{s_AirF} de las manejadoras se mantiene a una temperatura promedio diaria de 16°C durante la mayor parte del periodo, sin embargo en los días críticos se incrementa a 16.3°C , con lo que se obtienen temperaturas del aire de las viviendas (T_{esp}) a un promedio diario de entre 24 y 26°C como se muestra en la figura 4.38.

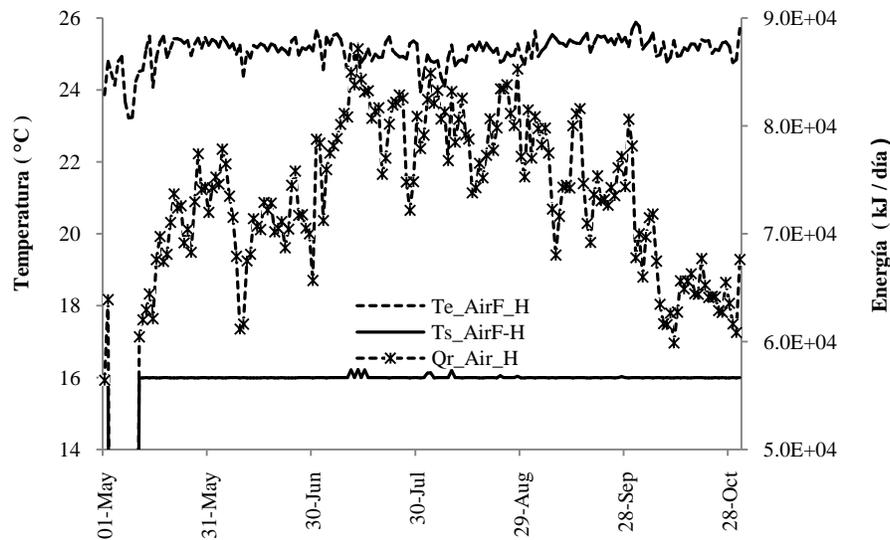


Figura 4.37: Aire frío de manejadora en sistema híbrido

La mayor extracción de energía de la vivienda a través del aire de las manejadoras (Q_{r_Air}) se da en los meses de julio y agosto con una extracción promedio diaria máxima de 8.7×10^4 kJ/h el 13 de julio como se puede observar en la figura 4.37. Sin embargo la extracción promedio diaria en el periodo crítico es de 8.2×10^4 kJ/h.

El confort térmico (PMV_{esp}) proporcionado a partir del sistema híbrido oscila entre un promedio horario diario de -0.31 a 0.20 , lo que representa confort térmico según la norma ISO-7730 (2005). El periodo en que el espacio se mantiene más frío es en los primeros 15 días del mes de mayo con valores mínimos de -1 , que corresponde al límite de confortablemente frío. Esto como consecuencia de la reducción de la T_{amb} hasta un mínimo promedio horario diario de 18°C el 8 de mayo, como se puede observar en la figura 2.25.

Otro de los periodos con mejores condiciones de PMV_{esp} se da a partir del 8 de octubre hasta finales del mismo, ya que la T_{amb} durante este mes, presentan un marcado descenso a un promedio horario diario de 28°C lo que propicia valores de PMV de entre -0.3 a 0 , que representan confort óptimo.

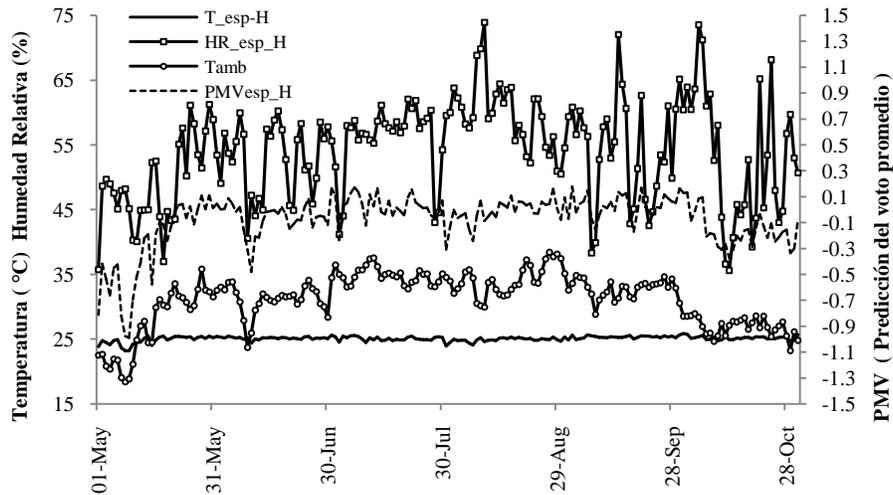


Figura 4.38: Confort térmico del espacio en sistema híbrido

La eficiencia solar del sistema de enfriamiento ó COP_{solar} del sistema de enfriamiento híbrido al 47% de $F_{T_{sol}}$ es de, es de un promedio diario de entre 0.23 y 0.31 como se puede observar en la figura 4.39. Los días en que la unidad trabaja con mayor ineficiencia es debido a la combinación de disminución de temperatura ambiente y radiación solar, que hacen que el sistema de enfriamiento demande menos energía térmica y como consecuencia el sistema de captación y almacenamiento térmico obtenga altas temperaturas que hacen deje de operar el campo de colectores (ver figura 2.25y 4.39).

Como consecuencia al mismo fenómeno antes planteado, tanto la eficiencia del subsistema de colectores como el COP del subsistema de absorción se ven afectados en los mismos periodos. La mejor eficiencia de colección se da en los meses de julio y agosto y es debida a lo ya comentado en la sección captación solar y almacenamiento térmico.

En lo que respecta al COP de la unidad de absorción se observa que la unidad trabaja a un promedio diario de 0.72, con reducciones en los días con baja disponibilidad de radiación solar, ya que afecta a la producción de agua caliente. Además se puede observar que del 11 al 15 de julio (periodo de máximas temperaturas ambiente) el COP de la unidad desciende de 0.72 a 0.69 debido a una alta demanda de enfriamiento como consecuencia de alta T_{amb} como se puede observar en la figura 2.25.

Asimismo durante estos días se da una significativa reducción del recurso solar ($R_{ad_{HOR}}$) y un incremento de la humedad relativa (HR_{amb}) que hace se obtengan altas temperaturas de salida del agua de enfriamiento ($T_{s_{TRe}}$) como se puede observar en la figura 4.35, lo que propicia ineficiencia de producción de agua fría ($T_{s_{AF}}$) a 7°C como se puede observar en la figura 4.36 y una reducción de COP de la unidad de enfriamiento solar.

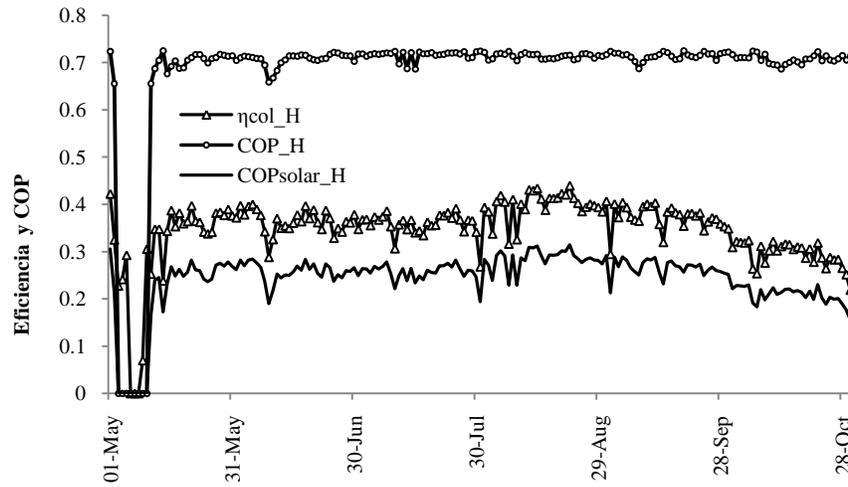


Figura 4.39: COP solar de sistema híbrido

4.1.6 Sistema de enfriamiento a gas natural

A continuación se describe el comportamiento del sistema de absorción operado al 100% con gas natural. El estudio se realiza para comparar su comportamiento respecto a los sistemas de energía solar y energía híbrida.

El **funcionamiento del sistema a gas natural en un día normal**, se realizó bajo el esquema de dimensionamiento mostrado en la figura 4.4. A continuación se describe el comportamiento de la unidad para un día de operación normal (18 de agosto) ver figura 4.8.

El *comportamiento energético del sistema de absorción solar de un día normal*, muestra que el fluido caloportador entregado al generador (T_{e_Gen}) por la caldera, se mantiene a una temperatura constante de 80°C , durante las horas de demanda de enfriamiento como se puede observar en la figura 4.40. La cantidad de energía promedio removida del agua caliente (Q_{r_AC}) es de 1.0×10^5 kJ/h, con un máximo de 1.1×10^5 kJ/h a las 18 horas, lo que provoca una disminución de temperatura del agua caloportadora (T_{s_Gen}) de 4°C .

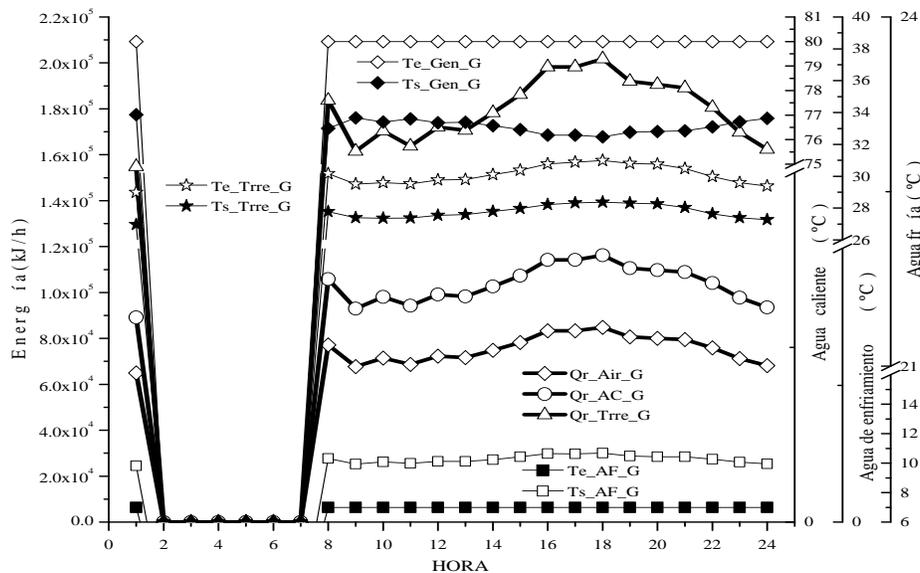


Figura 4.40: Calidad de energía en sistema a gas natural, día normal

La torre de enfriamiento es la encargada de remover la energía del condensador y absorbedor de la unidad de absorción. El máximo calor extraído (Q_{r_Trre}) del sistema se da a las 18 horas con 2.0×10^5 kJ/h, a través de agua de retorno del condensador y absorbedor (T_{e_Trre}) a 31°C , entregando una temperatura (T_{s_Trre}) de 28.5°C , como se puede ver en la figura 4.40. Se puede apreciar que la torre de enfriamiento produce agua de enfriamiento en el rango demandado por la máquina de absorción.

La temperatura del agua fría (T_{e_AF}) entregada por la unidad de absorción a las unidades manejadoras de aire se mantiene con 7°C durante el periodo de operación de la unidad, garantizando condiciones de confort en las viviendas. Además de que la temperatura de retorno del agua fría (T_{s_AF}) se mantiene por debajo de los 12.5°C . La mayor cantidad de energía removida del aire del espacio (Q_{r_Air}) a través del

agua fría es de 8.4×10^4 kJ/h a las 18 horas, obteniendo una T_{s_AF} de 10.6°C , valor dentro del límite de temperatura de retorno al sistema.

Para analizar las *condiciones del espacio* a climatizar se tomaron como referencia el comportamiento del aire frío de salida de las manejadoras y la sensación térmica percibida por el usuario, bajo el método de PMV (Prediction Median Vote).

El aire frío (T_{s_Air}) producido a través de las manejadoras provee buena temperatura, ya que se mantiene a 16°C , mientras opera el sistema. Con estas condiciones de T_{s_Air} , el espacio se mantiene entre 24 y 25°C , mientras que la temperatura máxima del ambiente (T_{amb}) es de 39.5°C . Sin embargo en el periodo en el que la unidad deja de producir agua debido a la baja demanda de enfriamiento, la T_{esp} se incrementa a un máximo de 28°C , debido al ancho de banda establecido en control de temperatura de entre 23 y 28°C y es mínimo el diferencial de temperatura entre la temperatura máxima de consigna y la T_{amb} como se puede observar en la figura 4.41.

El confort térmico del espacio (PMV_{esp}) tiene buen comportamiento, aún cuando la T_{esp} se incrementa a 28°C por las primeras horas del día, ya que las condiciones de confort se mantienen entre confortablemente frío a confortablemente caliente, obteniendo valores de ± 0.6 .

Durante las horas en que la unidad deja de operar se produce una ligera elevación de la T_{esp} y un incremento en la humedad relativa (HR_{esp}), llegando a un máximo de 63% . Lo cual genera un ligero incremento en el rango del PMV_{esp} . En lo que respecta al periodo de máxima demanda de enfriamiento la HR_{esp} se mantiene entre 50 y 55% , logrando un incremento ya que el ambiente se encuentra muy seco con HR_{amb} de entre 21 y 25% .

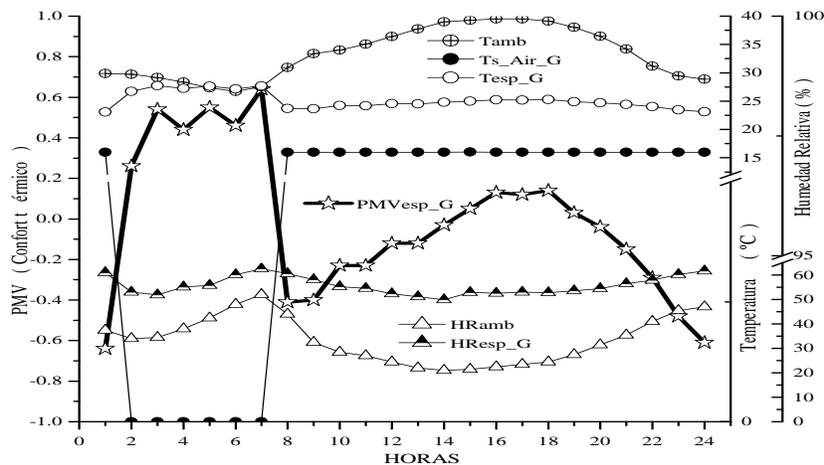


Figura 4.41: Confort térmico sistema a gas natural, día normal

El COP de la unidad de absorción trabaja a un valor constante de 0.72 durante las horas de operación de la unidad. Esto debido a que la capacidad de la unidad es suficiente para retirar la energía del espacio a través del agua fría (T_{s_AF}) como se puede observar en la figura 4.40, además de que el agua caliente suministrada a la unidad (T_{e_Gen}) de absorción es suficiente para producir el efecto frigorífico, además de que la energía retirada a través del agua de enfriamiento (T_{s_Trr}) hace que la unidad opere bajo óptimas condiciones.

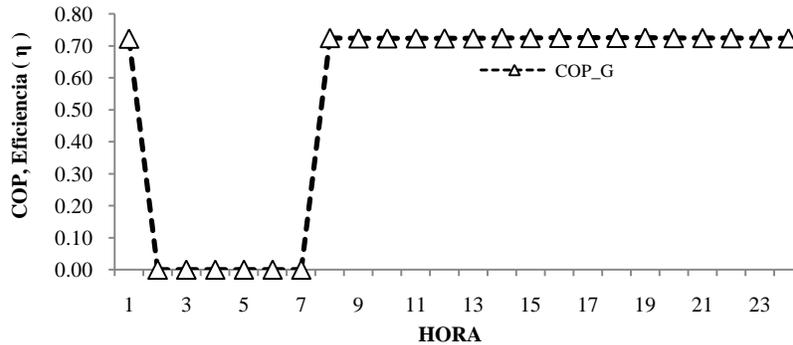


Figura 4.42: COP solar en sistema a gas natural, día normal

El funcionamiento del **sistema a gas natural durante el día crítico** se describe en éste apartado. Se puede observar que el *fluido caloportador* (T_{e_Gen}) entregado al generador por la caldera se mantiene a una temperatura constante de 80°C , durante las horas de demanda de enfriamiento. El periodo crítico de demanda de enfriamiento se da entre las 16 y 18 horas. La cantidad de energía promedio removida del agua caliente (Q_{r_AC}) es variable a lo largo del día desde un mínimo de 1.0×10^5 kJ/h a las 11 horas hasta 1.7×10^5 kJ/h a las 17 horas (ver figura 4.43). Con la Q_{r_AC} se tiene una reducción de 6°C del líquido caloportador.

La torre de enfriamiento es la encargada de remover la energía del condensador y absorbedor de la unidad de absorción. El máximo calor extraído del sistema (Q_{r_Ttre}) se da a las 18 horas con 2.7×10^5 kJ/h a través de agua de retorno (T_{e_Ttre}) del condensador y absorbedor a 33°C , entregando al sistema una temperatura de 30°C , como se puede apreciar en la figura 4.43. Además se observa que la torre de enfriamiento produce agua de enfriamiento (T_{s_Ttre}) en el rango demandado por la máquina de absorción, pero muy cercano a la máxima permitida por el sistema de 31°C .

El agua fría de salida del sistema de absorción (T_{s_Ttre}) envía agua fría a 7°C durante la mayor parte de las horas de operación de la unidad. Sin embargo en el periodo de las 16 a las 18 horas entra en operación crítica, ya que envía agua fría a 12.5°C , lo que afecta en el calor removido del aire (Q_{r_Air}) a través de la T_{e_AF} a las manejadoras.

El incremento de la T_{e_AF} durante las horas críticas es consecuencia de la alta demanda de energía por parte del sistema de absorción al agua caliente (Q_{r_AC}), por las altas temperaturas ambientales que afectan a la vivienda (ver figura 2.25). Además de que se da una reducción del recurso solar (R_{ad_Hor}) obteniendo menor Q_{util} el sistema de colección y almacenamiento térmico; al mismo tiempo se presenta un incremento de la HR_{amb} que hace que la torre de enfriamiento opere en forma ineficiente como se puede observar en la figura 4.43.

Este tipo de fenómenos se da solamente 9 días entre el periodo de mayor demanda de enfriamiento (julio y agosto), como se puede observar en la figura 4.49; por lo que, si se requiere eliminar este efecto es necesario incrementar la temperatura de consigna a valores entre 88 y 95°C , ya que con esta calidad de energía la unidad aún cuando trabaja con T_{s_Ttre} a 32°C , ofrece una capacidad de enfriamiento de entre 1.0×10^5 a 1.3×10^5 kJ/h (32.41 a 34.3 kW), garantizando T_{s_AF} a 7°C como se puede observar en la figura 4.2

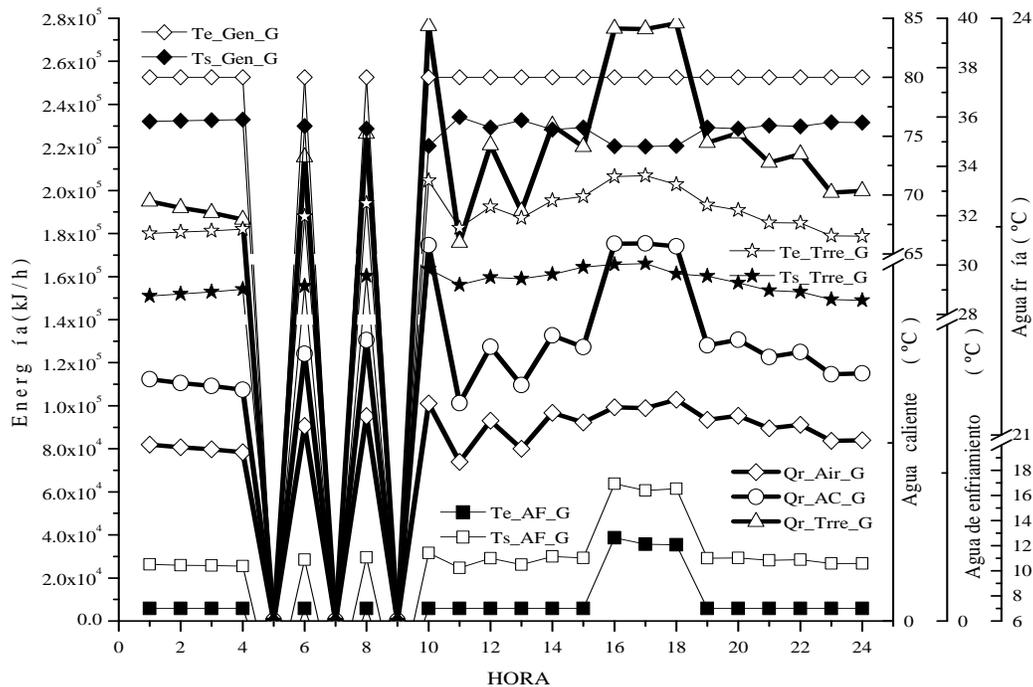


Figura 4.43: Suministro de energía al generador en sistema a gas natural, día crítico

Para analizar las *condiciones del espacio* a climatizar se tomó como referencia el comportamiento del aire frío de salida de las manejadoras y la sensación térmica percibida por el usuario, bajo el método de PMV (Prediction Median Vote).

El aire frío de salida de las manejadoras (T_{s_Air}) se mantiene a 16°C la mayor parte del día crítico, sin embargo a las 16 horas, la T_{s_Air} se incrementa a un máximo de 16.6°C , como se observa en la figura 4.45. Esto debido a que el agua fría (T_{e_AF}) no se mantiene a 7°C como ya se comentó en la sección anterior. En lo que respecta al periodo de las 5 a las 9 horas el sistema entra en operación intermitente debido a que T_{amb} está entre 30 y 33°C (Ver figura 2.25) y la temperatura de consigna está determinada con una banda de entre 23 y 28°C ; lo que genera un pequeño diferencial de temperatura entre el espacio interior (ver figura 4.45) y el ambiente, por lo que no se requiere de la operación del sistema de absorción.

El confort térmico del espacio (PMV_{esp}) está entre ± 0.6 (Confort óptimo) la mayor parte del día durante el día crítico como se puede observar en la figura 4.44. Las horas en que el espacio tiene un ligero incremento de PMV_{esp} , es entre las 16 y 18 horas con valores de 0.72 y 0.68 respectivamente, lo que representa que está dentro del límite de confortablemente caliente y confortablemente frío (± 1). Cabe destacar que el espacio mantiene mejores condiciones de confort (PMV_{esp}) durante el día crítico que durante el día normal, debido a que existe un mayor diferencial entre la T_{amb} y la T_{esp} lo que hace opere la unidad a plena carga sin entrar en operación intermitente. Las T_{esp} durante el día crítico oscilan entre los 23 y 27°C con humedades relativas de entre 50 y 77% , mientras que en el exterior se encuentra a T_{amb} de entre 30 y 44.5°C , con HR_{amb} de entre 26 y 71% .

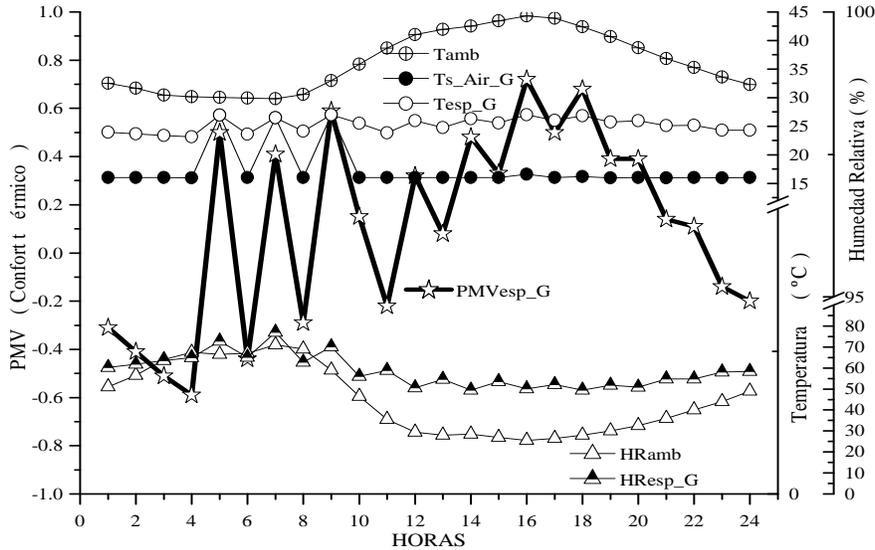


Figura 4.44: Confort térmico sistema a gas natural, día crítico

El sistema de absorción opera a un COP de 0.72 la mayor parte del día, sin embargo de las 5 a las 9 horas la unidad entra en operación intermitente, debido a la baja demanda de enfriamiento (Q_{r-Air}) como consecuencia del pequeño diferencial entre la T_{amb} y la T_{esp} . El periodo con mayores problemas de COP de la unidad se presenta a las 10 horas y posteriormente de 16 a 18 horas. Esto debido a la disminución de capacidad de la unidad a 9.2×10^4 kJ/h, como consecuencia de la relación de temperatura de entrada del agua caliente y agua de enfriamiento. Cabe destacar que durante estas horas la demanda de enfriamiento es mayor a la que la unidad puede proveer.

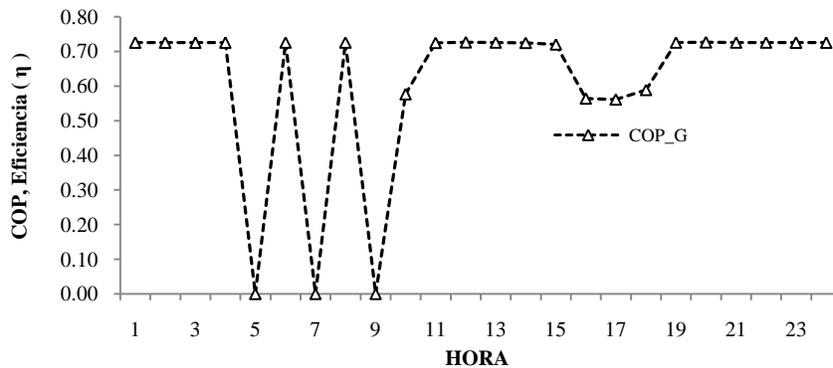


Figura 4.45: COP solar en sistema a gas natural, día crítico

El sistema de enfriamiento a gas natural durante en el periodo cálido se analizó con base a los subsistemas de apoyo; con la finalidad de tener una visión general del comportamiento de la unidad durante la temporada de verano en términos de valores promedio horario diarios.

La energía suministrada al sistema a través del líquido caloportador es introducida a través de líquido caloportador a una temperatura de entrada al generador (T_{e_Gen}) de 80°C como se muestra en la figura 4.46. La mayor extracción de energía (Q_{r_AC}) se da en julio y agosto, ya que la es cuando se requiere de mayor demanda de enfriamiento y la T_{e_Gen} se ve mayormente afectada. La extracción promedio de energía del líquido caloportador durante los meses crítico es de entre 1.1×10^5 kJ/día con un máximo de 1.3×10^5 kJ/día. En los periodos de mayo, junio y septiembre la demanda promedio de enfriamiento se reduce a 9.9×10^4 kJ/día, mientras que en el mes de octubre a solamente 8.8×10^4 kJ/día.

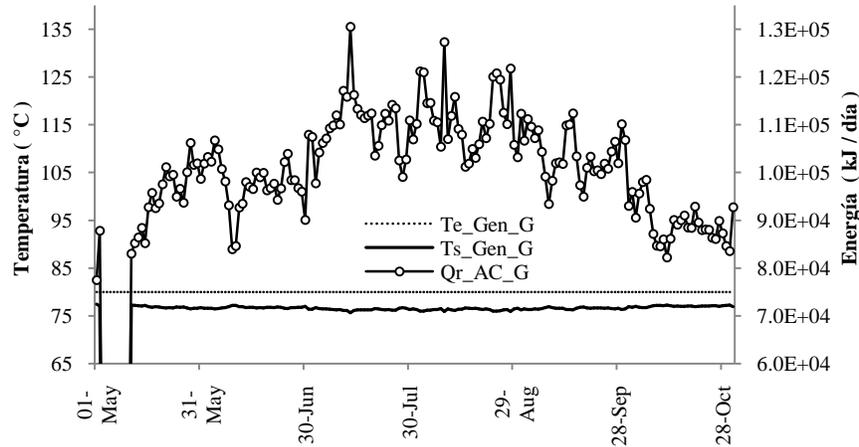


Figura 4.46: Generador en sistema a gas natural

El agua de enfriamiento retira la mayor cantidad de energía del condensador y absorbedor (Q_{r_Trr}) del sistema de absorción en los meses de julio y agosto, con una extracción promedio diaria de 1.8×10^5 kJ/día con un máximo de 2.0×10^5 kJ/día, de agua procedente de la torre con temperatura promedio diaria de entrada a la torre (T_{e_Trr}) de entre 30 y 32°C , entregando al sistema una temperatura de salida promedio diaria (T_{s_Trr}) entre 27 y 29°C , como se puede observar en la figura 4.47.

En la figura 4.47 se puede apreciar que la torre de enfriamiento está trabajando en forma eficiente ya que la temperatura de salida (T_{s_Trr}) está dentro del límite establecido por el fabricante para operación óptima de la unidad de absorción (entre 24 y 31°C).

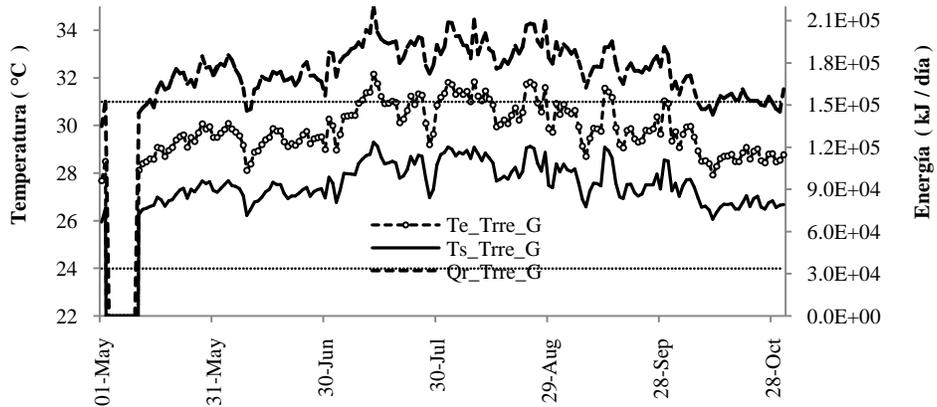


Figura 4.47: Torre de enfriamiento en sistema a gas natural

El agua fría del sistema operado a gas, tiene un buen funcionamiento durante la mayor parte del periodo cálido. El sistema empieza a tener problemas el día crítico (13 de julio), pero es a partir del 2 al 28 de agosto cuando se presenta el mayor problema, ya que el agua fría (T_{e_AF}) tiene un ligero incremento a 8.5°C como se puede observar en la figura 4.47. El incremento de de la temperatura de la T_{e_AF} es debido a la alta temperatura del agua de enfriamiento (T_{s_Trre}) a 29°C , cercano al límite de 31°C . Esto provoca, que la unidad disminuya su capacidad de enfriamiento a 7.6×10^4 kJ/h (ver figura 4.2) y la unidad requiere retirar un promedio diario de 8.8×10^4 kJ/día, por lo que es necesario que durante el periodo crítico la T_{s_Trre} tenga una calidad de 29.5°C ya que su capacidad aumentaría a 1.0×10^5 kJ/h, lo que garantizaría una temperatura de salida del agua fría a 7°C . O bien se podría optar por un incremento de la T_{e_Gen} , lo cual hace que se obtenga una mayor producción de frío sin ser afectada por T_{s_Trre} hasta de 32°C , lo cual se puede ver en la figura 4.2

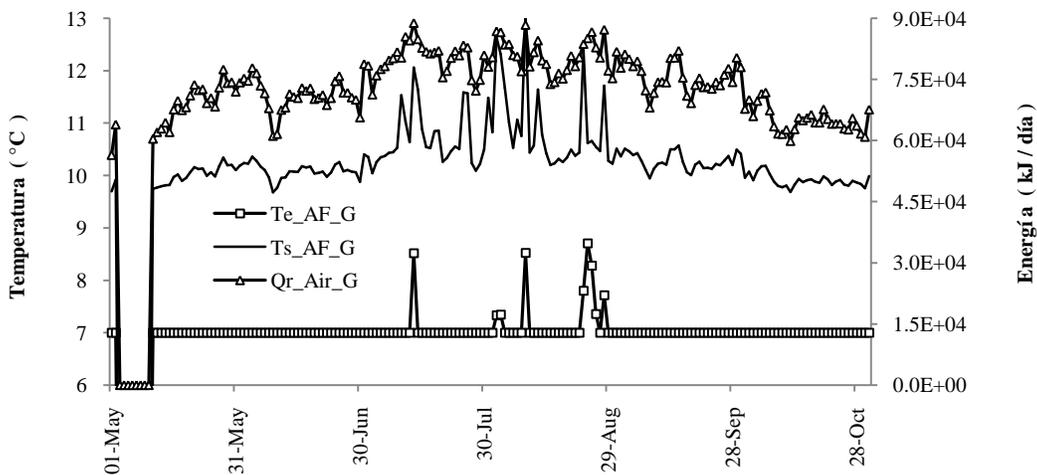


Figura 4.48: Agua fría en sistema a gas natural

Como consecuencia del incremento de la T_{e_AF} se ve afectada la T_{s_AF} obteniendo temperaturas máximas de salida a 13°C , lo cual esta dentro del rango de temperaturas permitidas para el retorno del agua fría al sistema de absorción. Cabe destacar que esto no afecta las condiciones de confort del espacio (PMV_{esp}), como se puede observar en la figura 4.50. Debido a que la extracción promedio diaria de energía a través del agua fría que pasa por las manejadoras es de 8.0×10^4 kJ/día en el periodo crítico de julio y agosto, con una reducción a 7.4×10^4 kJ/día en mayo junio y septiembre y a 6.4×10^4 kJ/día en octubre, la unidad puede proporcionar condiciones confortables durante todo el periodo de demanda de enfriamiento, con una ligera afectación en los días críticos.

El aire frío es el encargado de propiciar *confort térmico* de los espacios, en la figura 4.49 se puede apreciar que la temperatura de salida del aire de las manejadoras se mantiene a una temperatura promedio diaria de 16°C la mayor parte del periodo cálido, con lo que se obtienen temperaturas del aire de las viviendas a un promedio diario de entre 24 y 26°C .

La mayor extracción de energía a través del aire de las manejadoras se da el día 13 de julio con 8.8×10^4 kJ/día y la temperatura de salida del aire de las manejadoras se incrementa a un promedio diario de 16.7°C , debido a la disminución de capacidad de la unidad como ya se mencionó en el apartado anterior, sin embargo se puede observar en la figura 4.49 que la temperatura de entrada del aire (T_{e_Air}) se mantiene a un promedio de 25°C .

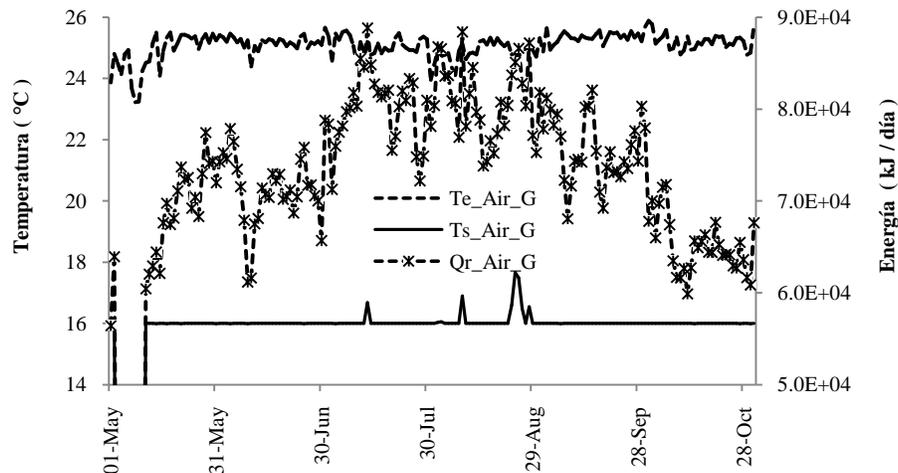


Figura 4.49: Aire frío de manejadora en sistema a gas natural

El espacio como ya se mencionó se mantiene en condiciones confortables (PMV_{esp}) con un valor promedio diario de ± 0.2 durante el periodo cálido como se puede observar en la figura 4.50. En lo que respecta a la relación de PMV con la temperatura del espacio (T_{esp}), se puede observar que se mantiene con valores promedio diarios de entre 24 a 26°C , y con humedades relativas (HR_{esp}) de entre 50 y 60% .

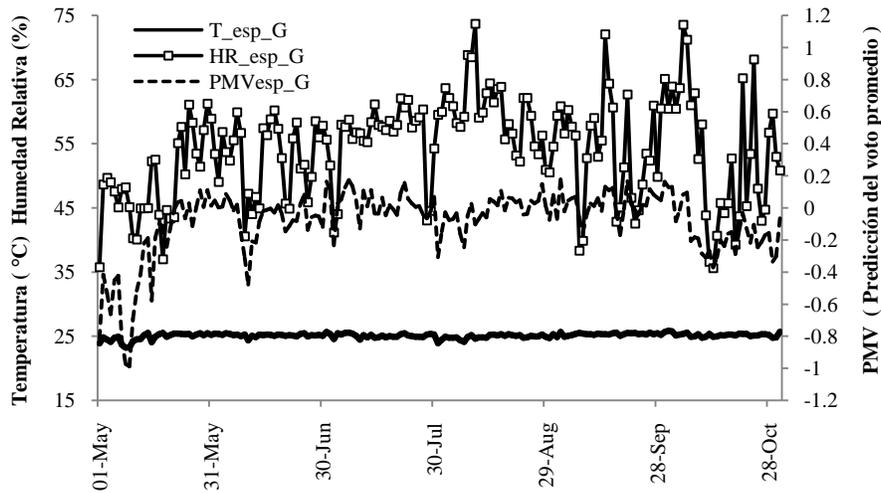


Figura 4.50: Confort térmico del espacio en sistema a gas natural

La eficiencia del subsistema de absorción operado a gas natural, es de un promedio diario de entre 0.72 y 0.73, lo que representa que a partir de una calidad de energía enviada al generador a 80°C y agua de enfriamiento de entre 26 y 29 °C se pueden obtener el COP conforme a lo especificado por fabricante, no obstante, cuando la temperatura del agua de enfriamiento se incrementa a valores cercanos a los 31°C (ver figura 4.47) se ve afectada la eficiencia del sistema de absorción, como se puede observar en la figura 4.51. Los días en que la unidad trabaja con mayor ineficiencia es debido a la disminución de temperatura ambiente e incremento de humedad relativa, que hacen que el sistema de enfriamiento demande menos energía térmica al mismo tiempo que la torre opera en forma ineficiente, produciendo agua de enfriamiento con altas temperatura (ver figura 2.25).

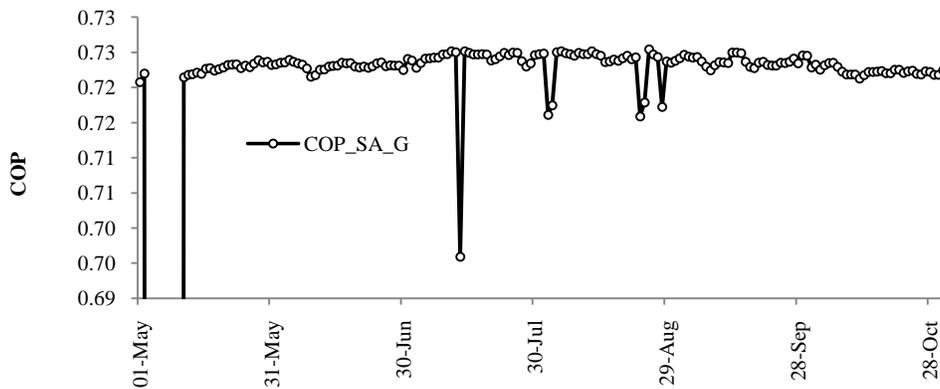


Figura 4.51: COP solar de sistema a gas natural

4.1.7 Comparativo de sistemas de enfriamiento por absorción

En esta sección se realiza un estudio comparativo entre los tres sistemas propuestos, para establecer los elementos técnicos y económicos que permitan seleccionar la mejor opción con tecnologías comerciales actuales. Además permitirá establecer las mejoras desde el punto de vista técnico-económico, para que este tipo de tecnologías puedan competir en el mercado de climatización de espacios.

El campo de colectores y tanque de almacenamiento juegan un papel importante en la calidad de temperatura con que trabajará el sistema de absorción. En la figura 4.52 se muestra el comportamiento operativo de los colectores para cada uno de los escenarios estudiados, que están compuestos de la siguiente manera:

Tabla 4.3: Área de colección y tamaño de tanque de los diferentes escenarios

SISTEMA DE COLECTORES	ÁREA DE COLECCIÓN m ²	TAMANO DE TANQUE m ³
SOLAR	277	16
HIBRIDO	104	6
GAS NATURAL	-	-

Al realizar el *estudio comparativo* de los tres escenarios en un *día normal de operación* se puede observar que el sistema solar, por su mayor área de colección y tamaño de tanque; obtiene temperaturas de salida de los colectores (T_{s_Col}) más altas, en consecuencia mayor obtención de calor útil (Q_{util}), respecto al sistema híbrido que opera al 47% de fracción solar. No obstante debido a que la temperatura de salida del sistema solar excede la temperatura de salida de consigna (105°C) los colectores dejan de operar de las 13 y 15 horas, lo que hace se desaproveche el calor útil en las horas de mayor potencial de radiación solar. Esto representa desaprovechamiento del sistema de colección solar y almacenamiento térmico.

Ahora bien, se puede observar que con el campo de colectores híbrido se tiene un mayor aprovechamiento durante las horas con mayor recurso solar, debido a que la temperatura de salida del tanque (T_{e_Col}) es menor a la temperatura de salida de colectores (T_{s_Col}), obteniendo así operación continua del sistema de colección solar y almacenamiento térmico. Además de que el campo de colectores opera a una mayor eficiencia de colección como se puede observar en la figura 4.52. Sin embargo como consecuencia de la demanda de energía del sistema de enfriamiento (Q_{r_Air}), es necesario el uso de un sistema auxiliar por las horas de ausencia de recurso solar y representa un mayor costo de operación; mientras que con el sistema solar no es necesario el uso de energía auxiliar para la operación continua de las 24 horas del día; lo que es equivalente a un costo operativo nulo.

A partir de lo anteriormente dicho, se puede deducir que aún cuando el sistema de colectores operado en forma solar genera temperaturas mayores en el tanque y operación continua durante las 24 horas, se tiene un mayor desaprovechamiento del sistema de colección solar, además de que, con el sistema solar se incrementa en forma considerable la inversión inicial lo que hace se vuelva una alternativa sin factibilidad económica.

Por el contrario, el sistema híbrido aunque genera temperaturas más bajas del tanque, cubre la demanda de enfriamiento con energía solar durante 16 horas del día y solamente es necesaria la energía auxiliar por 8 horas en el periodo nocturno, que es cuando se tiene una reducción de la demanda de enfriamiento, aunque esto representa un mayor costo de operación.

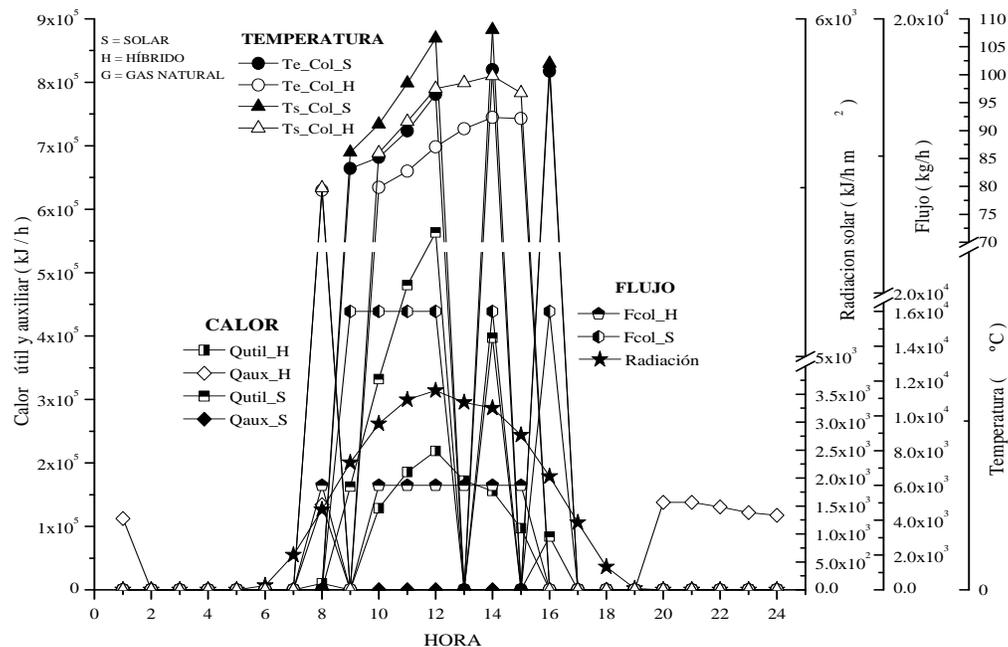


Figura 4.52: Comparación sistema de colección solar e híbrido en día normal

Para la operación eficiente del *sistema de enfriamiento solar por absorción*, es necesario se suministre al generador (T_{e_Gen}) líquido caloportador con temperaturas mayores a 75°C ó de preferencia 80°C , según los estudios mostrados en la figura 4.5. Así mismo, es necesario que la calidad del agua de enfriamiento (T_{s_Trr}) se encuentre a un valor promedio de 29°C , para que se pueda obtener una buena calidad de temperatura del agua fría (T_{e_AF}) a 7°C y como consecuencia una buena capacidad de enfriamiento que mantenga el espacio en condiciones confortables.

En la figura 4.53 se muestra la influencia de el comparativo de los tres escenarios estudiados, en los cuales, se estableció como temperatura de consigna del agua fría 7°C . Se puede observar que en un día de operación normal (ver figura 4.8) con temperaturas máximas de 40°C la unidad de enfriamiento por absorción mantiene 7°C de temperatura durante las 24 horas.

Cabe mencionar, que aún cuando la unidad entrega la T_{e_AF} a la temperatura de consigna preestablecida en los tres casos, se obtienen coeficientes de operación (COP) distintos como se puede observar en la figura 4.54. Esto es debido principalmente a la calidad de la T_{e_Gen} ya que la temperatura del agua de enfriamiento (T_{s_Trr}) en un día normal no presenta variaciones significativas para cada uno de los escenarios. Pero se puede observar que la calidad de la T_{e_Trr} juega un papel importante en el COP de la unidad ya que cuando la T_{s_Trr} disminuye a 28°C (9 horas) y se cuenta con T_{e_Gen} de 80°C se obtiene un COP de 0.75 superior al obtenido con el sistema solar de 0.72 con una T_{e_Gen} de 85°C .

Ahora bien, al analizar la T_{e_Gen} se puede observar que es muy variable para cada uno de los escenarios estudiados ya que en el caso de los tres sistemas se fija la temperatura de consigna a valor óptimo de

80°C. En el caso de la opción solar se puede observar un mayor incremento en la calidad de T_{e_Gen} , obteniendo el valor máximo de temperatura de consigna (105°C), mientras que con el sistema híbrido se obtienen 97°C.

Con base en lo antes expuesto, se puede observar que la calidad de T_{e_Gen} juega un papel importante en el COP de la unidad, ya que cuando la unidad opera con una T_{e_Gen} constante a 80°C se mantiene un COP de 0.72 (COP nominal según el fabricante). Pero si es mayor, disminuye a 0.67 con 97°C y a 0.68 con 105°C como se puede observar en la figura 4.54. Por lo tanto se puede concluir que con T_{e_Gen} mayores (máximo recomendable para la unidad 101°C) se ve mayormente afectado el COP. Sin embargo aunque se obtiene una disminución del COP de la unidad se obtiene una mayor capacidad de enfriamiento (Q_{r_Air}) con T_{e_Gen} más altas ya que se dispone de más energía en el generador, lo cual se puede corroborar a partir de las curvas de operación del fabricante mostradas en la figura 4.2.

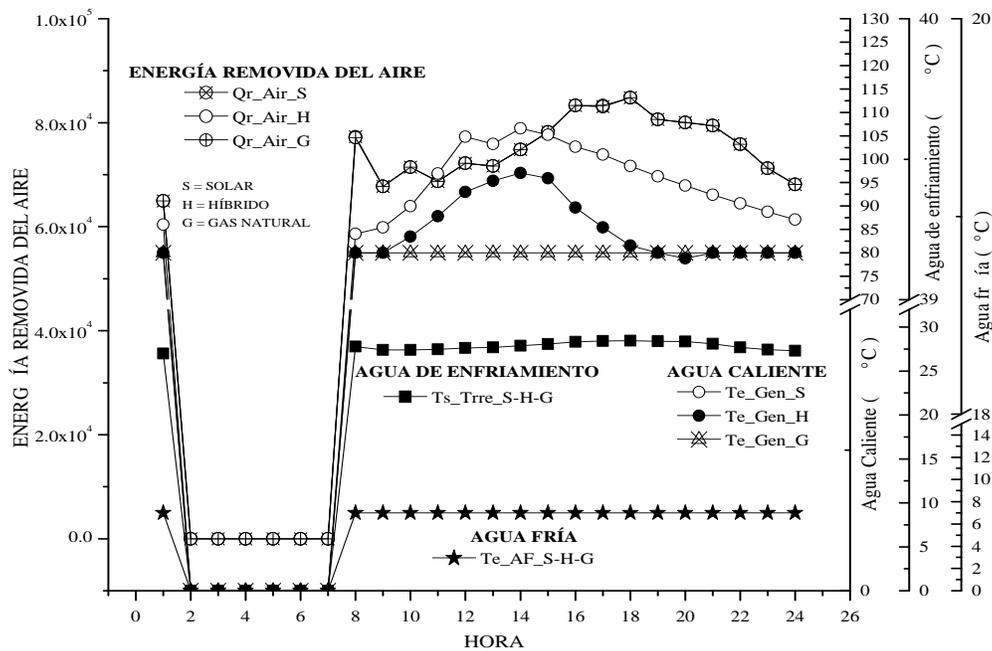


Figura 4.53: Comparativo de calidad de energía en día normal

El **COP solar** de la unidad de aire acondicionado, representa la eficiencia total del sistema, con relación a la eficiencia del campo de colectores y COP de la unidad de absorción. En la figura 4.54 se puede observar que el sistema operado con energía híbrida presenta un mayor COP_{solar} , debido principalmente a que la relación de eficiencia de los colectores y COP de la unidad tiene un buen desempeño, como se puede observar en la figura 4.58.

Más sin embargo, aún cuando se obtienen eficiencias máximas de 0.60 con el sistema híbrido, estas se encuentran lejanas a la máxima eficiencia de 0.86 de los colectores de tubos evacuados utilizados para operación de la unidad solar e híbrida. Esto es debido a la alta temperatura de entrada al campo de colectores.

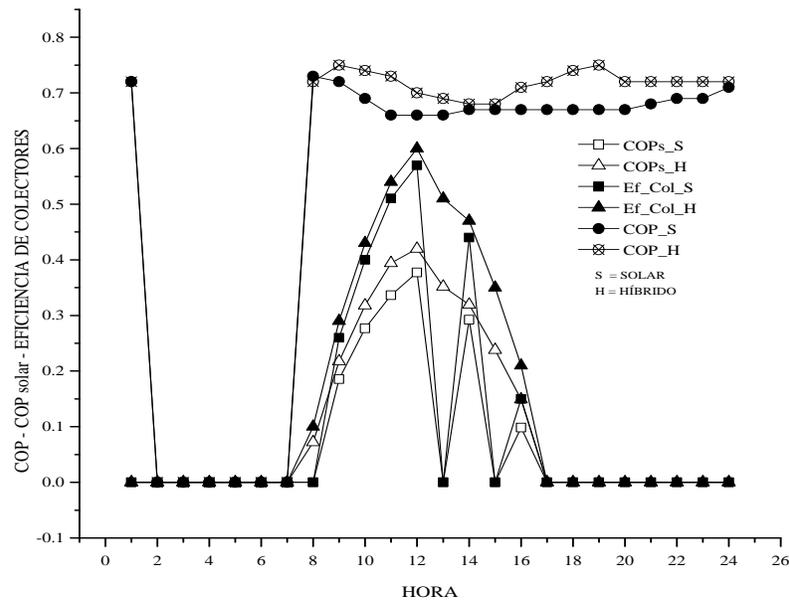


Figura 4.54: Comparativo de COP solar en día normal

El espacio tiene un comportamiento igual en todos los casos en lo que respecta a Temperatura (T_{esp}), humedad relativa (HR_{esp}) y confort térmico (PMV_{esp}) como se puede observar en la figura 4.55. Esto es debido a que la energía térmica a retirar es correctamente cubierta por cada uno de los sistemas propuestos, por lo que la temperatura de salida del agua fría se mantiene con 7°C durante todo el periodo de demanda de enfriamiento lo que hace que las unidades manejadoras trabajen en las mismas condiciones.

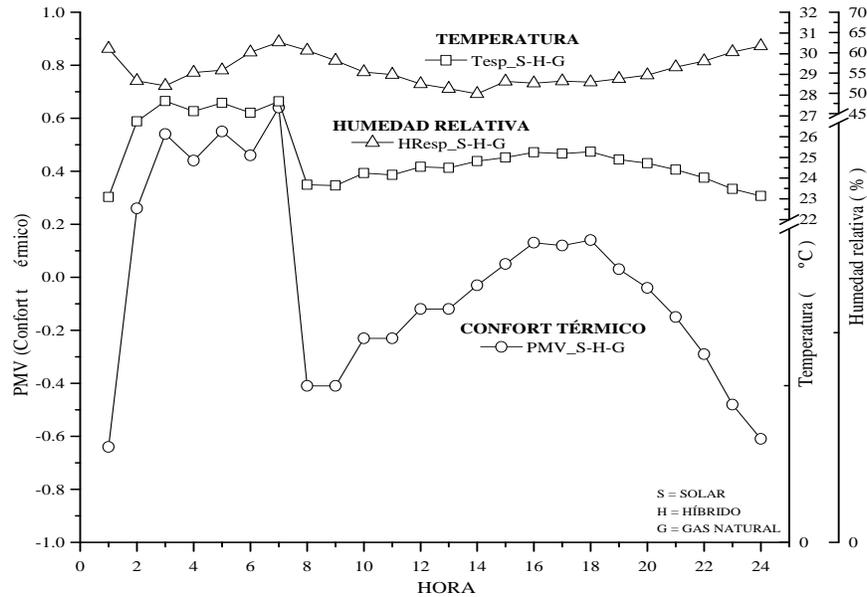


Figura 4.55: Comparativo de confort térmico en día normal

En esta sección se analiza el *comportamiento operativo* de los tres sistemas estudiados con relación al *día crítico* de demanda de enfriamiento para la ciudad de Mexicali, que para el caso del archivo meteorológico utilizado corresponde al 13 julio con temperaturas máximas de 44°C (ver figura 4.13)

A partir de la figura 4.56 se puede observar que el sistema solar obtiene temperaturas de salida de los colectores (T_{s_Col}) más altas y mayor calor útil (Q_{util}) al igual que en un día normal. Pero en este caso, las horas de obtención de calor útil se dan en las mismas horas, por lo que no existe desaprovechamiento del campo de colectores, debido a la alta demanda de enfriamiento que hace que la T_{e_Gen} no supere la temperatura de consigna de 105°C.

En contraposición al día normal, durante el día crítico se tiene una diferencia menos significativa, ya que el campo de colectores opera con pequeñas diferencias en la eficiencia de colección como se puede observar en la figura 4.58. Sin embargo como consecuencia de la demanda de energía del sistema de enfriamiento, en este caso, si es necesario el uso de energía auxiliar tanto en el sistema solar como en el híbrido. En el caso del sistema solar, solamente se requiere de calor auxiliar por 4 horas entre las 3 y 8 horas, mientras que el híbrido demanda auxiliar por 14 horas, que coinciden mayormente con las horas de ausencia de recurso solar. Por lo tanto en términos económicos el mayor uso de energía auxiliar representa un mayor costo operativo para el caso del sistema híbrido durante los días críticos.

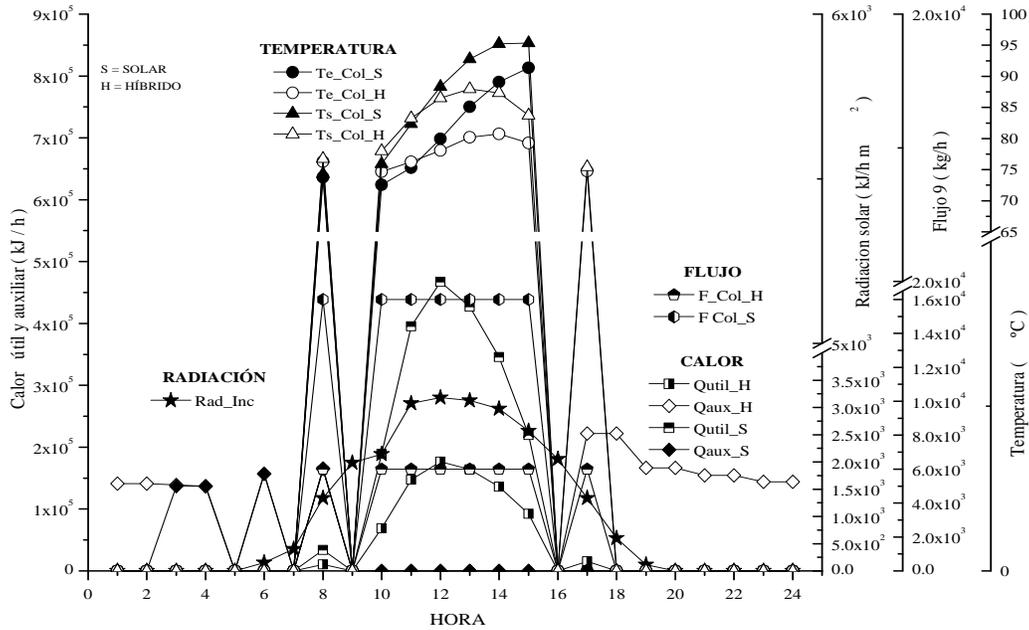


Figura 4.56: Comparación sistema de colección solar e híbrido en día crítico

En lo que respecta a la operación del sistema de enfriamiento solar por absorción a través de Q_{util} , durante el día crítico, se puede observar que la T_{e_Gen} del sistema solar es mayor a 80°C de las 11 a las 21 horas, lo que representa que se tendría una autosuficiencia de solamente 4 horas posteriores a la última captación de Q_{util} . En el caso del sistema híbrido se requiere de Q_{aux} aún en horas de disponibilidad de recurso solar (R_{ad_Incl}).

Por otra parte la temperatura del agua fría (T_{e_AF}), a diferencia del día normal, en el crítico se ve mayormente afectada de las 16 y 18 horas, sobre todo en la unidad de absorción operada a gas natural e híbrida como se puede observar en la figura 4.57. Esto debido principalmente a que la T_{e_Gen} en combinación con la temperatura del agua de enfriamiento (T_{s_Ttre}) hace que la unidad tenga menor capacidad respecto a la nominal de 1.2×10^5 kJ/h (35.2 kW). En el caso del sistema solar la máxima capacidad de enfriamiento es de 1.6×10^5 kJ/h (45.56 kW), al operar con T_{e_Gen} de 95°C y agua de enfriamiento a 29.5°C, lo cual puede ser observado en la figura 4.2. Por lo tanto para el caso de los días críticos, si se opera con la misma T_{s_Ttre} será necesario incrementar ligeramente la temperatura de consigna del auxiliar a 85°C para tener una capacidad de enfriamiento de 1.3×10^5 kJ/h (36.11 kW), ligeramente superior a la capacidad nominal de 1.2×10^5 (35.2 kW).

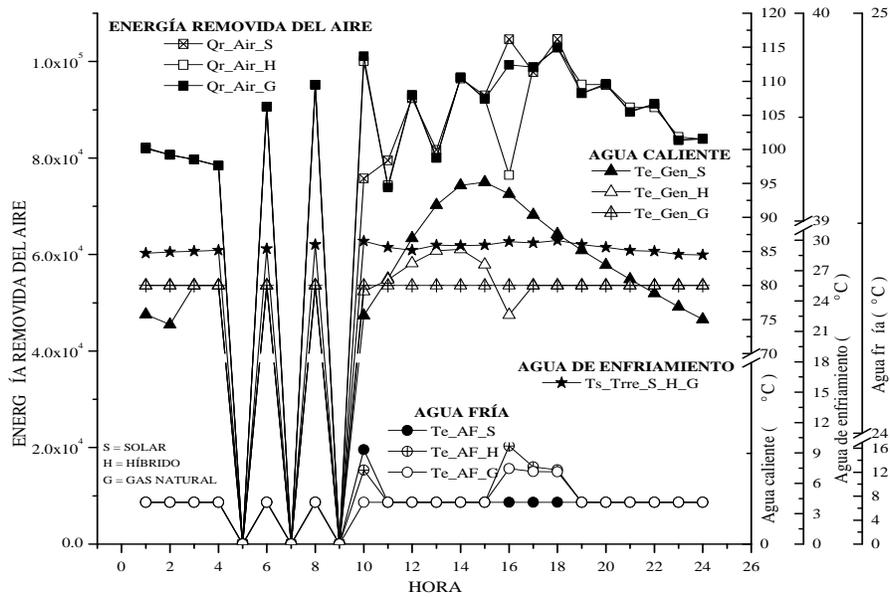


Figura 4.57: Comparativo de calidad de energía en día crítico

El *COP solar* de la unidad híbrida, en el día crítico también representa la de mayor ventaja debido principalmente a que la relación de eficiencia de los colectores y COP de la unidad tiene un buen desempeño, como se puede observar en la figura 4.58, sin embargo no se presenta una diferencia significativa. Sin embargo, durante el día crítico se reduce aún mas el *COP_{solar}* a un máximo de 0.38 respecto al día normal que cuenta con un *COP_{solar}* de 0.60, como se puede observar en la figura 4.54.

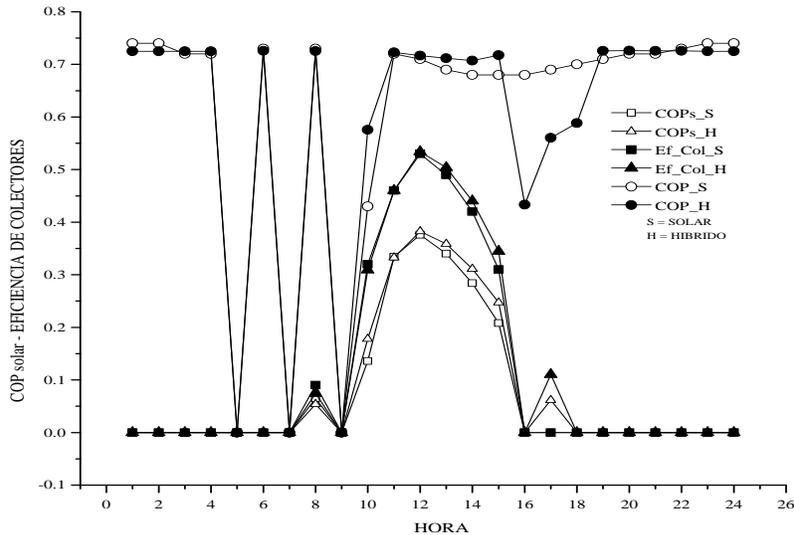


Figura 4.58: Comparativo de COP solar en día crítico

El *espacio*, durante el día crítico presenta pequeñas diferencias entre las tres alternativas estudiadas y esto es consecuencia de los fenómenos explicados anteriormente. El de mayor afectación es el sistema híbrido, sobre todo entre las 6 y 7 horas ya que se presenta un incremento de la humedad relativa que hace incrementar el nivel de confort del espacio (PMV_{esp}) a 0.90 muy cercano al límite de confortablemente caliente. Otro de los periodos del día con afectación, es en el periodo de máxima demanda de enfriamiento entre las 16 y 17 horas ya que presenta valores de PMV_{esp} similares a los antes mencionados, además que en este caso la temperatura del espacio se incrementa al valor máximo de consigna de 28°C, como se puede observar en la figura 4.59.

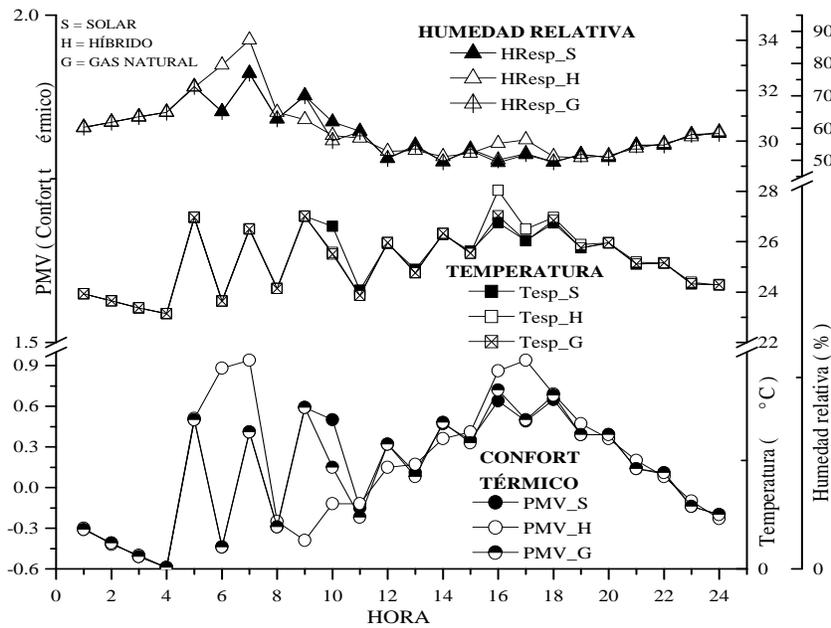


Figura 4.59: Comparativo de confort térmico en día normal

4.2 Sistema de calefacción por piso radiante y agua caliente

4.2.1 Descripción del sistema

El piso radiante es parte integral del sistema de climatización y agua para uso doméstico, por lo que comparte el sistema de colección solar y el tanque de almacenamiento. En la figura 4.60, se muestra el esquema de conexión.

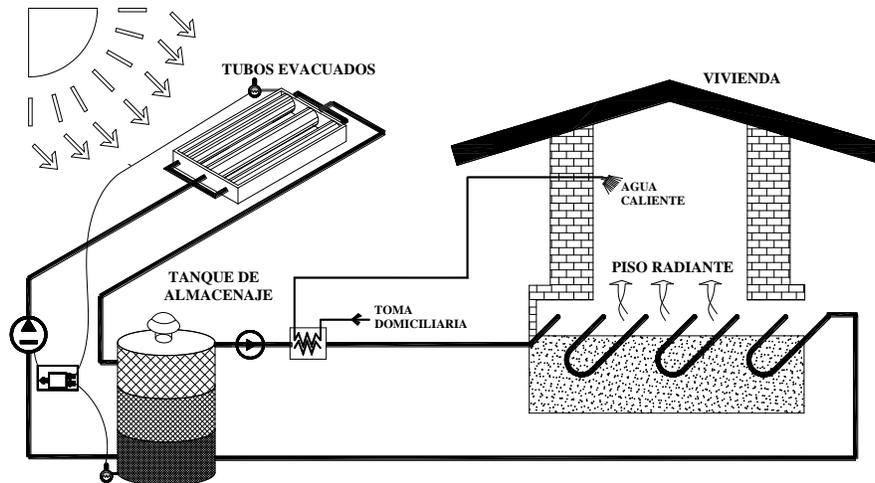


Figura 4.60: Sistema de piso radiante

4.2.2 Método de simulación

Para dimensionar y conocer el comportamiento operativo del sistema de calentamiento por piso radiante, se elaboró una estrategia de simulación utilizando TRNSYS 16. En la tabla 4.4, se muestran los componentes utilizados en la simulación.

Tabla 4.4: Componentes utilizados para simulación de piso radiante

COMPONENTE	No. Componente
Archivo meteorológico	109
Colector de tubos evacuados	538
Tanque almacenamiento térmico	4
Bomba de flujo constante	3
Control encendido/apagado	2
Divisor y mezclador de flujo	11
Propiedades del aire ambiente (psicométrica)	33
Temperatura efectiva del cielo	69
Edificio	56
Volumen de agua para uso doméstico	14
Intercambiador de calor agua/agua	5

Una vez determinados los componentes a utilizar en la simulación del piso radiante, se procedió a la optimización del sistema de calentamiento con base al método mostrado en la figura 4.61.

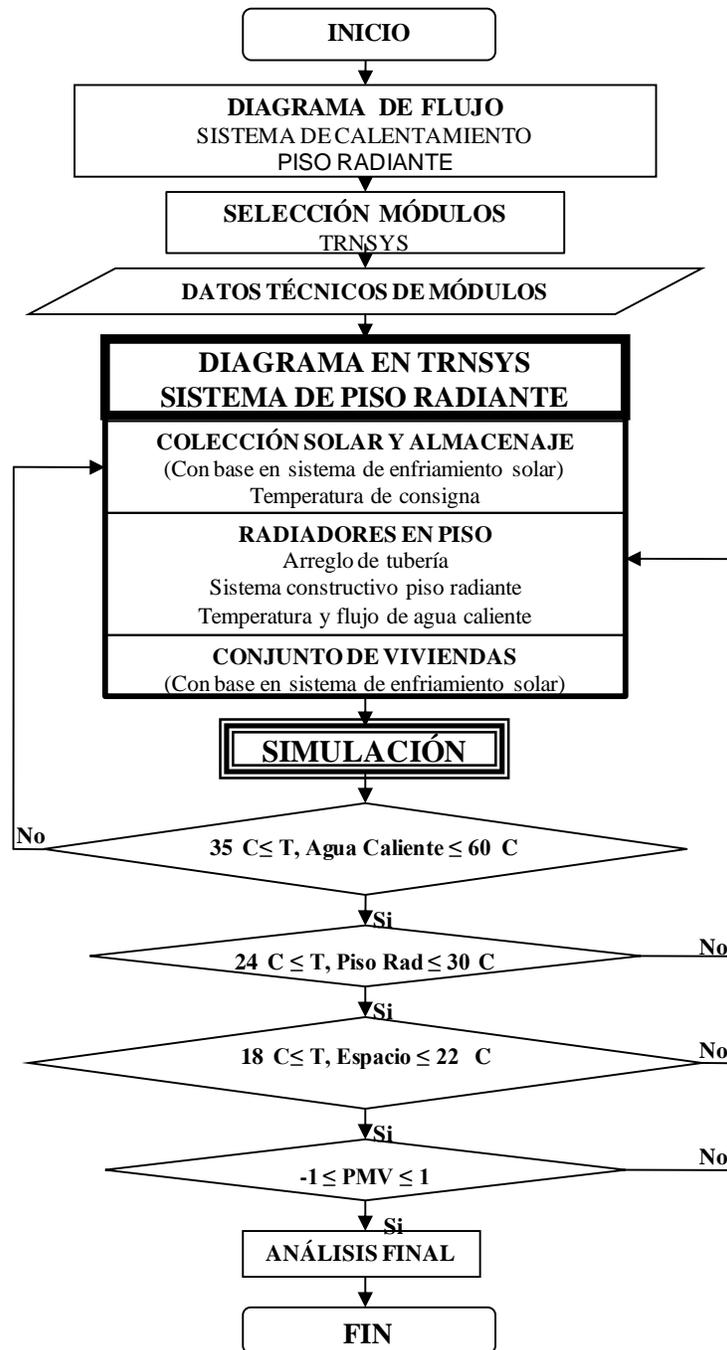


Figura 4.61: Diagrama de flujo para sistema de piso radiante

Analizando el diagrama de la figura 4.61, se puede apreciar que las condicionantes básicas a cumplir para que el sistema de piso radiante opere en condiciones óptimas son:

- Temperatura de salida del agua caliente del tanque entre 35 y 60°C, si esta condición se cumple se verifica la temperatura de consigna del control de temperatura del sistema de colección.
- Temperatura de superficie del piso radiante entre 24 y 30°C, si esta relación no se cumple, será necesario verificar la resistencia térmica del sistema constructivo del piso radiante, además de la temperatura y flujo del agua caliente.
- Temperatura del espacio entre 18 y 22°C, si esta condición no se cumple, será necesario verificar la resistencia térmica del sistema constructivo del piso radiante, además de la temperatura y flujo del agua caliente.
- Condiciones de confort térmico del espacio según norma (ISO-7730, 2005), con PMV (Predicción del voto promedio) entre ± 1 (-1 confortablemente caliente, 1 confortablemente frío).

4.2.3 Propuesta de distribución de piso radiante en vivienda

Para conseguir una distribución uniforme del calor a lo largo de la superficie de la vivienda se propuso la configuración en espiral como se puede observar en la figura 4.62. Cabe destacar que la distribución en espiral mantiene la temperatura del espacio uniforme.

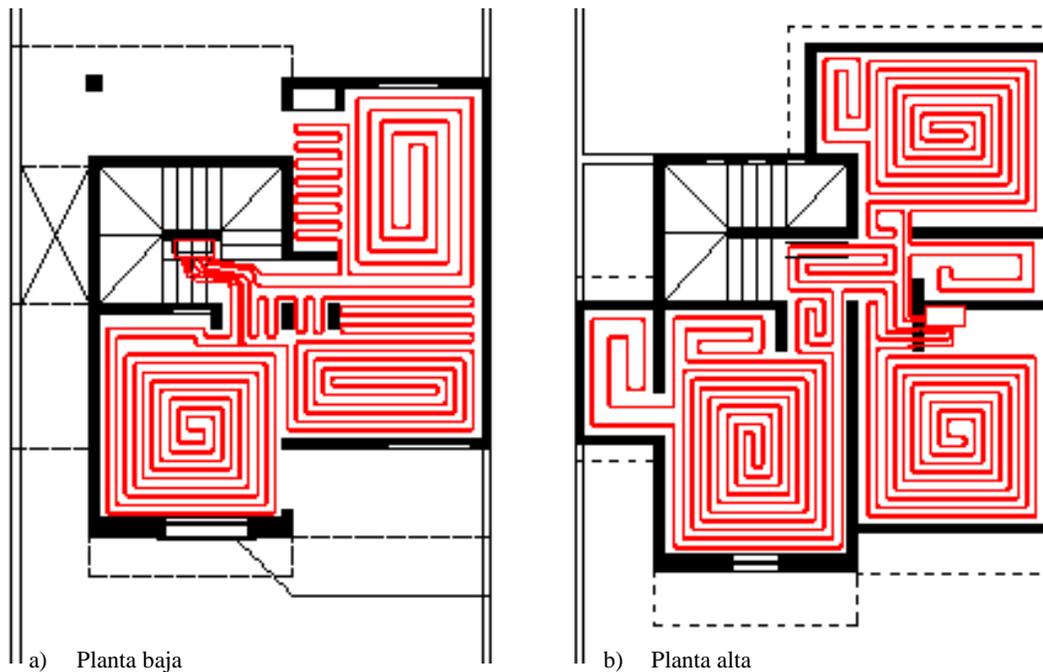


Figura 4.62: Distribución de tubería de piso radiante

4.2.4 Comportamiento operativo del piso radiante

En esta sección se realiza la descripción del comportamiento operativo del sistema de calentamiento por piso radiante de la vivienda energéticamente sustentable. El estudio se realiza a partir de un análisis horario en el día más frío (día crítico) y en un día de operación normal. Además se analiza el comportamiento promedio horario diario del sistema durante el periodo de demanda de calentamiento de enero a abril y de noviembre a diciembre.

El comportamiento operativo del piso radiante y el agua caliente para uso doméstico en un día normal (27 de enero) del periodo frío se describe a continuación. En la figura 4.63 se muestra que durante el día crítico la temperatura ambiente oscila entre los 7 y 20°C, con humedades relativas de entre 21 y 50%. La disponibilidad de recurso solar muestra un día claro con radiación máxima de 652 W/m² (2347 kJ/h m²).

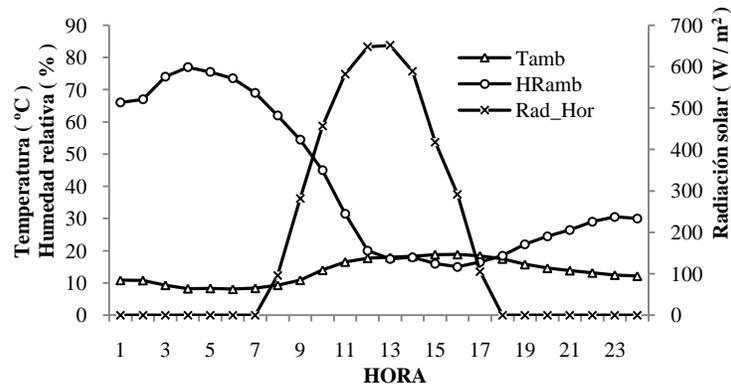


Figura 4.63: Clima en día normal de invierno

El *área de captación solar y tanque de almacenamiento*, depende del área definida para operación del sistema de enfriamiento por absorción híbrido. Esto debido a que el sistema de calentamiento por piso radiante es un complemento para generar condiciones de confort durante los meses fríos de la ciudad de Mexicali.

En la figura 4.64, se muestra que el sistema de colección trabaja en forma intermitente durante un día normal, debido a que la demanda de agua caliente para piso radiante es baja respecto de la energía disponible en el tanque de almacenamiento. Esto provoca que el tanque de almacenamiento incremente su temperatura rápidamente a la temperatura de consigna (60°C), establecida según Watson *et al.*, (2002). Además se puede observar que durante las horas con mayor disponibilidad de recurso solar (13 a 14 horas), el sistema de colectores queda desaprovechado, ya que se deja de obtener calor útil. El periodo con mayores demandas de agua caliente se da de las 6 a las 12 horas y se obtiene una pérdida de temperatura del tanque de almacenamiento de 13°C respecto a la temperatura de consigna.

La calidad de energía de salida del intercambiador de calor agua/etilenglicol-agua que da suministro al sistema de agua para uso doméstico muestra valores de entre 31 y 44°C, la mayor disminución de temperatura de salida del agua para uso doméstico se da en el periodo de las 20 y 21 horas, ya que es cuando se tiene mayor demanda de agua para uso doméstico con flujos de entre 25 y 28 k/h.

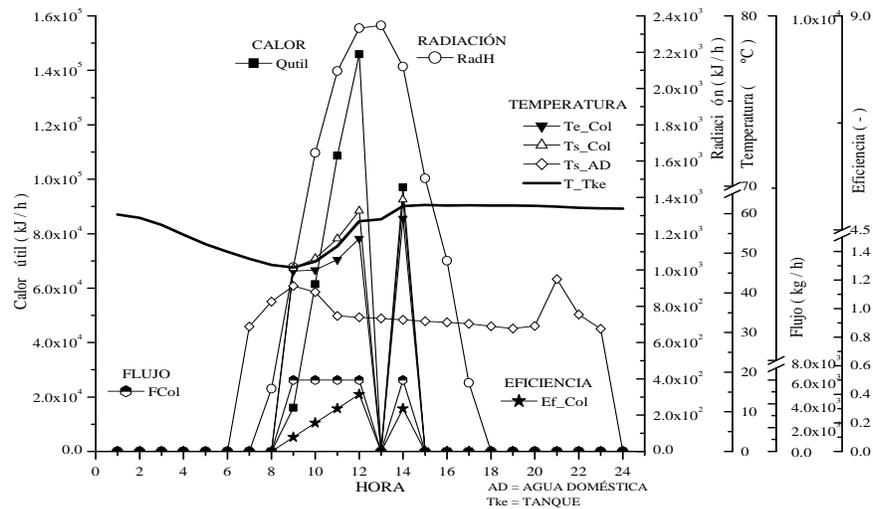


Figura 4.64: Sistema de colección para piso radiante, día normal

El *piso radiante* tiene la mayor demanda de calentamiento del espacio entre las 6 y 12 horas ya que la temperatura ambiente oscila entre los 8 y 17°C y es necesario incrementar la temperatura del espacio a valores de entre 18 y 22°C (ver tabla 2.2), lo cual se cumple, según lo mostrado en la figura 4.65.

El periodo en el que el piso radiante trabaja con mayor demanda de calentamiento es de las 2 a las 5 horas con una máxima de extracción de 3.5×10^4 kJ/h. Durante estas horas, la temperatura de la superficie del piso radiante disminuye en 4°C, por debajo de la temperatura recomendada de 24°C (ver tabla 2.2), sin embargo el aire del espacio se mantiene dentro de los límites especificados como se mencionó anteriormente.

Por otro lado durante el periodo de las 13 a las 21 horas la temperatura del espacio se incrementa a valores de entre 23°C, lo cual supera en 1°C la temperatura recomendada como se puede observar en la tabla 2.2. Esto se debe que la alta disponibilidad de recurso solar que hace que la temperatura del tanque se mantenga en la temperatura de consigna y el edificio no requiere de altos suministros de calor ya que la envolvente arquitectónica incrementa la temperatura de las superficies por medio de la radiación solar disponible; lo que genera un incremento de la temperatura del espacio. En lo que respecta a las condiciones de humedad del espacio se aprecia que el sistema no genera baja humedad relativa respecto a la humedad encontrada en el aire exterior, de tal manera que no se produce reseca de las mucosas por efecto de calentamiento por piso radiante.

Con relación a la escala de confort ISO-7730(2005), el comportamiento del espacio se encuentra en términos de PMV con valores que oscilan entre 0.4 y 1, lo que indica condiciones del espacio entre confort y confortablemente caliente (0 a 1) la mayor parte del día. Los mayores valores de PMV_{esp} se dan entre las 14 a las 19 horas, debido a la aportación de calor a la envolvente como ya se mencionó anteriormente.

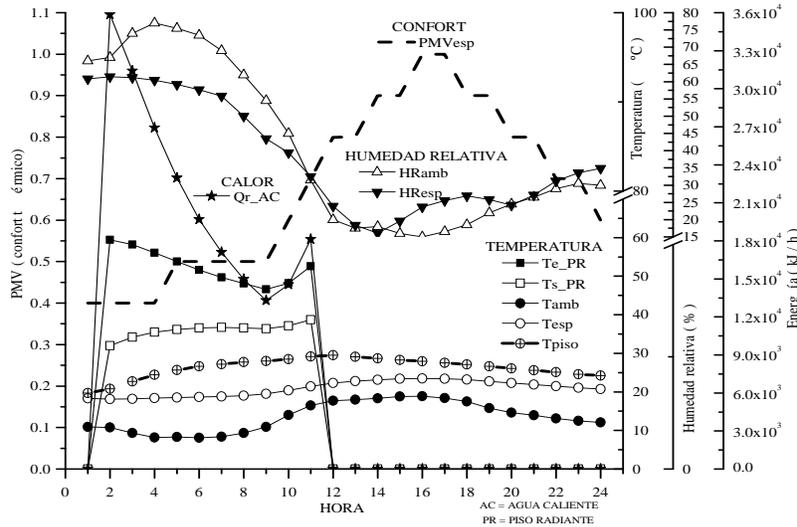


Figura 4.65: Confort térmico piso radiante, día normal

El comportamiento operativo del piso radiante y el agua caliente para uso doméstico en un día crítico (29 de diciembre) del periodo frío se describe a continuación. En la figura 4.66 se muestra que durante este día la temperatura ambiente oscila entre los 2 y 15°C con humedades relativas de entre 25 y 60%. La disponibilidad de recurso solar muestra un día claro con radiación máxima de 611 W/m^2 (1840 kJ/h m^2).

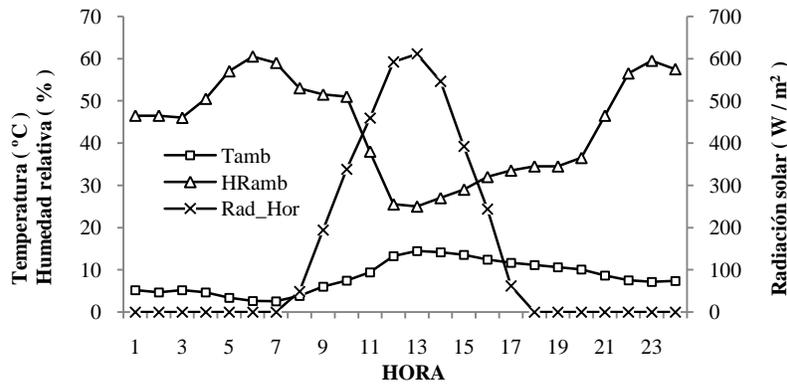


Figura 4.66: Clima en día crítico de invierno

El área de captación solar y tanque de almacenamiento, para el día crítico se describen a continuación. En la figura 4.67 muestra que el sistema de colección al igual que el día normal trabaja en forma similar, esto debido a que el campo de colectores mantiene el tanque de almacenamiento con buena calidad de energía, durante este día, además de que también se tiene desaprovechamiento de calor útil a las 14 horas debido a que el líquido caloportador del tanque llega la temperatura de consigna. El periodo con mayores demandas de agua caliente se da en el periodo de las 8 a las 11 horas, lo cual hace que el tanque disminuya su temperatura a 39°C a las 9 horas.

La calidad de energía de salida del intercambiador de calor agua/etilenglicol-agua que da suministro al sistema de agua para uso doméstico muestra valores de entre 31 y 44°C, la mayor disminución de temperatura de salida del agua se da en el periodo de las 19 horas, debido a la alta demanda de agua caliente para uso doméstico.

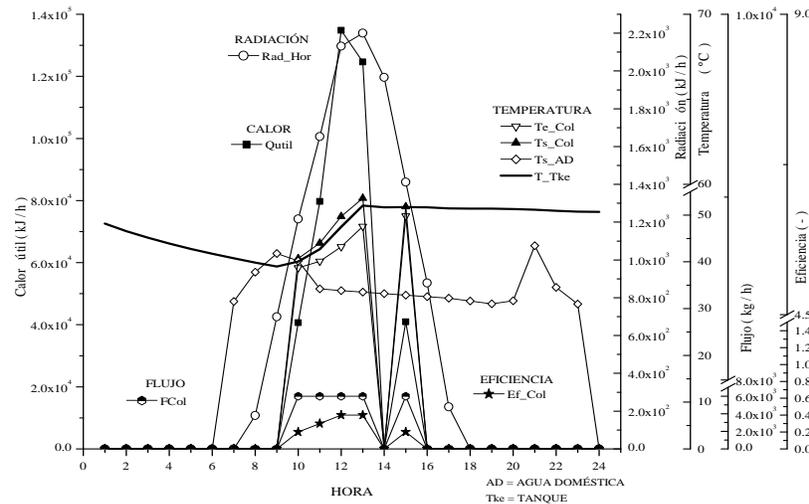


Figura 4.67: Sistema de colección para piso radiante, día crítico

La máxima demanda de calentamiento al *piso radiante* se da la 1 a las 5 horas, con un máximo requerimiento de energía de 1.9×10^4 kJ/h a la hora 1 como se puede apreciar en la figura 4.68. Esto debido a que durante estas horas la temperatura oscila entre los 2 y 6°C.

La temperatura de la superficie del piso radiante se mantiene dentro del límite recomendado (24 y 30°C). A partir de la temperatura del piso radiante el espacio se mantiene con temperaturas de entre 18 y 22°C, lo que significa una condición óptima según lo mostrado en tabla 2.2, con humedad relativa entre 20 y 43%.

En términos de escala de confort ISO-7730(2005), las condiciones antes descritas permite mantener el espacio en términos de PMV con valores que oscilan entre 0.2 y 0.8, lo que indica condiciones del espacio entre confort y confortablemente caliente (0 a 1) durante todo el día.

El periodo en el que el espacio se mantiene dentro de confort óptimo es de la primera hora hasta las 12 y a partir de entonces el espacio se mantiene en el rango de confortablemente caliente hasta las 24 horas. El incremento del PMV por las horas de la tarde es debido a la disponibilidad de radiación solar que hace se caliente la envolvente del edificio y el adecuado diseño de la ventanas permitan una mayor ganancia de calor al espacio interior.

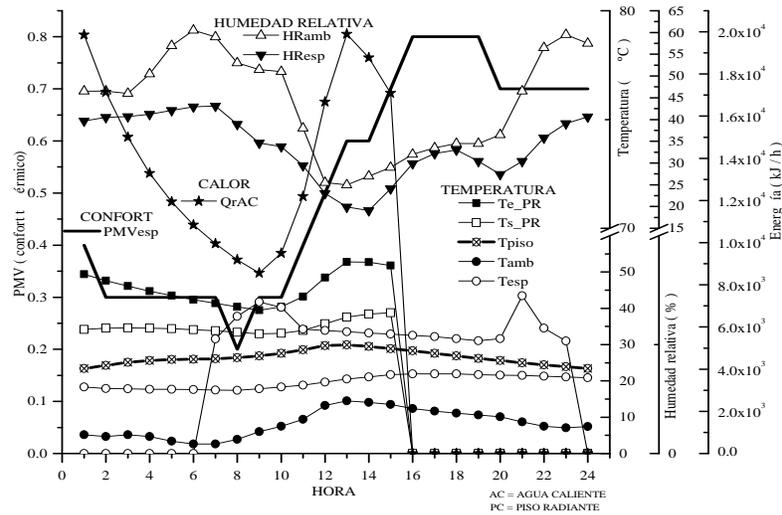


Figura 4.68: Confort térmico piso radiante, día crítico

Para tener un conocimiento del comportamiento del sistema de *piso radiante durante el periodo de demanda de calentamiento* se realiza un análisis promedio diario horario del sistema. El estudio se realiza a partir de un análisis del sistema de colección y almacenamiento térmico, energía suministrada por el piso radiante, temperatura de la superficie del piso radiante y el confort térmico del espacio.

La *captación solar* del sistema de colectores es la base para el buen funcionamiento del sistema de piso radiante. El dimensionamiento del sistema de colección fue determinado con base en el arreglo utilizado para el sistema de enfriamiento solar, pero a una temperatura de consigna a 60°C ya que el piso radiante no debe trabajar con temperaturas mayores.

En la figura 4.69, se muestra que el *tanque de almacenamiento* mantiene temperaturas promedio diarias de entre 60 y 65°C durante el mes de marzo, abril y noviembre ya existe una menor demanda de calentamiento. En los meses de diciembre, enero y febrero la temperatura del tanque disminuye a temperaturas promedio horarias diarias de 55°C, como consecuencia de mayor demanda de calentamiento. Los periodos en los que el tanque de almacenamiento se ve fuertemente afectado por las condiciones ambientales es del 29 al 31 de diciembre con una temperatura mínima del tanque de 34°C, del 1 al 5 y del 21 al 24 de enero con temperatura mínima de 38°C y del 24 de febrero al 3 de marzo con temperatura mínima de 39°C. Dicha disminución de temperaturas afecta en forma significativa tanto al sistema de piso radiante como al sistema de calentamiento de *agua para uso doméstico* como se puede observar en la figura 4.69.

La captación promedio diaria de *calor útil* durante el periodo cálido es de 2.6×10^5 kJ/día. La mayor captación se da en el periodo con mayores demandas de energía debido a la extracción de energía tanto del piso radiante como del sistema de calentamiento de agua para uso doméstico, que hace que disminuya en forma significativa la temperatura del tanque de almacenamiento. La *eficiencia* promedio a la que se obtiene el calor útil es de 0.28 durante el periodo, con eficiencias promedio de máximas de 0.54 y promedio de mínimas de 0.13.

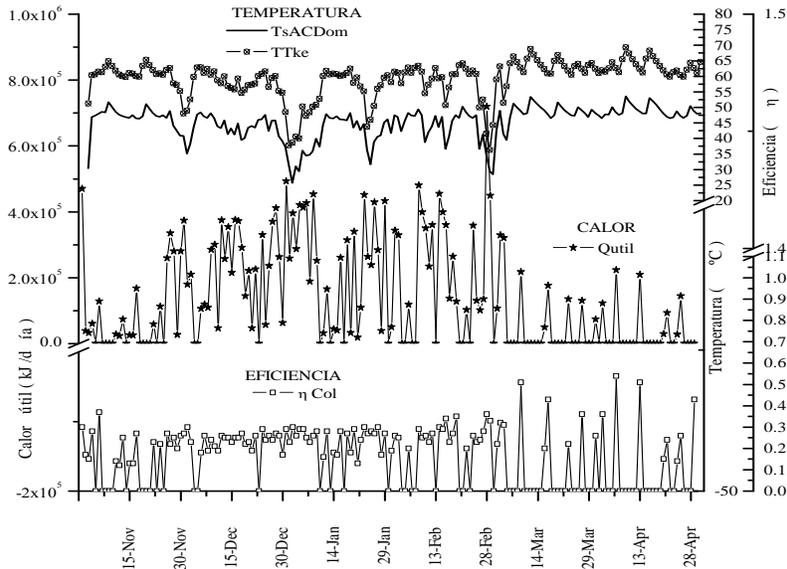


Figura 4.69: Sistema de colección piso radiante en invierno

La energía suministrada a través del piso radiante a la planta alta, es de un promedio de 1.6×10^5 kJ/día en el periodo frío como se puede observar en la figura 4.70, sin embargo del 1ro al 25 de noviembre y del 5 de marzo al 30 de abril las condiciones de temperatura del espacio no requieren suministro de energía para mantener condiciones de confort. El periodo con mayores demandas de energía es a partir del 27 de diciembre al 7 de enero y se puede observar que durante este periodo la energía disponible en el tanque llega a valores mínimos de almacenamiento de energía, como consecuencia de las grandes demandas de energía.

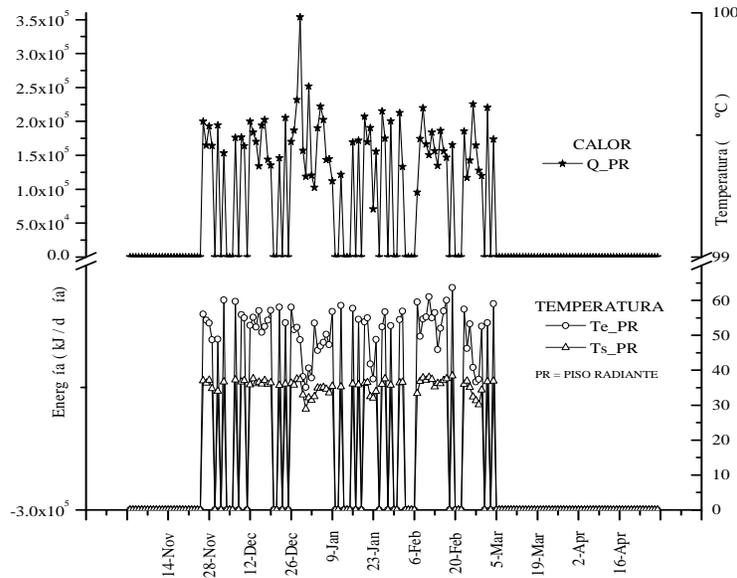


Figura 4.70: Aportación de calor piso radiante en invierno

Para mantener *el espacio* en condiciones confortables es necesario que la *temperatura de la superficie de piso radiante* permanezca entre 24 y 30°C. En el caso del sistema propuesto la temperatura de la superficie presenta valores promedio horario diarios de entre 21 y 28°C, lo que representa un decremento de 3 gados por debajo de la temperatura mínima recomendada.

Sin embargo a partir de la superficie del piso radiante se obtienen temperaturas promedio horarias diarias del espacio de entre 18 y 22°C durante el periodo de máxima demanda de calentamiento (26 de noviembre al 4 de marzo), lo cual coincide con los resultados reportados por Watson R., (2002). Mientras que la temperatura ambiente oscila con temperaturas promedio horarias diarias de entre 8 y 18°C con humedades relativas entre 25 y 60%.

La relación de *confort* según la norma ISO-7730(2005) muestra que el sistema de piso radiante provee PMV con valores promedio horario diarios de entre 0.40 y 0.90 (ver figura 4.71), y pertenecen al rango de confortable (0) a confortablemente caliente (1). Por otro lado en el periodo del 1ro al 23 de noviembre el espacio incrementa su temperatura como consecuencia de las condiciones ambientales, lo cual, hace que el espacio incremente el valor de PMV a valores de entre 1 y 1.65 (de confortablemente caliente a caliente). Otro periodo con características similares en PMV se da a partir del 8 de marzo al 30 de abril, con valores que oscilan entre 0.65 y 1.5.

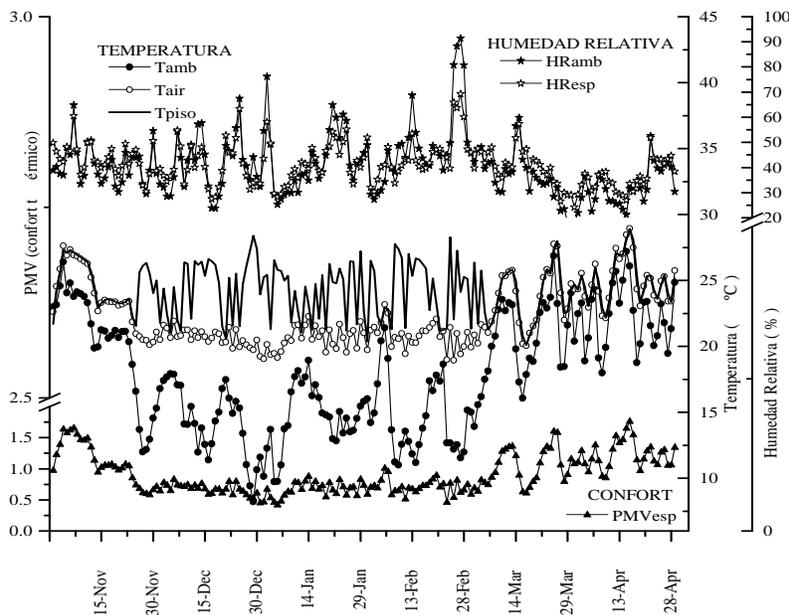


Figura 4.71: Confort de espacio en invierno

CAPITULO 5. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

La evaluación económica es un instrumento de uso prioritario en la etapa de anteproyecto de una vivienda energéticamente sustentable, ya que ayuda en la toma de decisiones y proporciona información a los inversionistas en la asignación de recursos para implementar tecnologías energéticas limpias en las edificaciones.

La viabilidad de proyectos de inversión se determina en la mayoría de los casos a partir de los siguientes indicadores: Valor actual neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), relación costo beneficio ($R_{C/B}$), y tiempo de recuperación de la inversión (TR). (Sapag, 2003; Sørensen, 2004). Estos indicadores económicos permiten dar una medida ajustada de la rentabilidad que podemos obtener con el proyecto de inversión, antes de ponerlo en marcha. También permite comparar con otros proyectos similares y realizar cambios oportunos para hacer una propuesta más rentable.

Por tanto, en esta sección se realiza la evaluación económica utilizando estos indicadores, para llegar a una toma de decisión y demostrar el beneficio económico, además del social y ambiental para la comunidad de Mexicali al implementar este tipo de proyectos. La toma de decisión para que un proyecto solar se considere rentable debe cumplir siguiente condiciones (CONAE, 2007):

- El VPN debe ser mayor que cero
- La $R_{C/B}$ debe ser igual o mayor que uno,
- La TIR debe ser igual o mayor que la tasa de descuento,
- Período de recuperación de la inversión debe ser al menos la mitad del período de vida útil del sistema.

5.1 Técnicas de evaluación económica

Existen varios métodos para la evaluación económica que determinan la rentabilidad de un proyecto, los cuales, permiten contar con bases de comparación que apoyan en la decisión al seleccionar la mejor opción cuando se comparan varios proyectos. Los métodos seleccionados para evaluar cada uno de los indicadores económicos se presentan a continuación.

5.1.1 Valor presente neto

A partir de este indicador es posible medir en forma sencilla, la rentabilidad económica del proyecto evaluado. Con este indicador, se determina la equivalencia en el año 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y se compara esta inversión con la inversión inicial, para ver si los ingresos son mayores que los egresos.

Cuando dicha equivalencia es mayor que la inversión inicial; o sea si este valor es positivo es recomendable que el proyecto sea aceptado. De acuerdo a lo anterior el VPN de un proyecto estará dado por la ecuación 1 (IEE, 2006) :

$$VPN = I_0 + \sum_{t=1}^{Vu} \frac{I_t}{(1+i)^t} - \frac{VR_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

donde:

I_0	Inversión inicial
I_t	Flujo de efectivo de gastos implicados en el período t
Vu	Período de vida útil
i	Tasa de inflación
VR_n	Valor de rescate en el año t

En caso de conocer el costo inicial de algún insumo y se tiene la necesidad de conocer su *valor futuro*, sobre todo, si representa un gasto que se realizará en algún año específico de la vida útil del estudio económico; entonces se puede estimar a partir de la ecuación 2 (Sapag, 2003) :

$$VF = VA(1 + i)^t \quad (2)$$

donde:

VF	Valor futuro
VA	Valor actual
i	Tasa de inflación
t	Número de año en que se realizará la inversión

5.1.2 Tasa interna de retorno

La tasa interna de rendimiento ó tasa interna de retorno (TIR), como se le llama frecuentemente, es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Está definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, el valor futuro, o el valor anual equivalente de una serie de ingresos y egresos.

La tasa interna de rendimiento representa en términos económicos el porcentaje o la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, en cualquier punto del tiempo de la vida de un proyecto. El proyecto será rentable si la TIR es mayor o por lo menos igual a la tasa de rendimiento mínima atractiva.

El cálculo de la TIR requiere por lo general una solución de prueba y error, se obtiene manualmente, a partir de la ecuación de VPN de una serie de flujos de efectivo igualándola a cero a partir de la ecuación 3 (IEE, 2006) .

$$VPN = \sum_{t=1}^{Vu} \frac{I_t}{(1+TIR)^t} - \frac{VR_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (3)$$

5.1.3 Relación costo / beneficio

Este método se usa para expresar la diferencia neta entre los beneficios y costos de un proyecto, en función del valor presente neto. Si la relación beneficio costo de un proyecto es mayor o al menos igual a uno, el proyecto se considera rentable y puede ser calculado a partir de la ecuación 4 .

$$R_{C/B} = \frac{VPN_{in}}{VPN_{eg}} \quad (4)$$

donde:

$R_{C/B}$	Relación Costo Beneficio
VPN_{in}	Valor Presente Neto de ingresos
VPN_{eg}	Valor Presente Neto de egresos totales

5.1.4 Período de recuperación de la inversión

Este indicador es uno de los criterios tradicionales de evaluación económica. El período de recuperación es el tiempo mínimo que toma recuperar el costo de inversión. Para un sistema de energía se calcula a partir de la ecuación 5, como el costo total de inversión dividido por los ingresos de los primeros años, una vez descontada la tasa de descuento considerada para el estudio (Tsoutsos *et al.*, 2003) .

$$PR = \frac{\log \left[\frac{I_0}{BA} \frac{i}{100} + 1 \right]}{\log \left(1 + \frac{i}{100} \right)} \quad (5)$$

donde:

I_o	Inversión inicial
BA	Beneficio promedio anual generado por el proyecto
i	Tasa de inflación

5.2 Evaluación económica del sistema integral de climatización y agua doméstica

El estudio económico del sistema integral de climatización y agua para uso doméstico, consiste en evaluar bajo diferentes escenarios la factibilidad económica de implementación de las tecnologías solares en la vivienda propuesta.

5.2.1 Parámetros económicos

Los parámetros considerados para el presente estudio incluye inversión inicial, costos de operación y mantenimiento, vida útil, tasa de inflación, tasa de incremento a las tarifas eléctricas y al costo del combustible de los siguientes sistemas: enfriamiento de aire por absorción y por compresión de vapor, acondicionamiento de aire por piso radiante y calentamiento de agua para uso doméstico. Esto debido a que con la instalación de sistema de enfriamiento solar se tendrá capacidad de climatizar durante todo el año, además de producir agua caliente para uso doméstico. Los parámetros base utilizados para el estudio se muestran en la tabla 5-1.

Tabla 5.1: Parámetros base para elaboración de análisis económico

Vida útil de sistema de absorción	20 años ¹
Vida útil de sistema de compresión de vapor	15 años
Tasa de inflación	8.5% ²
Tasa de incremento de precio al gas natural	8% ³
Tasa de incremento de precio a la energía eléctrica	18% ⁴
Costo de instalación de sistema de calentamiento y enfriamiento solar	12% del costo de SECS ¹
Costo de instalación de sistema de compresión	15% del costo de SC ¹

¹(Tsoutsos *et al.*, 2003). ²Banco de México. ³Comisión Reguladora de Energía. ⁴Comisión Federal de Electricidad

5.2.2 Costos unitarios para el estudio económico.

Inversión inicial del sistema de climatización solar por absorción: este parámetro tiene un fuerte impacto en la evaluación económica, ya que los sistemas de enfriamiento por absorción son 4.5 veces más caros que los de compresión mecánica, además de que necesitan un sistema de colección solar para obtener la energía de operación, lo cual incrementa aún más la inversión inicial. Sin embargo, el campo de colectores podrá ser utilizado en un sistema integral que durante todo el año proporcionará energía para enfriamiento, calentamiento y agua caliente, lo que hace más rentable la inversión inicial. Así mismo dicho sistema podrá ser utilizado en un futuro para otros usos tales como calentamiento de un biodigestor que produzca combustibles para la vivienda.

Para el cálculo de inversión inicial de ambos sistemas de climatización se consideraron los costos mostrados en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Costos base para cálculo inversión inicial de sistema de climatización solar

SISTEMA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO SOLAR	
Sistema de enfriamiento por absorción 35 KW	\$378,857.00 ¹
Costo por m ² colector de tubo evacuado	\$3,847.00 ²
Costo de termostanque de almacenamiento por litro almacenado	\$4.00
Unidades manejadoras de aire de 17.5 KW	\$3,022.00 ³
Bombas de agua de enfriamiento, caliente y fría	\$10,794.00 ⁴
Calentador auxiliar	\$20,000.00 ⁵
Piso radiante para dos viviendas	\$78,000.00 ⁶
Costo de instalación sistema solar	\$45,462.00 ⁷
SISTEMA DE COMPRESIÓN DE VAPOR	
Unidades condensadoras y evaporadoras	\$70,000.00 ³
Ductería	\$17,270.00 ³
Costo de instalación sistema de compresión	\$20,000.00

¹Absorsistem. ²www.iter.es ³Becerril refrigeración. ⁴Dunfos. ⁵www.raypak.com.

⁶www.saecsaenergiasolar.com ⁷(Tsoutsos *et al.*, 2003)

A partir de los costos mostrados en la tabla 5.2, se obtiene la inversión inicial que se muestra en la tabla 5.3. Para el análisis económico se consideró una reducción en 20% debido a que los costos están basados en compra por menudeo.

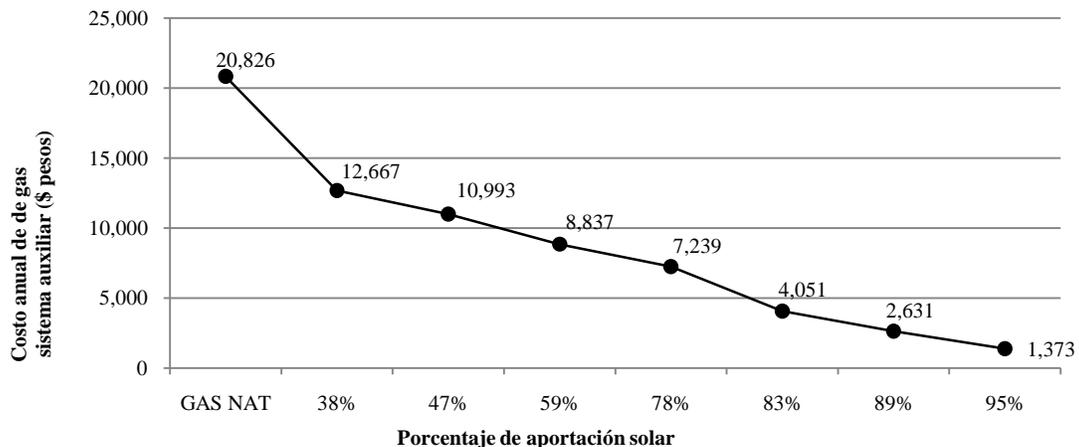
Tabla 5.3: Costo de colectores y sistema de climatización

APORTACIÓN SOLAR (%)	COLECTORES SOLARES		COSTO DE SISTEMA (\$)
	\$	% INVERSIÓN	
Sistema de enfriamiento por compresión de vapor	0	0	112,770
Sistema de enfriamiento a gas natural	0	0	446,389
38	334,689	37	893,276
47	400,088	41	963,253
59	530,886	48	1,112,245
78	665,531	53	1,251,311
83	800,176	58	1,387,339
89	930,974	61	1,520,098
94	1,065,619	64	1,664,762

En la tabla 5.3, se puede observar que el costo del subsistema de colección solar representa un alto porcentaje de la inversión inicial del sistema, conforme se incrementa el porcentaje de fracción solar; esto a partir de costos de compra por menudeo. Sin embargo si se considera la compra por mayoreo, los costos podrían reducirse entre el 20 y 40%, lo que reduce el costo de inversión inicial para el sistema integral de calentamiento, enfriamiento y agua para uso doméstico. Por otro lado si se construyen los colectores solares con tecnología propia, se podrían reducir los costos de inversión inicial en una mayor escala, ya que es lo que genera mayor incremento de inversión inicial.

En el *costo de operación* del sistema integral, se considera el consumo de energía eléctrica para operación de las bombas de agua caliente de colectores, agua caliente de alimentación al sistema de absorción, agua de enfriamiento de la torre, agua fría a las manejadoras y la de la solución del ciclo de absorción; con un costo energético anual de \$3,190.00 que representa un 10% del consumo de un sistema de enfriamiento convencional de la misma capacidad según estudios realizados por Tesoutsos (2003).

Otro costo de operación del sistema de absorción es el del *consumo de gas natural* para mantener la unidad a condiciones mínimas de temperatura (80°C), para operación sobre todo en el periodo de demanda crítica de enfriamiento. El costo del gas natural se considera según el precio de mayo de 2007, con \$336.00 por Gigacaloría (CRE, 2007). El costo de consumo del sistema integral varía según el porcentaje de aportación solar de acuerdo a simulaciones realizadas en TRNSYS 16 como se muestra en la figura 5.1.



Fuente: Elaboración propia a partir de costos de energía de la CRE (2007)

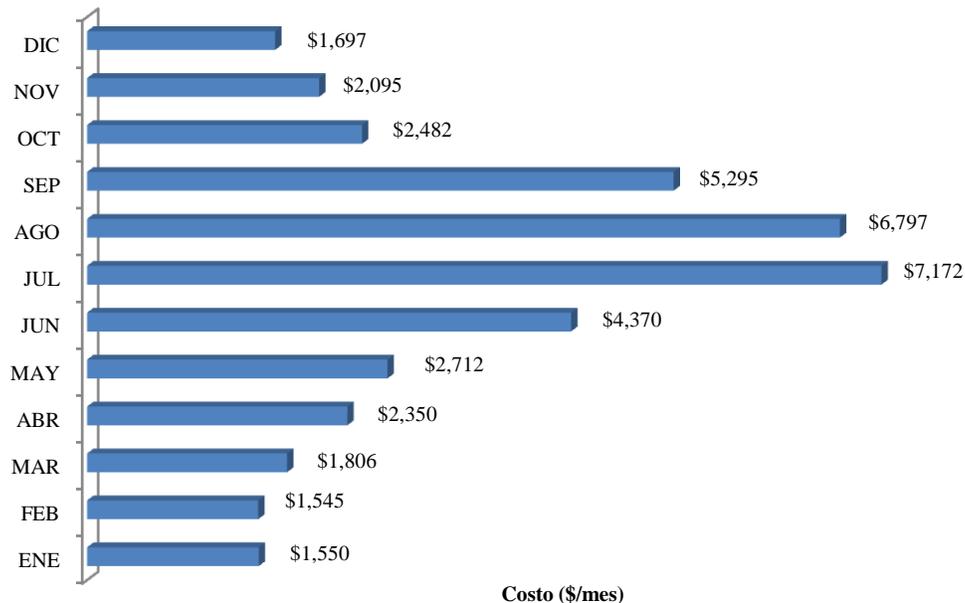
Figura 5.1: Costo de gas para operación con diferentes aportaciones solares

Como se esperaba, en la figura 5.1 se puede apreciar que los costos anuales de operación para dos viviendas disminuyen conforme se incrementa el porcentaje de aportación solar al generador del sistema de absorción.

En lo que respecta al *costo de mantenimiento* se considera un costo cero para el sistema solar, ya que solamente se requiere de limpieza de los colectores solares, actividad que pueden realizar los usuarios.

Para el caso del sistema de compresión de vapor se consideró un costo anual de mantenimiento de \$700.00 por cada una de las unidades.

Para determinar el *costo de operación del sistema* de calentamiento y enfriamiento por compresión de vapor, se realizaron simulaciones térmicas del edificio diseñado a partir de TRNSYS 16, considerando dos unidades de 5 toneladas nominales de bomba de calor con sistema de enfriamiento y calentamiento. A partir de la energía requerida, producto de la simulación, se obtiene un costo anual de operación de \$39,873.00 para climatización artificial de las dos viviendas durante el periodo anual. En la figura 5.2, se muestra el costo mensual de energía eléctrica para climatización por compresión de vapor.

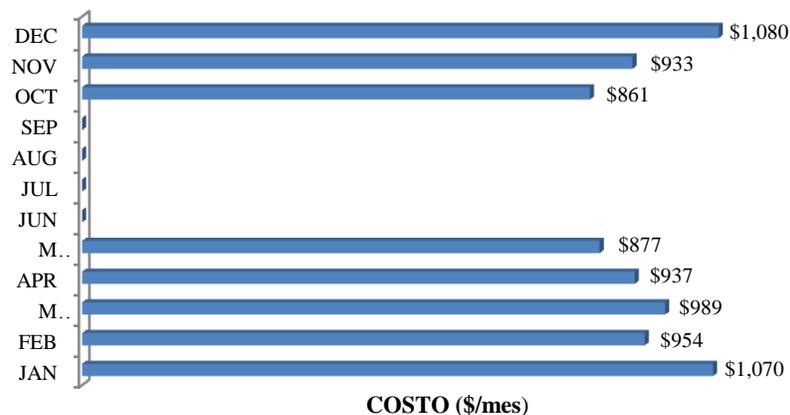


Fuente: Análisis con base a costos de energía CFE (2007)

Figura 5.2: Costo de energía eléctrica para calentamiento y enfriamiento por compresión, dos viviendas.

Cabe destacar que los consumos de energía mensual para propiciar confort durante toda la temporada de verano en estas viviendas, excede el límite de 2500 kWh/mes, ya que se consideró la operación continua de las unidades, por lo que, no es factible alcanzar cuota de energía subsidiada (IEE, 2006). Sin embargo la tarifa 1F es la más económica que se aplica en el país, lo que afecta al tiempo de recuperación de la inversión de la tecnología solar.

También se considera el *costo de operación del sistema de calentamiento de agua para uso doméstico* de las dos viviendas (ver figura 5.3), el cual, representa un costo anual de gas natural de \$7701.00 determinados a partir de estudio realizado en TRNSYS 16 para el periodo de demanda de agua caliente. Dicho costo, representa un ahorro de energía ya que a partir del campo de colectores se suministrará la energía requerida para calentamiento de agua de uso doméstico.



Fuente: Análisis con base a costos de energía CFE (2007)

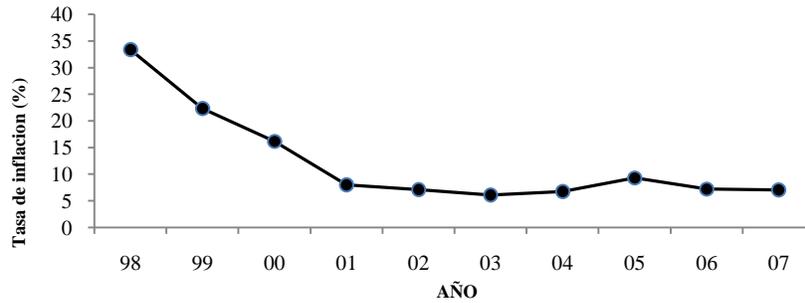
Figura 5.3: Costo gas natural para calentamiento de agua uso doméstico, dos viviendas

Otra de las tecnologías estudiadas por medio de simulación en TRNSYS 16 es el sistema de piso radiante durante el periodo de demanda de calentamiento, con el objetivo de conocer, si a partir del sistema instalado se cubre la demanda de calentamiento de las viviendas. Se encontró que el sistema de colección solar para enfriamiento instalado cubre la demanda de calentamiento sin requerir energía auxiliar para operación del mismo, propiciando temperaturas en el espacio de entre 18 y 22°C, lo que coincide con los requerimientos propuestos por (Watson *et al.*, 2002).

Equipo de reposición: Este parámetro se refiere a la reposición del sistema de enfriamiento por compresión. Se estima que el sistema de compresión de vapor debe ser remplazado en un periodo de 15 años.

Tasa de inflación, tasa de incremento al costo de la energía eléctrica, tasa de incremento al costo del gas natural: El valor de estos parámetros es de suma importancia para el análisis económico. A continuación se presenta un análisis del historial de cada una de las tasas:

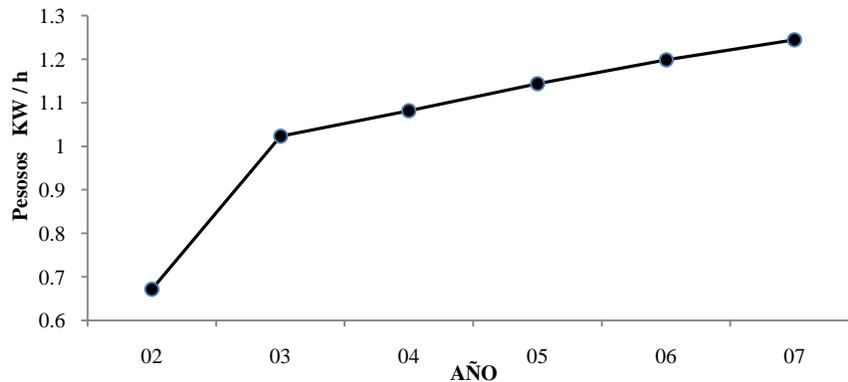
La tasa de inflación del mercado tuvo un decremento a partir de 1998 al 2001 (BancodeMéxico, 2007); sin embargo a partir del 2001 al 2007 se mantiene a un promedio de 8.5% anual como se puede apreciar en la figura 5.4.



Fuente: Banco de México (2007)

Figura 5.4: Tasa de inflación

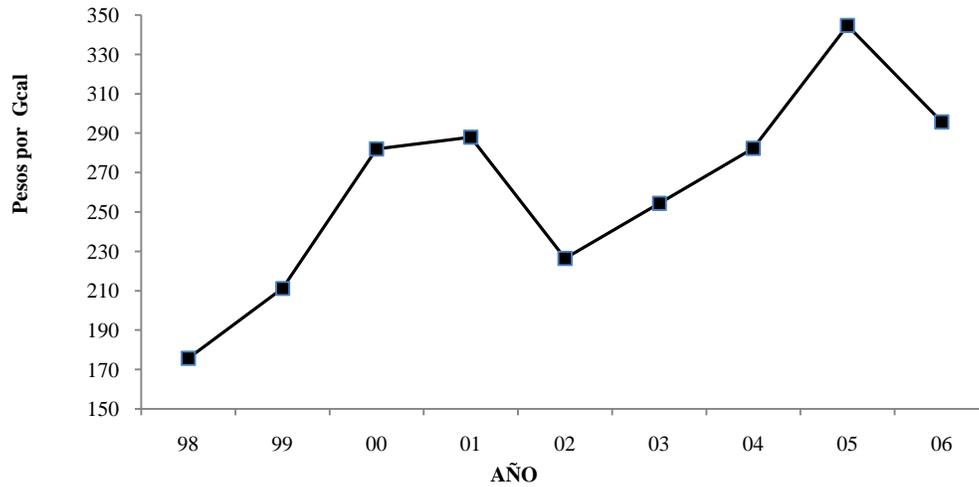
Con relación al costo de energía eléctrica, en febrero del 2002, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) emitió un acuerdo que autoriza el ajuste, modificación y reestructuración a las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica y reduce el subsidio a las tarifas domésticas (Cámaradediputados, 2002). Aun cuando la tarifa 1F es la más económica que se aplica en el país, el alto consumo de energía eléctrica durante el periodo de demanda de enfriamiento hace que los usuarios desembolsen grandes cantidades de dinero para obtener condiciones de confort térmico de las viviendas. En la figura 5.5, se muestra el incremento anual de costo de energía a partir de la reforma del 2002, y este representa un incremento del costo de la energía del 18% (INEGI, 2007)



Fuente: INEGI (2007)

Figura 5.5: Tasa de incremento anual del costo de la energía

El costo de gas natural, en Baja California se encuentra ligado a los costos del mercado de EUA (CRE, 2007), por lo que no se puede regular el costo del mismo. En la figura 5.6 se muestra el comportamiento de precios en el mercado de EUA.



Fuente: Comisión Reguladora de Energía (2007)

Figura 5.6: Tasa de incremento de costo del gas natural, 1998-2006

Se puede observar que existen dos picos en el incremento del costo del gas natural, en enero de 2001 y en noviembre del 2005, es debido al conflicto de EUA con Irak y a la tensión propiciada con Irán. De esta manera, cuando se tienen cambios en el mercado norteamericano se transforma en altos costos del gas natural para los consumidores de Baja California y el resto de las fronteras que reciben gas de la red de EUA. Sin embargo si se eliminan estos sucesos el incremento promedio anual del gas natural es del 8%.

Período de vida útil: Para fines de cálculo se consideraron 20 años de vida útil con base a estudios realizados por Tesoutsos *et. al.* (2003) para el sistema de enfriamiento solar, mientras que para el caso del de compresión de vapor se consideraron 15 años.

5.2.3 Resultados de la evaluación económica

En esta sección se presentan los resultados del análisis económico del sistema integral de climatización anual (calentamiento y enfriamiento) y agua caliente para uso doméstico, para verificar su factibilidad en un conjunto de viviendas en Mexicali.

En lo que respecta al *análisis económico sin fuentes de financiamiento* y bajo un esquema convencional de compra-venta, el incentivo del usuario para adquirir un sistema de enfriamiento solar sería, poder cubrir su costo en un tiempo razonable con los ahorros en el pago de electricidad que el sistema trae consigo, para poder así disfrutar de los ahorros durante el resto de la vida útil del sistema (20 años).

La evaluación económica se efectuó mediante una hoja electrónica de cálculo en la que se consideró el costo de inversión, mantenimiento y operación a lo largo de la vida útil del sistema. Los parámetros evaluados son valor presente neto (VPN), tiempo de recuperación de la inversión (TR) y la relación costo beneficio (R_{CB}), para cada uno de los escenarios planteados.

Los resultados financieros reflejan el nivel de rentabilidad del proyecto como se puede apreciar en la figura 5.7. La mejor alternativa de sistema, es la opción al 47% de aportación solar con área de colección de 104m², ya que los tres indicadores muestran ventajas sobre el resto de las propuestas.

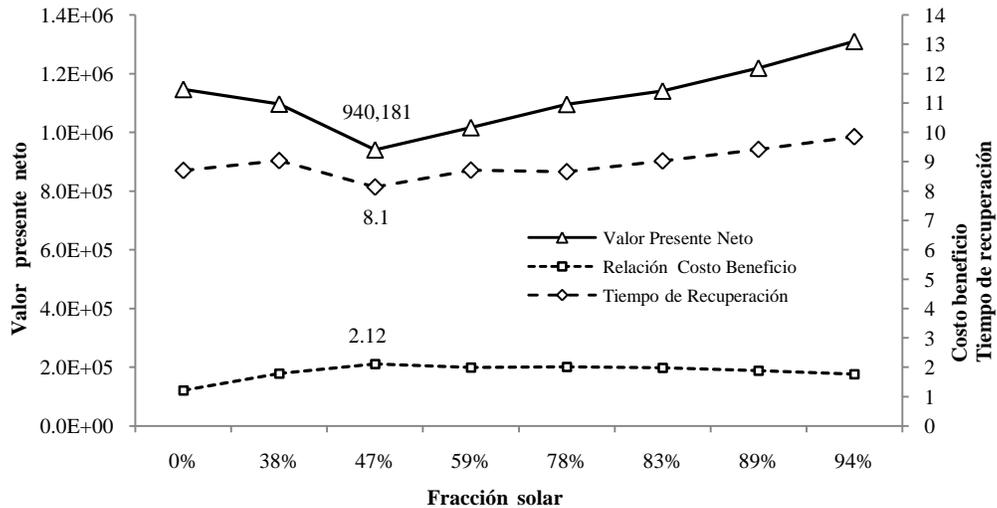


Figura 5.7: Indicadores económicos para los diferentes escenarios, para dos viviendas

La mayor afectación económica de los sistemas operados con energía solar, es debida al costo del sistema de colección solar, el cual incrementa el VPN y el TR de la inversión; además de que se reduce la relación costo beneficio. Sin embargo, sí se disminuye el área de colección, se obtiene menor calor útil y será necesario incrementar los costos de operación del sistema auxiliar a gas natural durante periodos de mayor demanda.

Con la alternativa seleccionada se obtiene menor flujo de efectivo comparado con la operación de un sistema de compresión de vapor e incluso al compararlo con un sistema operado 100% con gas natural, como se puede observar en la figura 5.8. La inversión inicial para esta opción representa \$657,832.00 (\$328,916.00 por vivienda) al 47% de fracción solar a un costo de operación en la vida útil de \$282,349.00 (141,174.00 por vivienda).

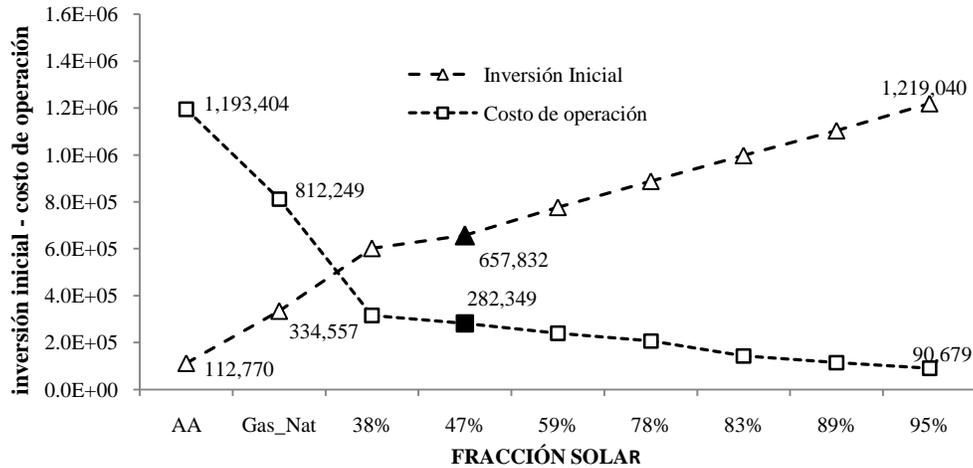


Figura 5.8: Inversión inicial y costo de operación diferentes escenarios, para dos viviendas

Bajo este escenario en la figura 5.8, se puede observar que el costo de operación comparado con un sistema convencional es menor en un 73% y en comparación con el sistema operado 100% a gas natural representa el 65% menos. Sin embargo la inversión inicial del sistema al 0.47 de fracción solar es 4.8 veces mayor que la del sistema de compresión de vapor y 0.97 veces más alto que el operado a gas natural.

Comparando los flujos de efectivo del sistema seleccionado con el sistema de compresión de vapor y con el de operación 100% a gas natural (Ver figura 5.9), se puede observar que el sistema de compresión de vapor tiene un mayor flujo debido al costo de la energía eléctrica, que tiene un incremento anual del 18%. Además en el año 16 es necesario remplazar el sistema de compresión, lo que genera un incremento en el flujo de gastos. Con relación al sistema operado con gas natural se observa que los flujos de efectivo del sistema híbrido son menores, esto debido al uso de la energía solar como calor útil del sistema de colección.

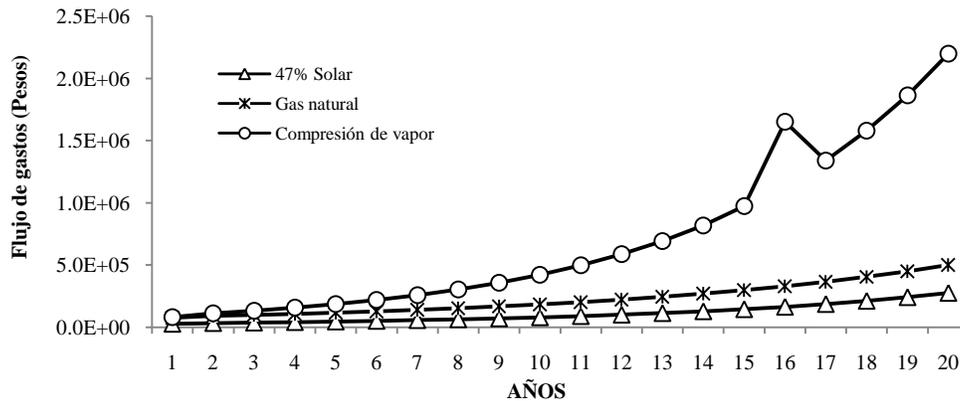


Figura 5.9: Flujo de efectivo de sistemas de enfriamiento, para dos viviendas

Al comparar el sistema propuesto con sistemas híbridos operados con combustibles fósiles (gas natural), se observa que la ventaja principal de seleccionar la alternativa con 47% de aportación solar, es que se tiene un bajo costo de operación (figura 5.10) e inversión inicial (figura 5.8). Sin embargo se observa que sí se disminuye la fracción solar, el costo de operación se incrementa debido al alto consumo de gas natural y sí se incrementa la aportación de energía solar el costo de operación se disminuye, pero la inversión inicial resulta muy elevada como se muestra en la figura 5.8.

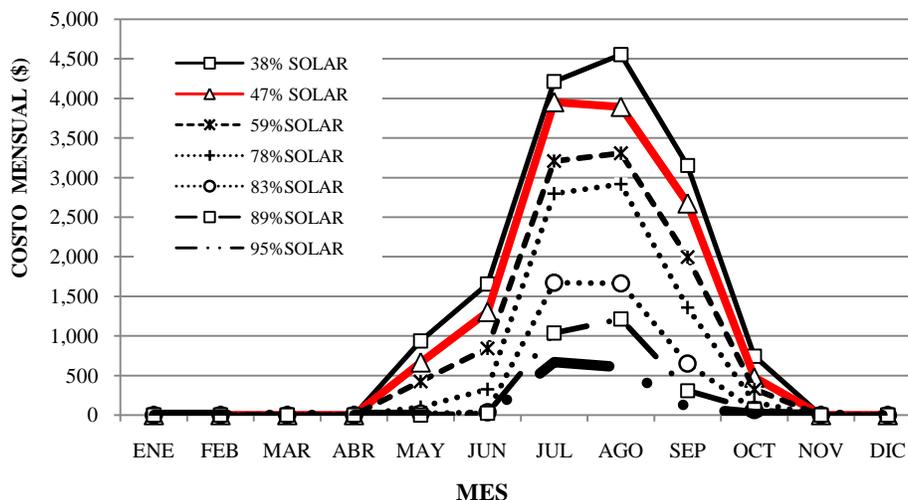


Figura 5.10: Costo de energía mensual con diferentes fracciones solares, para dos viviendas

Al comparar el sistema operado a gas natural con el de compresión de vapor se encontró un flujo efectivo anual, con una ventaja del 17.8%; esto debido a que durante todo el año los costos de energía eléctrica resultan más altos, con un mayor incremento en los periodo de transición con baja demanda de sistemas activos para climatización como se puede observar en la figura 5.11, no obstante el ahorro es aún mayor, ya que con el sistema a gas proporcionará además agua caliente para uso doméstico.

En la figura 5.11 se muestra el costo de energía mensual de tres escenarios de sistemas integrales de climatización y agua caliente para uso doméstico. Se puede observar que al utilizar un sistema híbrido solar/gas natural al 47% de fracción solar, se obtienen ahorros anuales de facturación de hasta un 73% respecto al sistema de compresión. Esto es debido a que es necesario utilizar gas natural para obtener agua caliente para uso doméstico, además de que el costo de energía eléctrica durante el periodo frío se incrementa. Esto genera altos costos de facturación en la temporada fría, mientras que con el sistema híbrido el costo de energía para calentamiento y agua doméstica es cero durante estos meses.

De igual manera al comparar el sistema a gas natural, se puede observar que se obtienen ahorros de hasta un 31% respecto al sistema de compresión. Sin embargo, se tienen costos de facturación en los meses fríos (enero, febrero y diciembre) debido a la demanda de agua caliente para uso doméstico. Además se puede observar que el costo de energía se reduce para el sistema a gas en los meses de marzo, abril y noviembre, esto es consecuencia de las condiciones ambientales de Mexicali B.C., lo que hace se disminuya la demanda de agua caliente. Por último al comparar el costo anual de energía del sistema híbrido con el de gas natural, se obtienen ahorros de hasta un 60%.

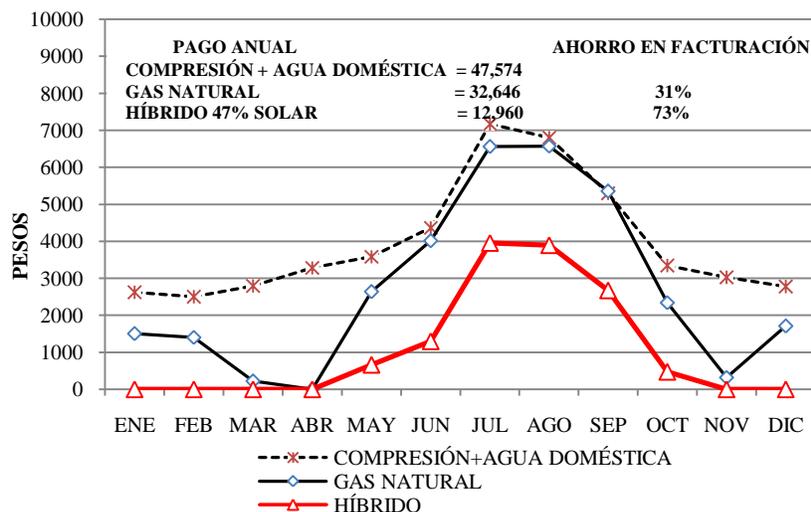


Figura 5.11: Ahorro en facturación mensual y anual

El *análisis económico con fuentes de financiamiento* ha sido una parte importante en el proceso de comercialización de tecnologías que operan con energías limpias. A raíz de los problemas ambientales que se han venido generando en la última década por el uso indiscriminado de combustibles fósiles, se ha despertado el interés en apoyar, en mayor proporción, la implementación de sistemas alternativos operados con fuentes renovables. Estos apoyos se han venido realizando a partir de proyectos demostrativos que los mismos gobiernos implementan.

En México las oportunidades de financiamiento para ese tipo de tecnología son muy limitadas, pero ante la creciente demanda de energía eléctrica para climatización artificial en ciudades con climas extremos como el de la ciudad de Mexicali B.C, es necesario realizar programas de sustitución de las tecnologías convencionales por tecnologías que operan con energía limpia, disminuyendo emisiones al medio ambiente y reduciendo el consumo de las fuentes de energía finitas. Sin embargo para poder introducir este tipo de tecnologías, es necesaria la implementación de créditos blandos.

Actualmente no existen fuentes de financiamiento para la instalación de sistemas solares de enfriamiento y es necesario se implemente por medio del gobierno federal, estatal y municipal fuentes de financiamiento a fondo perdido que repercutan en una mejoría del medio ambiente y en una reducción de consumo de energía que permitirá contar con una mayor capacidad instalada por parte de las empresas productoras de energía eléctrica.

Entre las instituciones bancarias con posibilidad de financiar los sistemas de enfriamiento solar están: INFONAVIT, BANOBRAS, FINFRA (Fondo de inversión de Banobras), Nacional Financiera y FIDE. Sin embargo sólo una pequeña parte de los usuarios en Mexicali podrían ser sujetos a financiamiento con plazos de pago hasta de 20 años.

El Fideicomiso para el Ahorro de Energía (FIDE) es un organismo privado sin fines de lucro, cuya misión consiste en demostrar y difundir con acciones y resultados concretos, las ventajas y beneficios económicos y sociales del ahorro de energía para impulsar su aplicación en los usuarios.

El FIDE ha participado en los programas de financiamiento de equipos de alta eficiencia eléctrica en Mexicali, a nivel usuario, con la finalidad de ahorrar energía. Las condiciones que aplican para ser sujetos de un crédito FIDE, especifican que con los ahorros económicos que genera el nuevo equipo, se pague el préstamo.

Para los usuarios con altos costos de energía por climatización, el sistema de enfriamiento es rentable en la ciudad de Mexicali, y su mayor impacto de ahorro económico es en la temporada de verano, periodo en que se requiere una alta demanda energética logrando tiempos de recuperación de la inversión de la mitad de la vida útil de estos sistemas.

Las condiciones de financiamiento que maneja esta dependencia son a partir de reembolsos a tasas de interés CETES, la más alta del mercado +3% por comisiones. Pero no existen opciones de financiamiento a fondo perdido.

Por el alto costo de inversión inicial que representan los sistemas de enfriamiento solar, es necesario realizar proyectos con financiamiento a fondo perdido, el cual debe ser apoyado por parte de los tres niveles de gobierno. Esto con la finalidad de evitar altos consumos de energía que requieran la aportación de subsidio a la tarifa eléctrica, logrando así viviendas más confortables y que repercutan en una mejoría de las condiciones ambientales tanto de la ciudad como del mundo en general.

Es por esto que se realiza un estudio económico a fondo perdido con diferentes porcentajes de financiamiento que varían desde el 20 al 50% de la inversión inicial, con la finalidad de demostrar además de su factibilidad técnica, también a factibilidad económica de implementación de estas tecnologías, sí se realizan inversiones a fondo perdido. En la figura 5.12 se muestran los resultados obtenidos de dicho estudio con base a la alternativa al 47% de fracción solar.

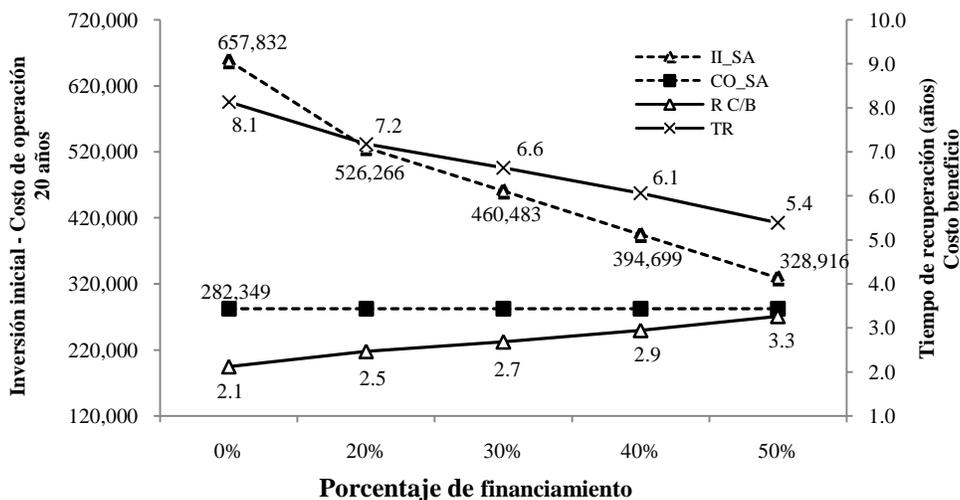


Figura 5.12: Estudio económico a fondo perdido para dos viviendas

En la figura 5.12, se muestra que si se implementan inversiones a fondo perdido de 50% del costo de la unidad de enfriamiento el tiempo de recuperación de la inversión se reduce de 8.1 a 5.4 años, además de

que se incrementa la relación costo beneficio de 2.1 a 3.3 obteniendo un beneficio neto de 1.2 peso por cada peso invertido. En lo que respecta al costo de inversión inicial se puede observar que se reduce en forma significativa de \$657,832.00 a \$328,916.00 por sistema instalado, lo que representa un costo inicial por vivienda de \$164,458.00.

5.3 Beneficios ambientales

Durante la operación de un sistema de enfriamiento solar híbrido, se reduce la contaminación ambiental. La implementación a gran escala de este tipo de sistemas, no implica ningún riesgo ni de salud, ni para el ambiente. Durante su vida útil no se producen contaminantes y además, su utilización evita la quema de combustibles fósiles, por lo que ofrecen beneficios ambientales.

La conversión de energía solar en energía térmica se considera una solución potencial a los problemas ambientales tales como lluvia ácida y calentamiento global causados por la demanda de energía que repercute en la generación de electricidad convencional. En zonas con excelente disponibilidad de energía solar como es el caso de Mexicali se garantiza la pronta recuperación económica de estos sistemas.

El período de recuperación de la inversión del sistema de enfriamiento solar por absorción depende de 4 factores básicos:

- El adecuado dimensionamiento del sistema de captación solar.
- El uso eficiente de la energía térmica para operación del sistema de enfriamiento solar
- El tiempo de vida útil del proyecto, ya que se tiene un beneficio de más del 50%.
- Los ahorros de energía consumida para climatización, durante el tiempo de vida útil de la unidad

Uno de los principales contaminantes que afectan el medio ambiente es el bióxido de carbono (CO_2), debido principalmente a las grandes cantidades que se producen en todo el mundo producto de la combustión de los combustibles fósiles. Los programas de control y mejoramiento del medio ambiente se enfocan y toman como referencia las toneladas de emisiones del CO_2 (DOE, 2000)

Los sistemas de enfriamiento operados con energía térmica se consideran equipos que contribuyen a mitigar las emisiones de efecto invernadero. En el caso de la alternativa propuesta las emisiones de CO_2 se muestran en la figura 5.13.

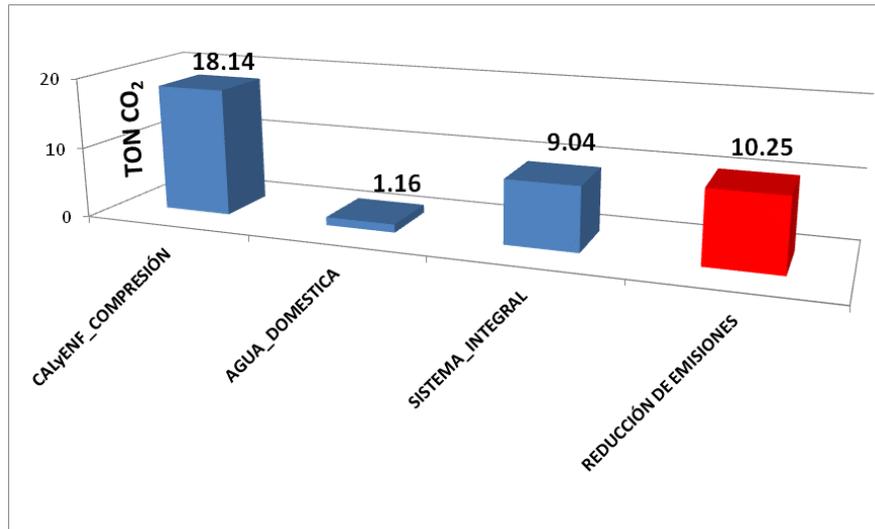


Figura 5.13: Reducción de emisiones de CO₂ por unidad de 10 TON al 47% de fracción solar

En la figura 5.13, se puede observar que el sistema de enfriamiento por compresión es el mayor emisor de CO₂, y representa 0.76 veces más emisiones que el sistema integral que da servicio de calentamiento, enfriamiento y agua caliente para uso doméstico. Por lo tanto si se toma en cuenta la suma de emisiones del sistema convencional más las emisiones de CO₂ del sistema de calentamiento de agua para uso doméstico, se obtendrán 19.3 Ton CO₂ anuales. Al compararlas con el sistema integral, este representa una reducción de emisiones de 10.25 Ton CO₂ anuales por unidad instalada.

Cabe destacar que a partir de reducción de emisiones de CO₂ se puede acceder a recurso por bonos de carbón, los cuales pueden ser invertidos para introducir en forma masiva este tipo de tecnologías y para motivar a las instituciones de investigación para buscar alternativas de enfriamiento con tecnologías limpias.

Por otro lado se incrementaría la capacidad instalada de CFE y se podría dar cobertura para zonas de la ciudad con demanda de servicio de energía eléctrica.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

A partir del análisis de clima se corroboró que la demanda de enfriamiento se da a partir de mayo a octubre con periodo crítico en los meses julio y agosto. Mientras que la máxima demanda de calentamiento corresponde a los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre.

De acuerdo a las condiciones climáticas del lugar, la vivienda en Mexicali B.C. debe ser diseñada considerando técnicas de manejo de asoleamiento, sombreado, iluminación y ventilación natural que disminuya los flujos de calor a través de la envolvente arquitectónica, de tal manera que se obtengan espacios confortables la mayor parte del año y se reduzca el uso de sistemas activos, logrando así, una disminución en la inversión inicial y costo operativo de los sistemas activos de enfriamiento y calentamiento.

Las técnicas de adecuación ambiental necesarias para que el edificio tenga un comportamiento eficiente durante el verano, son el uso de masa térmica y ventilación natural. En el caso de invierno las técnicas de mayor importancia corresponden al uso de masa térmica y calentamiento solar; siendo la de mayor impacto el uso de masa térmica, tanto para amortiguar los efectos por altas como de bajas temperaturas; sin embargo por cuestiones económicas y de espacio, se consideró el uso de masa térmica solamente en la fachada sur, sustituyéndola por un incremento en la resistencia térmica de muros oeste a partir de aislamiento con poliestireno.

El estudio térmico de la vivienda propuesta, demuestra que la técnica de mayor impacto en la carga térmica es el aislamiento térmico de la fachada oeste, debido a la mayor área de exposición solar durante las horas con mayor incremento de temperatura, seguido por el techo aislado con ático ventilado, ya que se consideró como caso base un techo de vigueta y bovedilla, el cual posee una alta resistencia térmica. Las técnicas con menor impacto en la reducción de la carga térmica, corresponden al uso de sombras, ventanas con vidrio sencillo y aislamiento de puertas. Entre las de mediana significancia están el color claro en exteriores y ventanas con vidrio doble.

A partir de la evaluación térmica con el simulador TRNSYS, se demuestra que la vivienda propuesta que contempla el uso combinado de una serie de técnicas de adecuación ambiental, tales como masa térmica, aislamiento térmico en muros oeste, techo de vigueta y bovedilla con ático ventilado más aislante, color claro en exteriores, ventanas con vidrio doble, puertas aisladas y sombreado, puede ser considerada como una vivienda energéticamente sustentable; ya que se reduce la carga térmica en un 43.6%, sin embargo, se determinó que es necesario el uso de sistemas activos de enfriamiento y calentamiento durante los periodos críticos de demanda de dichos servicios, para lograr condiciones de confort térmico óptimo de acuerdo a los estándares de la norma ISO-7730.

La disponibilidad de radiación solar en Mexicali B.C., permite la utilización de sistemas de climatización y agua caliente para uso doméstico operados con tecnologías solares energéticamente sustentables, además de que pueden ser integradas en forma adecuada en la edificación y no provocan ningún impacto visual en el aspecto formal de la vivienda.

Los resultados muestran que el sistema híbrido solar/gas natural, es una propuesta técnica y económicamente factible, ya que se satisface la demanda de enfriamiento durante el periodo cálido a un bajo costo de operación a través de un área de colección solar de 104 m² y tamaño de tanque de 6 m³ con una aportación solar del 47%. Además de que el área de colección propuesta es similar a la disponible en el conjunto de viviendas de 116 m².

La utilización del subsistema de colección y tamaño de tanque del sistema de enfriamiento solar/gas natural, se adecúa en forma satisfactoria a la demanda de energía del piso radiante, por lo que es factible utilizarse como un sistema integral de calentamiento y enfriamiento que climatice el espacio a lo largo de todo el año.

El dimensionamiento propuesto de la torre de enfriamiento, permite proporcionar agua de enfriamiento entre el rango de 24 y 31 °C, especificado por el fabricante de la unidad de absorción, sin embargo en los días críticos la torre de enfriamiento deberá proveer una temperatura de salida del agua inferior a 29°C, para garantizar la operación eficiente del sistema de absorción y no afectar la capacidad nominal de enfriamiento de la unidad. O bien, si no es posible la disminución del agua de enfriamiento es necesario incrementar la temperatura de consigna del fluido caloportador entre 82 y 85°C para garantizar el efecto de enfriamiento a la capacidad nominal en las horas críticas.

La calidad de energía del sistema de colectores es mayor a 80°C la mayor parte de las horas con disponibilidad de recurso solar, en los días normales del periodo de máxima demanda de enfriamiento del sistema solar/gas natural; sin embargo, en los días críticos la disponibilidad se reduce a 6 horas, las cuales corresponden a la máxima demanda de enfriamiento. Por lo que es necesario el uso de energía auxiliar para cubrir los requerimientos de energía demandados por la unidad de absorción. Cabe destacar que si el sistema se utiliza al 100% de fracción solar con un área de colección de 277m² y 16m³ de tanque, se cubre en forma total la demanda de enfriamiento a partir de energía solar, con calidad del fluido caloportador superior a los 80°C.

El sistema de piso radiante propuesto, mantiene satisfactoriamente las temperaturas recomendadas para los espacio climatizados (18 a 22°C) durante la temporada de operación. Además de que el sistema provee agua para uso doméstico con calidad de energía adecuada, ya que se tienen temperaturas promedio diarias de 40°C durante el periodo de demanda de este servicio.

Los resultados de la simulación muestran que el aire de las viviendas, propicia condiciones de confort térmico entre confort y confortablemente frío para el periodo de demanda de enfriamiento y de confort y confortablemente caliente en el periodo de demanda de calentamiento según la escala ISO 7730, para usuarios con una actividad metabólica de 1.2 met y factor de arropamiento de 0.6 clo.

Es factible técnicamente la implementación de sistemas de enfriamiento solar operados con energía térmica en la ciudad de Mexicali, sin embargo la inversión inicial es 5 veces mayor. Para obtener una mayor viabilidad económica, es necesario implementar programas en conjunto con los tres niveles de gobierno, dirigiendo los recursos del subsidio de las tarifas eléctricas a este tipo de proyectos. Esto repercutirá en una solución real, que hará que este tipo de tecnologías se consolide y puedan ser utilizadas en forma masiva en Mexicali B.C, además de que se estaría haciendo un mejor uso de los recursos públicos, pudiendo ser utilizado para otro tipo de necesidades de la sociedad.

Si se utiliza este tipo de tecnologías en forma masiva en la ciudad de Mexicali, la inversión inicial podría disminuir en forma considerable, ya que los distribuidores tanto de la tecnología de enfriamiento por absorción y calentamiento de agua tendrían que ubicar sus productos en la localidad, lo que ahorraría costos por importación y traslado por parte de las empresas productoras, ofertando un producto a menor costo inicial.

El tiempo de recuperación de inversión con sistemas sin financiamiento es de 8.1 años, sin embargo a partir de fuentes de financiamiento de recursos del subsidio a la tarifa eléctrica, se puede reducir a 5.4 años, haciendo más viable el proyecto con una inversión inicial de \$164,458 por vivienda; los cuales pueden ser subsidiados a partir del crédito de adquisición de vivienda. Sin embargo si se utilizan en forma masiva en Mexicali, los tiempos de recuperación de la inversión podrían ser menores. Otro indicador económico como lo es la relación costo beneficio del sistema óptimo, resulta en 2.1 (beneficio neto de \$1.1 por peso invertido), sin embargo con fuentes de financiamiento a fondo perdido se puede obtener hasta \$2.3 por peso invertido.

La mayor ventaja de utilizar un sistema al 47% de fracción solar es que el usuario pagará un bajo costo de facturación anual, con una disminución respecto al sistema convencional del 73%. Además de que el resto de consumo eléctrico por equipos electrodomésticos, se reducirá al rango de tarifas con mayor subsidio. Cabe destacar que si se utiliza un mayor porcentaje de fracción solar se pueden obtener ahorros de hasta el 100%, pero a un alto costo de inversión inicial.

Una de las principales ventajas de implementar esta tecnología es la reducción en forma significativa de los consumos de energía eléctrica, con lo que se tendrá mayor disponibilidad de capacidad instalada por parte de CFE, para dar servicio a otro tipo de necesidades energéticas.

El uso del sistema integral de enfriamiento y calentamiento solar/gas natural repercute en una disminución de contaminación ambiental, ya que solamente es necesaria la quema de combustibles fósiles (gas natural) en un 53%, lo que reduce la contaminación ambiental en 9.1 toneladas de CO₂ anuales, respecto a un sistema de enfriamiento por compresión de vapor; sin embargo, debido a que el sistema de colección solar puede proveer agua caliente para uso doméstico, la reducción de emisiones anuales es de 10.26 ton. Por lo tanto el uso de estos sistemas debería ser ampliamente utilizado para climatización en la ciudad de Mexicali y en otras regiones con alta disponibilidad de recurso solar.

6.2 Recomendaciones

Es necesario hacer simulación de un sistema integral que pueda dar servicio a un conjunto de 4 viviendas, para verificar el comportamiento de las unidades de absorción de mayor dimensión, además de que se debe hacer un estudio para verificar la factibilidad técnica-económica de esta tecnología en viviendas de interés social y económica.

Es importante hacer un estudio del sistema híbrido propuesto, con la implementación de un sistema de colectores de placa plana con doble cubierta para verificar su comportamiento operativo y posible reducción de costo de inversión inicial; de tal manera de disminuir el tiempo de recuperación de la inversión y se vuelva un proyecto con mayor viabilidad de implementación en la ciudad de Mexicali. Así mismo verificar el comportamiento operativo del sistema integral con tecnologías de calentamiento de

agua de fabricación local en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Autónoma de Baja California.

Otras tecnologías que deben ser investigadas para implementarse a la vivienda energéticamente sustentable son las estufas solares, la energía fotovoltaica, de biogás, eólica entre otras que pueden ser integradas al edificio, con la finalidad de obtener una mayor autosuficiencia energética.

Estimar el costo de los sistemas de colección y aire acondicionado del LES y bajo de este escenario realizar de nuevo a evaluación técnica económica.

Estudiar la viabilidad de las tecnologías de enfriamiento térmico diseñadas para operar con gas natural y modificadas para operar con energía solar en el LES.

BIBLIOGRAFÍA

- ABSORSISTEM. (2003). *Plantas enfriadoras de agua, por absorción, alimentadas por agua caliente*. de www.absorsistem.com
- Agenda-21. (2002). *Hacia la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible*. Johannesburgo.
- Allard, F. (1998). *Natural ventilation in building: a design handbook*. London UK: James and James.
- ArquiRed. (2000). Casa ecológicas de interés social en ciudad Juárez Consultado 7-Febrero, 2008, de <http://www.arquired.com.mx/palm/shwNoticia.ared?idNot=449>
- ASHRAE. (2001). *HANDBOOK FUNDAMENTALS*. Atlanta U.S.A.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. .
- ANSI/ASHRAE 55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy, ANSI/ASHRAE 55, Atlanta USA. (2004).
- Auliciems, A. (1981a). Towards a physiological model of thermal perception. *Int Journal of Biometeorology*, 25, 109-122.
- Auliciems, A. (1981b). Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception. *International Journal Biometeorology*, 25(2), 109-122.
- Badescu, V., & Staicovici, M. D. (2006). Renewable energy for passive house heating Model of the active solar heating system. *Energy and Buildings*, 38, 129–141.
- Baker, N., & Steemers, K. (2002). *Daylight design of building* (1ra ed.). London UK.
- Balaras, C. A., Grossman, G., Henning, H.-M., Ferreira, C. A. I., Podesser, E., Wang, L., et al. (2007). Solar air conditioning in Europe—an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 299–314.
- BancodeMéxico. (2007). Estadísticas: Tasas de interés representativas. Consultado 26-May, 2007, de www.banxico.org.mx
- BARBI. (2007). *Suelo radiante: Manual técnico*. Revisado 21 Mar, de www.barbi.es
- Best, R. (2007). Sistema de aire acondicionado solar por absorción (Bromuro de Litio Agua). Consultado Nov-7, 2007, de www.riraas.net
- Boutet, T. S. (1987). *Controlling air movement: a manual for architects and builders* (1ra ed.). New York, USA: Editorial McGraw-Hill.

- Brager, G., & DeDear, R. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Building*, 27, 83-96.
- Burnett, J., Chau, C. K., & Lee, W. L. (2007). Green buildings: How green the label? *Landscape and Urban Planning*, xxx, xxx-xxx.
- Calderaro, V., & Agnoli, S. (2007). Passive heating and cooling strategies in an approaches of retrofit in Rome. *Energy and Buildings*, 39, 875–885.
- Calderón, R. (1995). *Iluminancia global para el diseño de aberturas en una ciudad de clima cálido seco*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Arquitectura, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali B.C. México.
- Cámaradediputados. (2002). Análisis del incremento de la TARIFAS ELÉCTRICAS residenciales en México durante el año 2002. Consultado 29-May, 2007, de www.diputados.gob.mx
- Casals, X. G. (2006). Solar absorption cooling in Spain: Perspectives and outcomes from the simulation of recent installations. *Renewable Energy*, 31, 1371–1389.
- CCC. (1982). Curso de Energía Solar: Conocimientos fundamentales de electricidad. La energía eléctrica. In (Vol. 3). San Sebastian, España.
- CER-INI. (2003). Electrificación de poblaciones insulares y circundantes del Lago Titicaca utilizando energía fotovoltaica. Consultado Nov-5, 2003, de <http://cer.uni.edu.pe>
- Chávez, J. R. G., & Freixanet, V. F. (2005). *Viento y arquitectura* (3ra ed. Vol. 1). México: Trillas.
- Chungloo, S., & Limmeechokchai, B. (2007). Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand. *Building and Environment*, 42, 3341–3351.
- Comisión_Intersecretarial_de_Cambio_Climático. (2006). Estrategia Nacional de Cambio Climático, *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. México.
- CONABIO. (1998). *La diversidad biológica de México: Estudio de País, 1998*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAE. (2007). Análisis económico. Consultado Oct-16, 2006, de www.conae.org.mx
- CONAFOVI. (2001). *Casa y hogar para cada quien: una tarea Contigo. Resumen ejecutivo*. México: Programa Sectorial de Vivienda 2001-2006.
- CONAFOVI. (2007). *Necesidades de vivienda*. México: Secretaría de Desarrollo Social
- CRE. (2007). Precio del Gas Natural en México: Comisión Reguladora de Energía. Consultado Sep-7, 2007, de www.cre.gob.mx

- Critchfield, H. (1974). *Climate and human confort. General Climatology*: Prentice - Hall.
- DeDear, R., Gail, B., & Donna, C. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference* (No. ASHRAE RP- 884). USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
- DeGarrido, L. (2003). Vivienda bajo un modelo de construcción sustentable. Consultado Sep-23, 2003, de www.bravobuild.com
- DeVega, M., Almendros-Ibañez, J. A., & Ruiz, G. (2006). Performance of a LiBr–water absorption chiller operating with plate heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 47, 3393–3407.
- Docherty, M., & Szokolay, S. (1999). Climate analysis. In PLEA (Ed.), *PLEA* (Vol. Note 5): University of Queensland Depatament of Architecture.
- DOE. (2000). Carbon Dioxide Emissions from the Generation of Electric Power in the United States. [Versión Electrónica],
- Edwards, B., & Hyett, P. (2004). *Guía básica de la sostenibilidad*. Barcelona, España: Gustavo Gili.
- ERREPAR. (2007). Calefacción por piso radiante. Consultado 13 Abril, 2007, de www.construir.com
- Florides, G. A., Kalogirou, S. A., Tassou, S. A., & Wrobel, L. C. (2002). Modelling, simulation and warming impact assessment of a domestic-size absorption solar cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 22, 1313–1325.
- Fuentes, V. (2007a). Carta Bioclimática. Sin publicar Mimeo. Universidad Autónoma Metropolitana, México. D.F.
- Fuentes, V. (2007b). Notas del Curso Arquitectura Bioclimática. Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas México.
- Gallegos, R., Luna, A., Velázquez, N., & Bojórquez, G. (2006). *A simulation study on the limitations of the use of evaporative cooling for air conditioning in hot arid climate*. Artículo presentado en ASME Solar Joint 2006.
- García, E. (1981). *Clasificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Givony, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold.
- Gobierno_del_Estado_de_Baja_California. (1999). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de Mexicali 2000-2005* (1ra ed.). Mexicali B.C.

- Green_Peace. (2006). Foro: Vulnerabilidad de México frente al cambio climático, 27 de septiembre. Consultado 9-Agosto, 2007, de <http://www.greenpeace.org/mexico/press/reports/cambio-climatico-y-energ-a>
- Haberda, F. (1987). *Supporting study to sonntlan-project solar houses in Mexicali*. Mexicali B.C.: Dornier system GmbH. (DORNIER)
- Herold, K. E., Radermacher, R., & Klein, S. A. (1996). *Absorption chillers and Heat Pumps*: CRC Press.
- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Building*, 34, 661-665.
- IDEHAB. (2003). Prototipo Sustentable. *Instituto de Estudios del Hábitat* Consultado Octubre-12, 2003, de <http://idehab.fau.unlp.tripod.com>
- IEE. (2006). *Diagnóstico e identificación de oportunidades para la implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red en viviendas de Mexicali, Baja California*. Cuernavaca, Morelos México: Instituto de Investigaciones Eléctricas. División de energías alternas gerencia de energías no convencionales.
- INEGI. (2007). Banco de Información Económica. Consultado Ago-16, 2007, de dgcnesyp.inegi.gob.mx
- ISO 7730:2005(E), Ergonomics of thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal confort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal confort criteria. (2005).
- ITEM-Systems. (1995). *DOE-Plus USER'S MANUAL, Innovative Technologies for Energy Management* U.S.A.
- Joudi, K. A., & Lafta, A. H. (2001). Simulation of a simple absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 42, 1575-1605.
- Keilholz, W., & Sette, P. (2005). Using the simulation studio. In S. E. Laboratory (Ed.), *TRNSYS 16: Atransient system simulation program* (Vol. 2, pp. 132).
- Liebard, A., & Herde, A. D. (2005). *Traté D'architecture et D'Urbanisme Bioclimatiques: Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observatoire des énergies renouvelables.
- Marsh, A. (1994). SunTool (Version 1.10): Square One Research PTY LTD.
- Moore, C., Allen, G., & Lyndon, D. (1976). *La Casa: forma y diseño*. Barcelona, España: Ed. Gustavo Gili.
- Morillón, D., & Fuentes, V. (2002). Notas del curso "Arquitectura Bioclimática". Asociación Nacional de Energía Solar.

- Nogués, M. (2001). Desarrollo de una bomba de calor de absorción a gas. Consultado Nov-7, 2007, de www.tesisenxarxa.net
- NOM-020-ENER "Eficiencia energética en edificaciones": Envoltante de edificios residenciales, (2007).
- Obiolis, J. (1987). *Crisis energética y recursos naturales*: Salvat de Grandes Temas. Libros GT.
- Olgyay, V. (1998). *Arquitectura y clima*. Barcelona, España: Gustavo Gilli.
- Olgyay, V. (2002). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona, España Gustavo Gilli. .
- Ortega, M. (2002). *Energías Renovables*. Madrid, España: Paraninfo, S.A.
- Papadopoulos, A. M., Oxizidis, S., & 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.
- Paricio, I. (1999). *La protección solar* (3ra ed.). Barcelona España: Ed. Bisagra.
- Persson, M.-L., Roos, A., & Wall, M. (2006). Influence of window size on the energy balance of low energy houses. *Energy and Buildings*, 38, 181–188.
- Pilatowsky, I., Morillón, D., Ramos, G., & Oskam, A. (2007). *Estrategias del ahorro de energía aplicadas al desarrollo de un módulo de vivienda de interés social en la región noroeste de México*. Artículo presentado en XVII Congreso Nacional de Ahorro de Energía.
- Presidencia_de_la_República. (2008). Programa Nacional de Vivienda 2007-2012: Hacia un desarrollo habitacional sustentable. Consultado 7-Febrero, 2008, de <http://www.conafovi.gob.mx/>
- Rheen. (2007). Commercial and Residential hot water and heating products. Consultado 16-Mar, 2007, de www.raypak.com
- Rodríguez, M., Figueroa, A., & Fuentes, V. (2001). *Introducción a la arquitectura bioclimática* (Vol. 1). México, México: Limusa.
- Romero, R. A. (2002). *Implicaciones del acondicionamiento ambiental del sector residencial en el consumo de energía eléctrica bajo condiciones climáticas cálido secas extremas: El caso Mexicali B.C*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sánchez, A. (2006). Conceptos básicos de energía solar. Temixco Morelos, México: UNAM.
- Sapag, H. N. (2003). *Preparación y evaluación de proyectos* (4ta ed.). México, México.
- SENER. (2007). Balance Nacional de Energía. Consultado Feb, 27, 2006, de www.energia.gob.mx

- Singh, B. (1987). *Construcción en climas cálidos secos*. México: LIMUSA.
- SketchUp. (2007). Google incorporation (Version 6): GOOGLE.
- Sørensen, B. (2004). *Renewable Energy: Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects* (3ra ed.). Roskilde, Denmark: Elsevier Science.
- Soriano, F. (2008). Funcionará con energía eólica una torre de viviendas de Playa Grande Consultado 6-Febrero, 2008, de <http://www.clarin.com/diario/2008/01/18/sociedad/s-03005.htm>
- Srikhirin, P., Aphornratana, S., & Chungpaibulpatana, S. (2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5, 343–372.
- Szokolay, S. V. (2003). *Introduction to Architectural Science: The basis of sustainable desing*. London, UK: Elsevier.
- Szokolay, S. V. (2005). *Introduction to bioclimatic architecture*. Artículo presentado en COTEDI, 2005: Confort y eficiencia energética en la arquitectura.
- Tanner, W., & Pérez, O. (1987). *Sonntlan Proyecto conjunto México-Alemán de Investigación y desarrollo para la utilización de la energía solar*
- TRNSYS. (2005). Simulation Studio (Version 16). U.S.A.: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Tsoutsos, T., Anagnostou, J., Colin Pritchard, Karagiorgas, M., & Agoris, D. (2003). Solar cooling technologies in Greece. An economic viability analysis. *Applied Thermal Engineering*, 23, 1427–1439.
- UNAM. (1990). *Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía*. México.
- UPR. (2003). Desarrollo de una casa autosustentable y energéticamente autónoma. Consultado Dic-4, 2003, de <http://www.pionet.org>
- Velázquez, N. (2002). *Estudio de sistemas de absorción avanzados para operar con gas natural asistidos por energía solar*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Wang, L., Chen, G. M., Wang, Q., & Zhong, M. (2007). Thermodynamic performance analysis of gas-fired air-cooled adiabatic absorption refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering*, 27, 1642–1652.
- Wang, W., Rivard, H., & Zmeureanu, R. (2007). Floor shape optimization for green building design. *Advanced Engineering Informatics*, 20, 363–378.
- Watson, D. (1983). *Climatic: Energy-Efficient Building*: McGraw-Hill.

Watson, R. D., & Chapman, K. S. (2002). *Radiant heating and cooling handbook* (1ra ed.). New York, USA: McGraw-Hill.

Woodson, D. (1999). *Radiant Floor heating*. New York, USA: McGraw-Hill.

ANEXOS

ANEXO A1. PROYECTO VIVIENDA ENERGETICAMENTE SUSTENTABLE

ANEXO A2. LÍMITE DE ESTRATEGIAS DE ADECUACIÓN AMBIENTAL

ESTRATEGIAS DE ADECUACIÓN AMBIENTAL			
ZONA DE CONFORT PERIODO CÁLIDO Y FRÍO			
TEMPERATURA NEUTRA			TEMPERATURA EFECTIVA
29.3		Límite superior periodo cálido	33.9
25.3		Límite inferior periodo cálido	28.0
25.2		Límite superior periodo frío	27.8
21.2		Límite inferior periodo frío	22.6
<p>Nota*.-Trazar una línea paralela a la humedad Absoluta (HA) en la carta psicométrica, colocando como límite superior de zona de confort los 12 g/kg de aire seco y el límite inferior los 4 g/kg de aire seco. La unión de estas líneas con las temperaturas efectivas del límite superior e inferior nos definirán la zona de confort ya sea para el periodo cálido o frío</p>			
MASA TÉRMICA			
32.8		Límite periodo cálido	39.6
<p>Nota*.-Para determinar el límite superior del efecto de masa térmica se consideran los 14 g/kg. Hasta chocar con la intersección de la línea superior de confort de verano y posteriormente se une con la intersección de la línea de los 12 gr/kg y el límite inferior de verano. El límite inferior es en la línea de los 4 gr/Kg.</p>			
		Límite periodo frío	
<p>Nota*.-Se traza una línea (normalmente vertical), debido al pequeño desplazamiento.</p>			
35.5		Límite con ventilación nocturna	44.6
VENTILACIÓN			
34.9		Límite a 1 m/s	42.9
<p>El valor resultante en este caso, es asignado como el valor límite superior hasta la línea de 50% de humedad relativa. Dicho límite, sirve para definir la línea de tendencia a partir del 50% de humedad relativa hasta los 4g/kg as. El límite inferior esta establecido por el límite inferior para el periodo cálido, a partir del cual se traza una línea vertical hasta la curva de 80% de humedad relativa. A partir de ésta intersección se traza una línea siguiendo la línea de 80% de humedad relativa. Por último se traza una línea paralela a la temperatura efectiva al 50% de humedad relativa a partir de la intersección.</p>			
ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO			
		Límite de enfriamiento evaporativo directo	39.3
<p>Nota*.- El límite por temperatura de bulbo húmedo se determina a partir de el límite superior para el verano (en los 12g/kg) y en la parte inferior se determina a partir del límite inferior del verano (4gr/kg).</p>			
		Límite de enfriamiento evaporativo indirecto	42.3
<p>Nota*.- El límite superior por HA son los 14g/kg. A a partir de la cual se deberán trazar dos líneas diagonales. La primera se traza en la intersección de la prolongación del limite superior de verano con los 14 gr/kg, mientras que la segunda se traza a partir de la prolongación del limite por enfriamiento evaporativo hasta los 14 gr/kg</p>			
CALENTAMIENTO PASIVO			
		Límite de calentamiento pasivo	9.3
<p>Nota*.- Considerando 100m² con 20% de aperturas, con una captación de radiación global recibida de 3315Wh/m² y una eficiencia de captación de 0.6. Además de asumir un buen sistema de aislamiento.</p>			