

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

PROGRAMA DE ENERGÍA

“EVALUACIÓN TÉRMICO - ECONÓMICA DE UNA BOMBA DE CALOR COMO RESPALDO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR RESIDENCIAL”

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN FUENTES RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

P R E S E N T A:

MARCO ANTONIO TORRES REYES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FERNANDO GABRIEL ARROYO CABAÑAS

PEUACM

Programa de Energía



Ciudad de México, a 11 de 06 de 2019

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

CONTENIDO:

	Pág.
Objetivo General	4
Objetivos Específico	4
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES	5
1.1. Introducción	5
1.2. Situación de las fuentes de energía a nivel mundial	7
1.3. Recurso solar	10
1.4. Sistemas de Calentamiento	13
1.5. Calentadores solares	13
1.5.1. Desarrollo histórico de los calentadores solares	13
1.5.2. Tipos de Calentador solar	14
1.6. Bombas de calor	17
1.6.1. Desarrollo histórico de las bombas de calor	17
1.6.2. Clasificación de las bombas de calor	19
1.6.2.1. Bomba de calor aire-aire	20
1.6.2.2. Bomba de calor aire-agua	20
1.6.2.3. Bomba de calor agua-aire	21
1.6.2.4. Bomba de calor agua-agua	23
1.6.2.5. Bomba de calor geotérmica	23
1.7. Refrigerantes	24
1.8. Ventajas y desventajas de las bombas de calor	25
1.9. Sistemas Híbridos	25

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS, FÍSICAS, MEDIOAMBIENTALES Y DE POBLACIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO: CIUDAD DE MÉXICO.	28
2.1. Características Geográficas, Físicas y Medioambientales	28
2.2 Datos de población	30
2.3 Caso de estudio	32
2.4 Comparativo entre Valencia, España y la Ciudad de México	34
2.5 Rendimiento de la bomba de calor para agua caliente sanitaria	35
2.6 Marco regulatorio para el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables	37
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS TÉRMICOS DE LAS BOMBAS DE CALOR	40
3.1. Introducción	40
3.2. Balance de energía de una bomba de calor	40
3.3. Coeficiente de desempeño (COP)	44
3.4. Descripción del sistema propuesto	48
CAPÍTULO 4. CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR	51
4.1. Demanda de calor	51
4.2. Determinación del tamaño del compresor	54
4.3. Capacidad de calefacción de una Bomba de Calor	56
4.4. Punto de diseño del sistema	58
4.5. Evaluación económica del sistema con respaldo de la bomba de calor	61
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	69
ANEXOS	74

Menciones y Agradecimientos

He de mencionar y agradecer a mi familia, a mi padre que confiaba en mí, a mi adorada madre (Poly) que siempre me impulso y apoyó en muy diversas formas e incluso me sigue impulsando aún después de haber partido.

También quiero agradecer a mis hermanos (Ana, Ismael y Alejandro) que siempre me han dado su apoyo incondicional, así como a mi primo y a mis queridos sobrinos y demás familiares, como también a mis amigos y a “la luz que resplandece”, porque siempre han creído en mí y me tienen en alta estima.

Agradezco a los profesores del Programa de Energía de esta gran institución que es la UACM, en particular al Dr. Fernando G. Arroyo quien me dirigió y apoyo en el trabajo de tesis, así como también al Mtro. Raúl Amílcar Santos por sus valiosas aportaciones, sin olvidarme de la Dra. Claudia Roldan que además de ser mi profesora acepto con gusto el ser una de mis lectoras.

No me olvido de mencionar, y agradecer, a la Dra. Joanna Juárez por aceptar con gusto y entusiasmo ser una de mis lectoras.

Objetivo General: Determinar la viabilidad técnica y económica del calentamiento de agua para uso residencial a través de una bomba de calor, considerándolo como respaldo de un calentador solar.

Objetivos específicos:

- Investigar, estudiar y establecer claramente el funcionamiento de una bomba de calor.
- Calcular los ahorros de energía que se tienen al usar una bomba de calor.
- Valorar técnicamente el uso de una bomba de calor, como respaldo de un calentador solar.
- Evaluar la viabilidad económica de usar una bomba de calor como respaldo de un calentador solar.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES.

1.1. Introducción

Quizás el aspecto que popularmente se tiene en cuenta, en cuanto al uso de un calentador solar, es la percepción de que la energía solar es gratuita. Esto seguramente es un incentivo dentro del ámbito familiar, puesto que el costo de la energía viene a representar un gasto significativo en la economía de las familias, sobre todo si se da un aumento constante, como hasta hace poco se daba en nuestro país, del precio de los combustibles de uso doméstico, como lo es el gas L.P. Sin embargo, hay que considerar que hasta hace al menos tres décadas los calentadores solares eran un poco más que una curiosidad tecnológica, con un potencial a futuro ciertamente, pero no se vislumbraba como una opción a los ya familiares calentadores de gas que, dicho sea de paso, ya habían desplazado a los calentadores de leña o de “combustibles” (pequeños paquetes de aserrín impregnados de combustibles líquido).

Entonces, son los factores económicos, tecnológicos, sociales y medio ambientales los que impulsaron el desarrollo de los calentadores solares, a tal grado que en la actualidad son una opción frente a los también llamados “boilers”.

Primeramente, a finales de los años 1970 se da en nuestro país el “boom petrolero”, a tal grado que dentro del gobierno mexicano se pensaba que solo había que preocuparse en administrar la “riqueza”. Es en este contexto que se popularizan los “boilers” de gas. En este punto es donde quizá tendría que buscar las razones que, andando el tiempo, vendrían a impulsar el desarrollo de la tecnología solar. Cabe señalar que en ese momento no solo la economía se “petrolarizo”, sino también las fuentes de energía nacionales, a tal grado que en México el 91% de la energía requerida proviene de los combustibles fósiles (principalmente petróleo y gas natural, aunque también carbón mineral).

Cabe destacar que, para la época, el calentar agua para uso sanitario no resultaba ser tan oneroso, puesto que el costo del combustible no era muy alto. Sin embargo, al transcurrir el tiempo se empezaron a ver dos aspectos nada favorables en cuanto al uso masivo del petróleo y el gas. El primero de ellos es que los combustibles fósiles son fuentes de energía no renovables, es decir, que las reservas petroleras algún día, no muy lejano, se van a terminar a pesar de que se llegue a descubrir nuevos yacimientos. Esto ha cobrado una escalofriante realidad al pasar de unas supuestas reservas probadas de aproximadamente 72,000 millones de barriles de petróleo¹ durante el ya mencionado “boom” petrolero a, una década después, unos 65,500 millones de barriles hacia 1991², para posteriormente descender (hacia principios de este siglo) a unos 26,941 millones de barriles³, hasta la actualidad en donde dichas reservas se tasan en unos 13,438.5 millones de barriles de crudo, al 1 de enero de 2014⁴.

¹ Anda Cuauhtémoc, (1981).

²Tonda Juan, (2003).

³ muy interesante, AÑO XIX, No 08, (2002).

⁴Statista. El portal de las estadísticas. Evolución anual de las reservas de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos (Pemex) entre 2006 y 2017. <https://es.statista.com/estadisticas/611755/reservas-probadas-de-hidrocarburos-de-la-empresa-petroleos-mexicanos/>

Estos cambios, en las reservas probadas, no solo obedecen al consumo que se ha tenido en estas casi cuatro décadas, sino también a la reclasificación de las reservas que se han dado en los últimos años, donde ciertos montos de reservas probadas han pasado a ser reclasificadas como reservas probables y ciertas reservas probables se han clasificado ahora como reservas posibles. Finalmente, el resultado es el mismo: el petróleo mexicano se está terminando y al parecer más rápido de lo que al principio se había calculado.

Otro de los aspectos importantes para pensar en el uso, cada vez más masivo, de los calentadores solares es en el ámbito medio ambiental. Hacia finales del siglo XX, se puso en evidencia que la temperatura media del planeta se venía elevando de manera paulatina pero constante, y que muy probablemente esto se debiera a la actividad humana, en particular a la “quema” de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón. Esto porque todas las combustiones, incluso las “más limpias”, arrojan a la atmosfera dióxido de carbono (CO₂), gas que tiene la particularidad de producir el llamado “efecto de invernadero”, con lo cual, de acuerdo con los estudios en la materia, se produce el llamado “calentamiento global”, con consecuencias a mediano y largo plazo nada favorables a la civilización humana.

Por ello el uso de las fuentes renovables de energía aquí son, como lo es la solar, tomando en cuenta que los cambios globales, como el agotamiento de las reservas petroleras, inciden en las actividades y problemáticas cotidianas. Ya que al agotamiento de las reservas petrolíferas sigue encareciendo los combustibles usados para las actividades domésticas.

Finalmente sobre el punto de la energía solar, se puede decir que si en realidad la energía solar no es completamente gratuita, debido a los costos de los equipos y a su instalación, si se puede tener un ahorro significativo en los costos por el uso de combustibles para uso doméstico.

Ahora bien, con el uso, cada vez más recomendado, de los calentadores solares se empieza a advertir algunas problemáticas sociales, técnicas y económicas que aún tienen que superar dichos calentadores para que su uso sea cada vez más generalizado.

Dentro de las problemáticas mencionadas se tiene la del aspecto social, esto es por las circunstancias generadas al interaccionar las personas con la nueva tecnología (en este caso los calentadores solares). Considerando que la mayoría de las personas están acostumbradas al servicio que brindan los calentadores de gas o eléctricos, con los cuales se dispone en todo momento de agua caliente, en cantidades prácticamente ilimitadas (quizá solo limitados, en términos prácticos, por la disponibilidad del combustible o del fluido eléctrico), por lo que puede resultar incómodo un calentador solar que posiblemente no proveerá de agua caliente a cualquier hora y que incluso podría no surtir agua caliente en forma ilimitada (algunos calentadores solares tienen capacidad para que seis personas se bañen al día, por lo que en algunos casos pudieran superar las necesidades sanitarias la capacidad del calentador) .

De lo anterior se desprende también el aspecto socio-económico, puesto que a pesar de que la energía solar es gratuita, el costo del calentador, su instalación y su mantenimiento pudiera

parecerles oneroso a los usuarios si no da el mismo servicio, al que están acostumbrados, que los calentadores convencionales.

En lo que se refiere al aspecto técnico, es de mencionar que un calentador solar enfrenta la problemática del clima: en los días nublados, fríos o lluviosos pudiera no disponerse del agua caliente requerida. De hecho las empresas que comercializan este tipo de calentadores recomienda no desconectar el calentador de gas de las instalaciones sanitarias, incluso algunas de estas empresas venden todo el “paquete”, calentador solar, termotanque y sistema de apoyo o respaldo vía calentador de gas.

La opción de conectar un calentador solar con uno de gas (o eléctrico), como respaldo, tendría el inconveniente económico de que se incrementarían los costos y se tardaría más en amortizar los costos de inversión de la alternativa solar. Pero sobretodo se seguiría emitiendo dióxido de carbono al seguir usando el calentador gas (el cual se usa en la mayoría de los hogares).

Por lo anterior se hace necesario un sistema que pueda disminuir los costos (como lo es el costo del gas o de la energía eléctrica), y pueda brindar las comodidades que proporcionan los actuales calentadores y disminuir al mínimo sus inconvenientes, como lo son las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo que se propone un sistema de respaldo por bomba de calor, es decir, se pretende usar una bomba de calor como respaldo de un calentador solar para coadyuvar en el calentamiento de agua para uso doméstico, cuando este no pueda proporcionar este servicio, o que este servicio sea deficiente, o sea, que no proporcione agua suficientemente caliente. El utilizar un sistema por bomba de calor como respaldo de un calentador solar tendría las siguientes ventajas: Se puede acoplar a un calentador solar, representaría un ahorro de energía considerable ya que dicho sistema gastaría una fracción de la energía que gastan los calentadores de gas o eléctrico, podría sustituir al calentador solar cuando este no pudiera surtir agua caliente, con este sistema se dispondría de agua caliente a cualquier hora y de forma casi ilimitada, similar a como ahora lo hacen los calentadores de gas, el sistema en si no emitiría dióxido de carbono y pudiera ser alimentado, con una fuente renovable de energía, como lo es un panel fotovoltaico.

1.2. Situación de las fuentes de energía a nivel mundial

La energía siendo vital para el desarrollo económico en general de un país, en particular para el desarrollo industrial y social, viene a jugar un papel preponderante en el mundo actual puesto que es una condición necesaria para el crecimiento económico debido a que el producto interno bruto, que no es otra cosa que la producción de bienes y servicios que satisfacen las necesidades de la sociedad, depende mucho de la disponibilidad de las fuentes de energía. Por lo que es de suma importancia no solo tener en cuenta con cuantas fuentes de energía se cuenta, sino también cuales fuentes de energía se tienen disponibles. Y es aquí donde es muy importante fijarse en el tipo de fuente de energía ya que en la actualidad no solo reviste importancia con cuanta energía se cuenta sino como se genera esta energía. Esto principalmente debido al aumento de población, y el aumento de nivel de vida de la

misma, así como a la toma de conciencia que se ha ido formado, en el seno de la sociedad, en las últimas décadas sobre los problemas medioambientales que las fuentes de energía, llamadas convencionales, producen. Es en este punto en donde se da un parteaguas sobre las diferentes fuentes de energía, en concreto sobre las fuentes no renovables y las fuentes renovables de energía, puesto que en el presente, y en el futuro, se requerirán fuentes de energía que sean más eficientes y sustentables e incluso menos susceptibles a los vaivenes económicos. Esta situación es la que se presenta con las fuentes no renovables de energía, que son las que predominan en la actualidad, como a continuación se mencionan e incluso se muestran en la figura 1.

Se tiene que para el año 2010, de la oferta total de energía primaria en el planeta (OTEP), de unos 12,700 millones de toneladas de petróleo equivalentes (Mtpe), el 32.3% provenía del petróleo, el 27.3% provenía del carbón, el 21.5 del gas natural y el 5.7 % de la energía nuclear. El resto de la energía usada provenía de las fuentes renovables de energía, que como se puede observar su participación en el mercado global de la energía es baja, aunque no marginal como años antes era, puesto que representa un porcentaje mayor que el de la energía nuclear, con un 13.3%, si bien aún está por debajo de la energía proveniente de los combustibles fósiles. Esta situación es ciertamente preocupante porque son estas fuentes las más susceptibles de terminarse en el mediano plazo, además que son las que más tiene impacto sobre el medio ambiente, principalmente por las emisiones de dióxido de carbono, que es el principal gas de efecto de invernadero que está produciendo el calentamiento global y en consecuencia el cambio climático. Es entonces primordial el que se empiece a incrementar aún más el desarrollo de las fuentes renovables de energía, que hoy son la alternativa para paliar no solo los problemas de escases de fuentes de energía y los problemas del calentamiento global, sino incluso como una solución a los vaivenes económicos que se dan en lo que respecta a la cotización, por ejemplo, del petróleo⁵.

Como se puede observar en la figura 1.1, han aumentado en forma absoluta las fuentes renovables de energía, sin embargo el porcentaje que representan no se ha incrementado de forma significativa como pudiera esperarse, puesto que va desde un 12.8% en 1990 hasta el 13.3% en 2010 que para el tiempo transcurrido, 20 años, no resulta significativo dicho aumento porcentual, que fue de un 0.5%. De ahí el imperativo de darle un impulso al desarrollo de las fuentes renovables de energía, que como se sabe: Son aquellas fuentes de energía que no se agotan o que se pueden volver a generar o a renovar, de ahí el nombre de renovables, y que al igual que las fuentes no renovables de energía proveen trabajo útil o aprovechable. También es de considerar que el impacto al medio ambiente por parte de la mayoría de las fuentes renovables de energía es mínimo, sobre todo en lo que respecta a las emisiones de efecto de invernadero.

⁵ SECRETARÍA DE ENERGÍA (2012), PROSPECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES 2012-2026.

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva de Energ as Renovables 2012-2026.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2012-2026.pdf)

**Distribución de la demanda mundial de energía, 1990-2010
(Millones de toneladas de petróleo equivalente)**

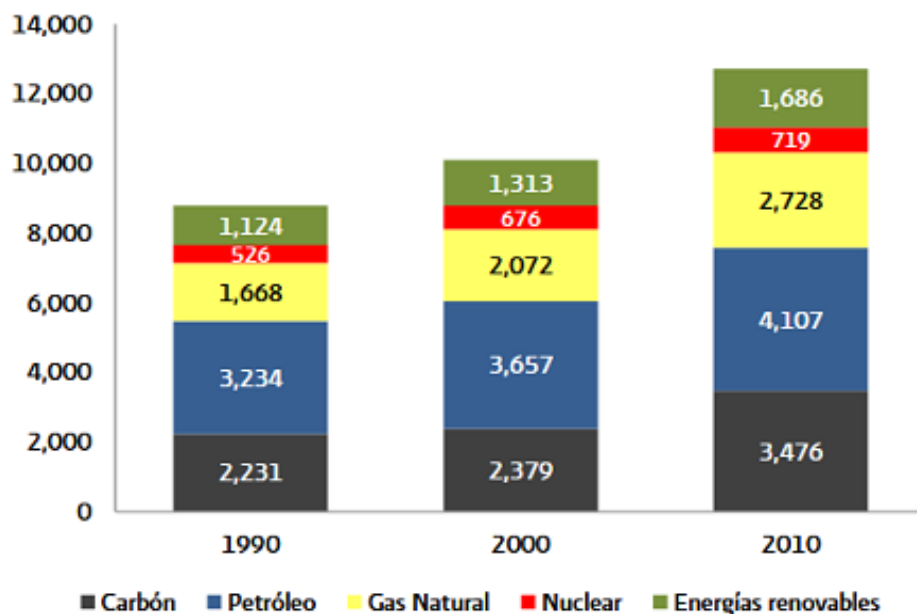


Figura 1.1. Comparación, en cuanto al uso, de las fuentes no renovables y renovables de energía. Fuente: SECRETARÍA DE ENERGÍA (2012), PROSPECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES 2012-2026. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2012-2026.pdf

Dentro de las fuentes renovables de energía se tienen: La energía de biomasa, que es aquella que se obtiene de combustibles líquido como el Biodiesel o el Etanol o gaseosos como el Biogás (metano) o incluso sólidos como la leña, todo ellos provenientes de productos vegetales (como la caña de azúcar o el maíz) o residuos vegetales. La energía hidroeléctrica, se denomina energía hidráulica o energía hídrica a aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas. La energía eólica, es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. La energía geotérmica, es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. La energía solar, es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol, mediante instalaciones que transforman la radiación solar en energía eléctrica, mediante paneles fotovoltaicos. También la radiación solar que alcanza la Tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce a través de la absorción de la radiación ya sea en dispositivos ópticos o de otro tipo. Dentro de las energías renovables, este tipo de energía se considera particularmente como no contaminante, energía limpia o energía verde, si bien, al final de su vida útil, los paneles fotovoltaicos pueden suponer un residuo contaminante difícilmente reciclable al día de hoy.

Cabe destacar que las ventajas de la Energía Solar, aparte de, como ya se mencionó, es una energía limpia por tanto, no emite gases contaminantes; el no ser un recurso limitado, pues durará miles de millones de años; el no estar sujeta a las cambiantes condiciones económicas y ser relativamente fácil de instalarse y de mantenimiento, así como no tener un muy alto costo.

En cuanto a las desventajas, se puede mencionar la intermitencia de esta, ya que una de sus limitaciones es en los periodos de oscuridad, así como el verse afectada por las condiciones meteorológicas. También una desventaja en la actualidad, en su modalidad Fotovoltaica, es el relativamente bajo rendimiento de conversión, que en los paneles actuales ronda el 18%.

1.3. Recurso solar

La radiación solar que llega a la superficie terrestre es ciertamente variable y es necesario conocer cómo cambia esta radiación, para así poder saber la cantidad de energía solar que puede aprovecharse en un determinado lugar de la Tierra. La energía del Sol que llega al planeta no es constante sobre todo por factores como son las estaciones del año, las condiciones atmosféricas y la latitud de cada lugar. Sin embargo, la radiación que llega al límite superior de la atmosfera, que es el promedio de radiación por unidad de tiempo por metro cuadrado, se denomina constante solar, y tiene un valor de $1\,367\text{ w/m}^{26}$. Considerando la mitad de la superficie terrestre, solo la mitad de la superficie del planeta es iluminada al mismo tiempo, se tendría una energía de $1.7 \times 10^{17}\text{ w}$ hora cada 60 minutos de Sol, cantidad está muy superior a la energía eléctrica producida a lo largo de un año, que tiene un valor de $7 \times 10^{15}\text{Wh}^7$. Claro que esta cantidad de energía solar se reduce a $2.16 \times 10^{20}\text{Wh/año}^8$, debido a la atmosfera y a la eficiencia de los sistemas solares.

Ahora bien, considerando los factores climáticos y de latitud, lo primero que se tendría que tomar en cuenta es si México recibe suficiente radiación solar susceptible de ser aprovechada. Resulta que en nuestro país existen regiones de insolación con el promedio mundial anual más alto, por lo que el aprovechamiento de la energía solar viene a ser una opción viable, sobre todo si se compara con la radiación solar que reciben países europeos como España, Alemania o Grecia que tienen un desarrollo de energía solar fototérmica importante, que se puede constatar a través de observar la superficie instalada para aprovechamiento solar térmico, mostrada en la figura 1.2.

⁶ Tonda Juan, (2003)

⁷ Op. Cit. Tonda (2003)

⁸ Op. Cit. Tonda (2003)

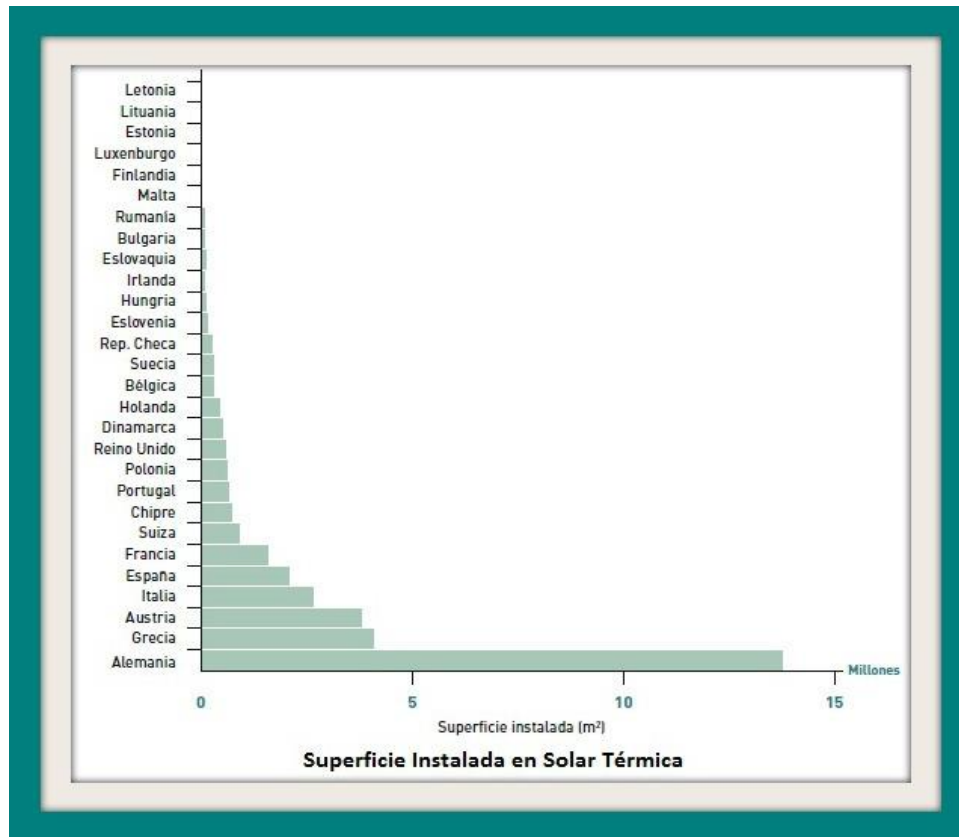


Figura 1.2. Superficie instalada para aprovechar la energía solar Fototérmica.

Fuente: RALEY ESTUDIOS COSTEROS (2012).

<http://raleystudioscosteros.blogspot.mx/2012/06/21-de-junio-dia-internacional-del-sol.html>

Como se ve en la figura 1.2 Alemania es líder en el aprovechamiento de la energía solar térmica, seguido de Grecia, con la cual hay una diferencia apreciable. España, que se ubica en el quinto sitio, teniendo una superficie dedica al aprovechamiento de la energía solar todavía bastante significativa, con unos 2.5 millones de metros cuadrados, que comparativamente con nuestro país, viene a ser más del doble de superficie que se tenía en 2008, puesto que de acuerdo a datos de la Secretaría de Energía había instalados en la República Mexicana alrededor de 1,160,000 metros cuadrados de superficie para aprovechar la energía solar térmica.

De lo anterior se puede decir que en México no se aprovecha un recurso abundante y fiable, puesto que se cuenta con alto potencial solar, lo cual se puede observar en las figuras 1.3 y 1.4 donde se muestra el recurso solar tanto en México, como en Europa.

Se observa que en México se tiene una radiación solar media diaria que va de unos 4.8 kWh/m² a unos 5.6 8 kWh/m², en cambio se puede apreciar, que en el continente europeo se tiene una mínima de 1.9 kWh/m² (700 kWh/m², anual), de radiación solar promedio diaria, y una máxima de 5.2 kWh/m² (1900 kWh/m², anual). Cabe señalar que en Europa las zonas de máxima irradiación solar son mínimas (principalmente en España) y en cambio en México estas mismas zonas abarcan al menos al 50% de su territorio.

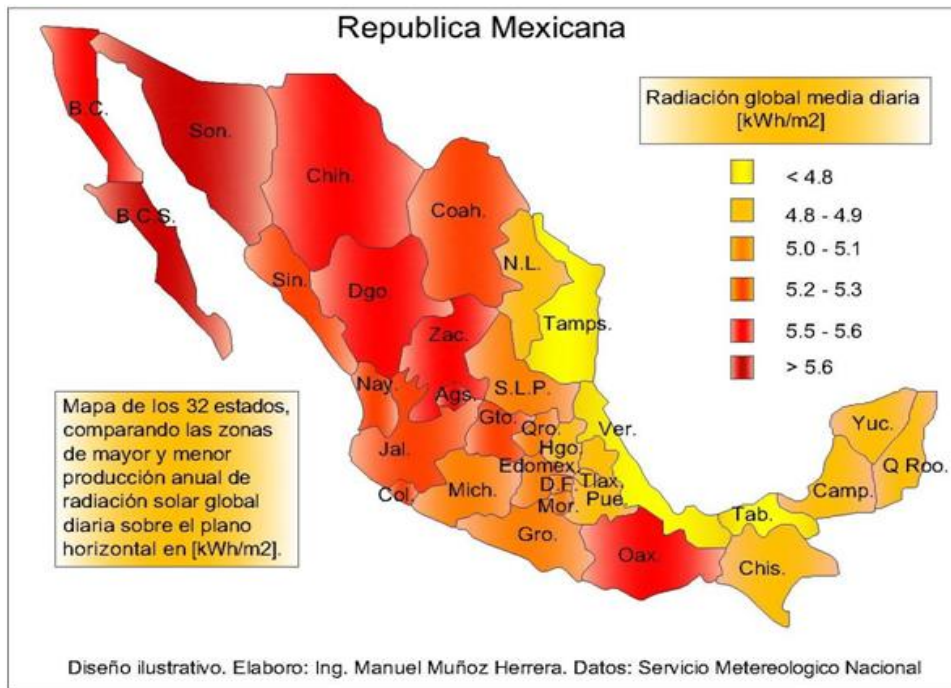


Figura 1.3. Radiación global media diaria en la República Mexicana.

Fuente: SUELO SOLAR. Grandes oportunidades para las energías renovables en México.
<http://www.suelosolar.com/newsolares/newsol.asp?id=8108>

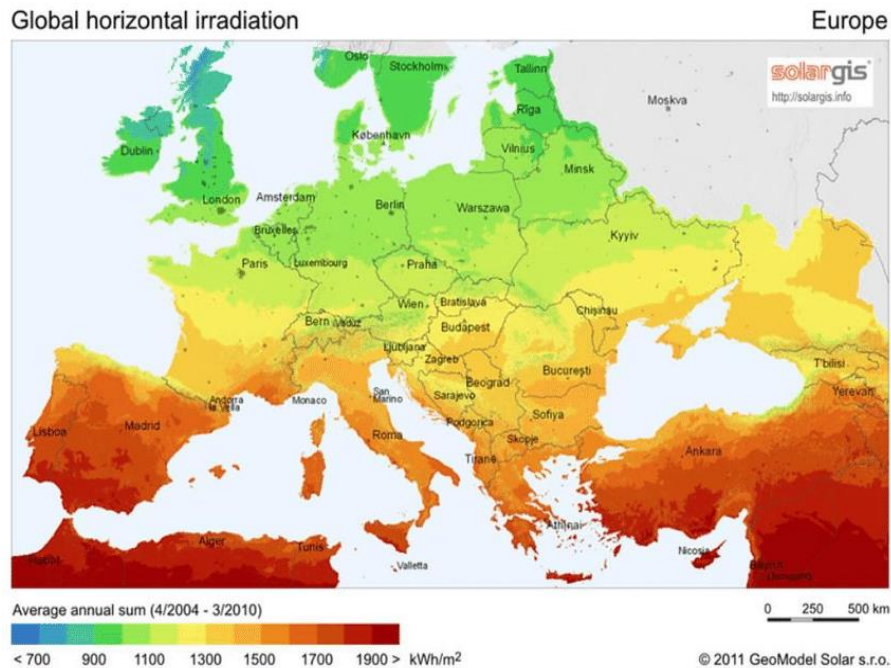


Figura 1.3. Radiación solar global para el continente europeo.

Fuente: Global solar horizontal irradiation. https://www.researchgate.net/figure/Global-solar-horizontal-irradiation-in-Europe-Source-GeoModel-Solar-2011_fig14_311487436

Se puede observar que los países que tienen una mayor radiación solar son los que tienen una latitud menor, que son principalmente los que están en la cuenca del Mediterráneo, a diferencia de los países que se encuentra más al norte del continente, que tienen una radiación solar sensiblemente menor.

1.4. Sistemas de Calentamiento

Los sistemas de calentamiento que en la actualidad existen en la Ciudad de México se pueden clasificar en tres tipos: Con base en combustible fósil, eléctricos y con energías renovables. Dentro de los primeros se tienen los calentadores de gas, sea este L.P. o natural. A su vez dichos calentadores se clasifican en instantáneos o de paso y con depósito o de acumulación. Cabe señalar que el uso de uno u otro tipo depende del propósito que se le dará, si éste será muy puntual, es decir a determinada hora del día, se recomienda utilizar el primer tipo, pero si es continuo entonces se sugiere emplear el de acumulación.

En cuanto al uso de calentadores eléctricos, se tienen también instantáneos y con tanque de acumulación, aunque existen un tercer tipo, de resistencia sumergible que son ciertamente muy elementales, ya que son básicamente una resistencia eléctrica sumergible, con cubierta de tubo de aluminio o sin ella, ciertamente este tipo de calentadores tiene un uso muy

restringido. En lo que se refiere a los instantáneos o de acumulación se recomienda su uso en forma similar a los calentadores de gas, dependiendo del uso cotidiano que se les dará, con la salvedad de que los calentadores eléctricos instantáneos se usan más en negocios, sobretodo de servicios, en los que no se requiera de un servicio centralizado de agua caliente sanitario.

Finalmente están los Calentadores de Solares, que si bien han tenido un importante impulso en los últimos años, aún no tienen un porcentaje significativo en el mercado de calentadores de agua caliente sanitaria. También existen diferentes tipos de Calentadores Solares a saber, los de placa plana, los de tubos evacuados y los Heat Pipe, los cuales en adelante se describirán sus características.

1.5. Calentadores solares

1.5.1. Desarrollo histórico de los calentadores solares

A pesar de que desde la antigüedad se reconoció a la luz del Sol como una fuente de energía, precisamente de luz pero sobretodo de calor; solo basta recordar la historia, que raya en la leyenda, de Arquímedes incendiando a la flota romana con espejos cóncavos; y que a través de la historia se han desarrollado todo tipo de aparatos para aprovechar el calor que Sol irradia sobre la Tierra, no fue sino hasta el siglo XIX que se pensó en aprovechar el calor solar para calentar agua, aunque desde el siglo XVII (1767) el naturalista suizo Horace Bénédict de Saussure construyó el primer colector solar plano, que aplico a diferentes usos, como el cocer fruta⁹.

En 1891 es patentado, por Clarence Kemp¹⁰, el primer calentador de agua solar, que recibe el nombre de "Climax". Este calentador es comercializado en todo E.E.U.U. Dicho calentador estaba basado en el principio de la caja caliente de Saussure. Para el siglo XX, William Bailey (1908)¹¹ patenta su el calentador de agua solar "Día y noche". Este calentador tiene un diseño similar al "Climax" de Kemp, aunque presentaba varias ventajas, como son:

El calentador solar consistía en dos partes: el colector solar y un depósito de agua. El colector estaba formado por tuberías de cobre situadas sobre una placa metálica pintada de negro. Todo el conjunto se situaba dentro de una caja de vidrio, que fungía como aislante. El colector era abastecido por un depósito de almacenamiento de agua situado por encima de él. El depósito de agua caliente se encontraba dentro de una caja de madera aislada mediante caliza en polvo, lo que mejoraba la retención del calor. El agua calentada en el colector, se almacenaba en el depósito donde se mantenía caliente tanto por la noche como durante el mal tiempo.

⁹ H2O TEK. La historia del boiler solar. <https://h2otek.com/blog/la-historia-del-boiler-solar/>

¹⁰ *EnergíaSolar.mx. Historia de la energía solar. www.energiasolar.mx/inventos/historia-energia-solar.html*

¹¹ EcoInventos. Uno de los primeros calentadores solares de la Historia (2014).

<http://ecoinventos.com/calentador-solar/#ixzz3a3odLLWa>

Cabe hacer notar que no se necesitaba bomba para impulsar el agua entre el colector y el depósito acumulador, ya que calentador solar “Día y noche” operaba según el principio del termosifón (el agua caliente más ligera que la fría tiende a elevarse por sí sola). Es de hacer notar que el calentador antes descrito presentaba muchas de las características de los calentadores solares planos actuales.

En 1936 Charles Greeley Abbott¹² inventa un calentador solar sumamente eficiente, que se popularizó sobre todo en Florida, California y en algunos otros lugares. Es importante hacer notar que esta industria, de los calentadores solares, tuvo un crecimiento importante a mediados de la década de 1950, cuando debido al bajo costo del gas natural prácticamente se abandonó el uso de la energía solar, dicho abandono perduró hasta el decenio de 1970, cuando debido al aumento del precio del petróleo y del gas, se dio un resurgimiento del uso de la energía solar para uso doméstico.

1.5.2. Tipos de Calentador solar

Un calentador solar es un dispositivo que aprovecha la energía solar térmica, fundamentalmente para calentar agua o aire. Los principales componentes de un calentador solar se describen a continuación (Figura 1.4):

- Colector: Es la parte que recibe la radiación solar térmica. Por el circula el agua que necesita ser calentada.
- Termotanque: Es el recipiente en donde se puede ir acumulando el agua calentada y a su vez por donde entra el agua fría, esto puede ser así debido al hecho de que el agua caliente es un poco menos densa que el agua fría, por lo que esta circula por la parte baja del tanque y aquella por la parte superior del mismo.

¹²*EnergíaSolar.mx. Historia de la energía solar. www.energiasolar.mx/inventos/historia-energia-solar.html*

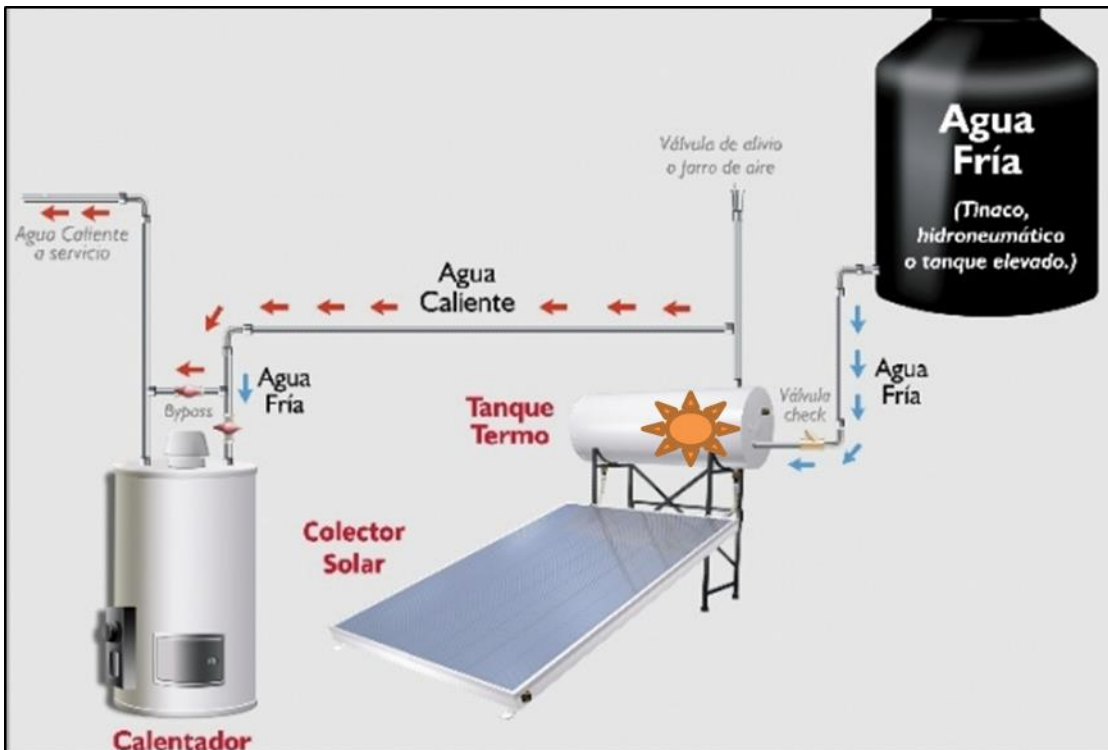


Figura 1.4. Esquema general de un calentador solar.

Fuente: MetrosCúbicos. Un calentador solar para tu casa.

<https://www.metroscubicos.com/articulo/decoracion-y-hogar/2013/06/18/un-calentador-solar-para-tu-casa>

Es importante acotar que en la actualidad no existe un solo tipo de calentador solar, como lo es el Calentador Solar Plano descrito anteriormente, sino que existen otros tipos de calentadores solares como son los de Tubos Evacuados y los calentadores solares con Tubos con Transmisor de Calor (Heat Pipe), así como también los calentadores solares de concentración, que por lo regular no se utilizan, en el ámbito doméstico, para calentar agua sanitaria.

En cuanto a los calentadores de Tubos Evacuados, sobresale la característica principal, de que están constituidos precisamente por tubos de vidrio en cuyo interior se ha evacuado el aire, en dicho interior contiene otro tubo, que puede ser de cobre o también de vidrio, recubierto de una película selectiva, que contribuye al igual que el vacío dentro del tubo, a que el agua calentada tenga una mayor temperatura, esto último debido a que no hay pérdidas de energía por convección. Cabe señalar que también se llegan a equipar con una placa reflectante que se coloca debajo del plano de los tubos.

En lo referente a los calentadores de tubos con transmisor de calor, se puede mencionar que también están constituidos por tubos de vidrio en cuyo interior se ha evacuado el aire, con la característica particular que dentro del tubo de vidrio evacuado se encuentra un tubo de cobre, llamado tubo de calor o Heat Pipe, que contiene un líquido volátil que no puede salir

de este tubo de cobre. Este líquido es el que al evaporarse transmite el calor, mediante unas aletas que sujetan el tubo de cobre, al agua que se pretende calentar¹³.

Los calentadores solares de concentración son de mayor costo, así como mayores sus dificultades técnicas y de mantenimiento por lo que prácticamente no se utilizan para calentar agua sanitaria de uso doméstico. En la tabla 1.1 se puede observar distintos calentadores y sus características de operación.

Tabla 1.1. Calentadores solares de placa plana, y su rango de temperatura promedio dentro del termotanque.

Tipo de Colector	Marca del calentador solar	Concentración	Rango de Temperatura promedio (°C)	Capacidad del termotanque (L)	Seguimiento	Tipo de radiación
Placa plana	IUSSA (IUSASOL SCS10412)	$C \leq 1$	$45 < T < 65$	150	Estacionario	Difusa y directa
Placa plana	CALOREX	$C \leq 1$	$T > 70$	150, 240	Estacionario	Difusa y directa
Placa plana	CHROMAGEN	$C \leq 1$	$50 < T < 60$	150 - 300	Estacionario	Difusa y directa
Placa plana	ALFA SOLAR (Baja selectividad)	$C \leq 1$	$45 < T < 55$	104 - 300	Estacionario	Difusa y directa
Placa plana	ALFA SOLAR (Alta selectividad)	$C \leq 1$	$45 < T < 70$	104 - 300	Estacionario	Difusa y directa

Fuentes: Catalogo calentadores IUSA. http://www.iusa.com.mx/brochure/catalogo_calentadores.pdf

Cal-o-Rex. Calorex Solar. <http://www.calorex.com.mx/calentadores/calorex/solar/solar/calorex-solar-termosifon-150>

http://www.solaire.com.co/images/aprende_mas/CAPACITACION_ENERGIA_SOLAR_TERMICA_CHROMAGEN.pdf http://www.alfasolar.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=5:nacionales&catid=25:empresa

El tipo de calentador solar en el que se centrará el presente estudio es el Calentador Solar Plano; esto debido a que este tipo de calentador es de las marcas existentes en el mercado mexicano.

¹³<http://proyectedeenergiahrenovable.com/Termicos-Solares/Tipos.asp>

1.6. Bombas de calor

1.6.1. Desarrollo histórico de las bombas de calor

El desarrollo de las bombas de calor está ligado, o es consecuencia, del desarrollo tecnológico de los refrigeradores y de los sistemas de aire acondicionado actuales (los cuales en sí son bombas de calor). Estos a su vez son consecuencia de desarrollo de la termodinámica de los gases, que se vino desarrollando desde el siglo XIX.

En 1852 el científico conocido como Lord Kelvin¹⁴ sentó las bases de las bombas de calor con el fin de que se pudiera aplicar en lograr un ambiente agradable y sano. Kelvin, con base en los conceptos de ciclo y reversibilidad establecidos por Carnot en 1824, menciona que: El calor puede ser absorbido a través de un gas refrigerante. El calor se transmite de una temperatura alta a una más baja. El cambio de estado de líquido a gas absorbe calor. La presión y temperatura de un gas están directamente relacionadas.

Se considera que quien inventó la primera bomba de calor propiamente dicha, es decir, que se proponía producir calor para aprovecharlo en calentar casas o edificios fue Robert C. Webber¹⁵. La idea se le ocurrió al quemarse la mano cuando tocó accidentalmente los tubos de salida de un congelador con el que estaba experimentando. Posteriormente, de acuerdo con Master Therm, él conectó la tubería de salida del congelador a un calentador de agua caliente y, aprovechando el exceso de calor que se producía en dicho congelador, conectó el agua calentada a un bucle de tuberías para calentar el aire que circulaba por estas. Finalmente, por medio de un ventilador, podía propulsar el aire caliente en el edificio.

Por todo lo anterior se puede mencionar que el desarrollo de las bombas de calor básicamente está muy relacionado con la procuración del confort en los hogares, puesto que dos de las aplicaciones que más se han desarrollado, la refrigeración y el aire acondicionado, proporcionan una comodidad que en la gran mayoría de las épocas de la humanidad no se ha tenido. También es importante señalar que las bombas de calor casi no se emplean para calentar agua, por ello la propuesta de este trabajo de investigación será pensando en un dispositivo que se empleará para ese fin.

Ya que una bomba de calor es un dispositivo que puede transferir energía calorífica desde una fuente fría hacia otra más caliente, para lo cual se requiere que se realice trabajo y esta máquina es muy similar a como operan los refrigeradores domésticos, aunque en lugar de extraer el calor de un recinto cerrado y disiparlo en el exterior, extrae calor del exterior para cederlo, digamos, a un calentador solar residencial.

Es importante señalar que una bomba de calor es una máquina termodinámica que opera mediante un circuito frigorífico clásico, es decir, que está compuesta por un compresor, evaporador, válvula de expansión y un condensador. Es de hacer notar que el fluido de trabajo, que circula por todos estos componentes, se le puede dar el nombre de fluido frigorífico y dos propiedades muy importantes de este son el calor latente de evaporación y

¹⁴www.docsetools.com/articulos-utiles/article_105674.html

¹⁵ Coche español. La historia de la bomba de calor. <http://www.automotriz.biz/coches/car-maintenance/general-car-maintenance/126716.html>

el calor latente de condensación. En la figura 1.5 se muestra el esquema de funcionamiento de la bomba de calor.

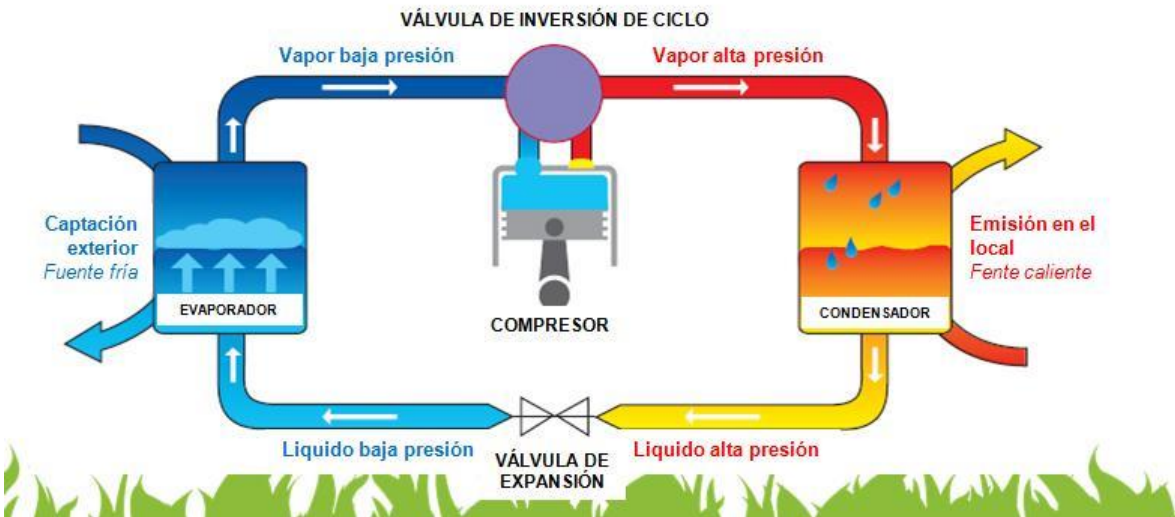


Figura 1.5. Esquema de Bomba de Calor. Fuente: Ciclos de refrigeración. Refrigeradores y bombas de calor.

<http://ciclosderefrigeraciontermodinamica.blogspot.mx/2015/02/refrigeradores-y-bombas-de-calor.html>

Como se puede deducir de la Figura 1.5, es en el evaporador donde se capta la energía del medio ambiente en forma de calor. El calor es absorbido por el fluido frigorífico a temperatura constante, pasando del estado líquido al gaseoso, dicho cambio de estado se realiza a presión constante.

A continuación el vapor del frigorífico se comprime en el compresor, con lo que se logra un vapor a alta presión y a una temperatura mayor a la temperatura ambiente. Al pasar por el condensador el frigorífico cede la energía calorífica al medio que se pretende calentar, para nuestro caso el calentador solar. El condensador puede tener aletas enfriamiento como un radiador de automóvil y el condensador es también un intercambiador de calor y puede ser enfriado por aire o agua. Aquí el fluido de trabajo vuelve a experimentar un cambio de estado.

Es importante resaltar que el calor cedido por el condensador es igual al calor absorbido por el frigorífico en el evaporador más el calor que se obtiene del trabajo mecánico del compresor. Una vez que el fluido ha salido del condensador atraviesa una válvula de expansión donde se produce la expansión, convirtiéndose en vapor húmedo a baja presión. De esta forma entra al evaporador para empezar un nuevo ciclo.

La ventaja de una bomba de calor consiste en que la energía consumida por el compresor es pequeña en comparación con la cantidad de energía calorífica desprendida por el condensador, ya que hay equipos que con un suministro eléctrico, por ejemplo, de 1 kW pueden proporcionar 3kW térmicos¹⁶.

¹⁶https://www.gasnaturalfenosa.es/hogar/ahorro_y_eficiencia_energetica/climatizacion_eficiente/aire_acionado_y_bomba_de_calor

1.6.2. Clasificación de las bombas de calor

Así como hay diferentes tipos de máquinas en general y en particular diferentes tipos de máquinas térmicas que pueden diferir con base en diferentes características de funcionamiento, como puede ser la potencia o el combustible usado, como los motores de gasolina y los motores diésel; también existen diferentes tipos de bombas de calor, que difieren principalmente en el uso que se les pretende dar y que se utiliza como fuente o foco frío y como foco o fuente caliente. La clasificación más usual de estas es:

- Bombas de calor aire-aire
- Bombas de calor aire-agua
- Bombas de calor agua-aire
- Bombas de calor agua-agua

1.6.2.1. Bomba de calor aire-aire

Es probablemente el tipo de bomba de calor más utilizada, puesto que la fuente fría, de donde se toma el calor, es el aire exterior. Esta circunstancia redundante en que la fuente de calor es prácticamente inagotable, Por lo general, este tipo de bomba de calor, en los meses fríos del año toma el calor del aire exterior y lo lleva a un recinto cerrado, regularmente el interior de un edificio, calentando así el aire interior. En el verano se suele utilizar en sentido contrario, es decir, toma el calor del aire interior y lo transporta hacia el exterior. Una limitante de este tipo de dispositivos es que es vulnerable a las condiciones climatológicas, ya que su rendimiento disminuye sensiblemente a temperaturas congelantes, de menos de 0° C. La Figura 1.6 muestra un esquema de este tipo de bomba de calor.

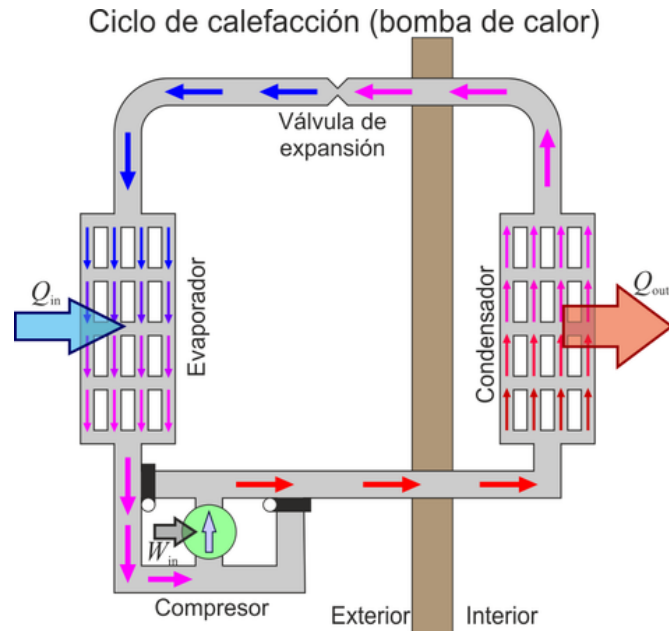


Figura 1.6. Esquema de una Bomba de Calor aire-aire

Fuente: Ciclos de refrigeración. Refrigeradores y bombas de calor

<http://ciclosderefrigeraciontermodinamica.blogspot.mx/2015/02/refrigeradores-y-bombas-de-calor.html>

Este tipo de bomba de calor es lo que se conoce popularmente o comercialmente como aire acondicionado. Se utiliza para climatizar los interiores de edificios y casas habitación. Es de destacar que en clima invernal se pretende lograr un clima cálido y en clima caluroso se trata de lograr un ambiente fresco, para lo cual en un escenario frío, en el evaporador, que se puede ver en la figura 1.6, entra calor del foco frío y el condensador transmite calor al foco caliente, en el caso de un escenario cálido el proceso se invierte, absorbiendo calor lo que en la figura 1.6 se marca como condensador y transmitiendo dicho calor al aire exterior a través de lo que se muestra como evaporador.

1.6.2.2. Bomba de calor aire-agua

En forma similar al tipo de bomba de calor anterior, el calor se absorbe del aire exterior, transfiriendo dicha energía a un condensador de agua donde además se agrega el calor generado por el trabajo del compresor. En estos dispositivos se puede calentar agua en un rango de temperatura de entre 30 y 60°C. Y de igual forma está limitada por las condiciones climatológicas. Por esta razón este tipo de bombas de calor se recomiendan para zonas en donde las temperaturas exteriores no sean, sobre todo en los meses fríos del año, extremas, es decir, muy bajas (por debajo de los cero grados centígrados). Se estima un ahorro anual del 70% con respecto al uso de combustibles fósiles. En la figura 1.7, está ilustrada una bomba de calor de este tipo:

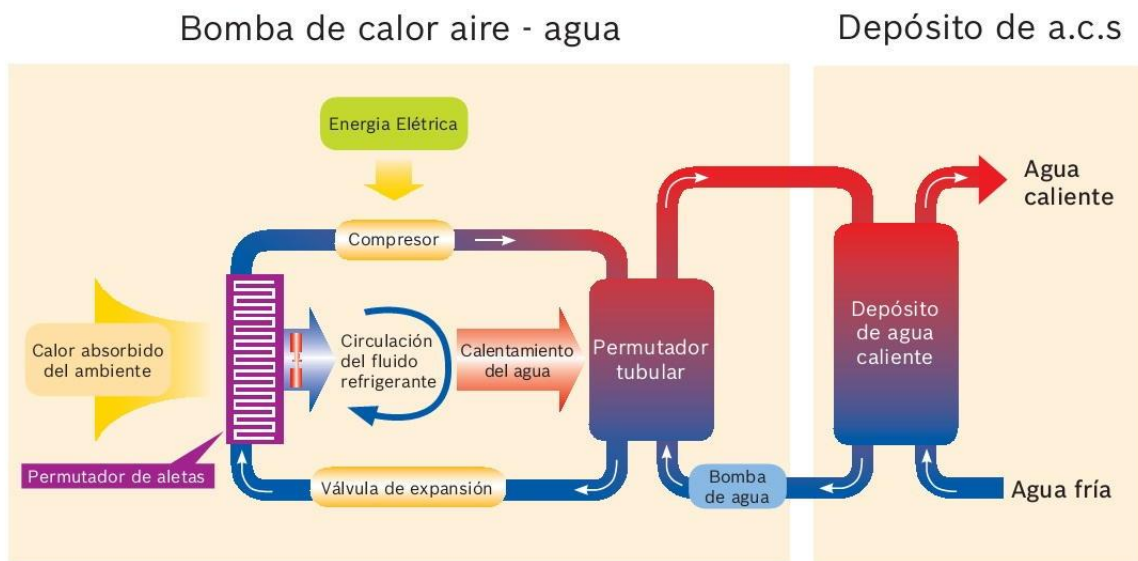


Figura 1.7. Esquema de Bomba de Calor aire-agua

Fuente: https://gasfriocalor.com/images/Tecnico/Bomba_de_calor/Esquema_Acumuladores_Junkers_G.jpg

Como se puede observar en la figura 1.7 el calor del medio ambiente es absorbido por el evaporador (que es un intercambiador de calor de aletas) y cedido, con el incremento energético del compresor, al agua que se pretende calentar mediante el condensador (que es un intercambiador de calor tubular). Es pertinente aclarar que en la figura llaman permutador al intercambiador de calor.

1.6.2.3. Bomba de calor agua-aire

Como ya se indicó, las bombas de calor cuyo foco frío es el aire exterior presentan la limitante de las condiciones climatológicas, sobre todo cuando las temperaturas están por debajo de los cero grados centígrados, e incluso en ocasiones pueden presentar problemas muy cercanos al 0° C aun sin rebasarlo (bajo rendimiento, problemas de desescarche). De ahí que el tener como fuente de calor el agua tiene ventajas importantes, como son temperaturas más uniformes a lo largo de todo el año y coeficientes de rendimiento más constantes. Ahora bien, debido al mayor calor específico del agua se pueden tener equipos más pequeños con igual potencia calorífica, y en consecuencia coeficientes de rendimiento superiores. De esta manera se extrae calor de una fuente de agua y se transfiere a un circuito de aire. Los depósitos de agua son por lo común aguas superficiales, ya sea de ríos o de lagos, aunque también se suele recurrir a aguas subterráneas pocas profundas, que mantienen un rango de temperatura, a lo largo del año, de entre 10° C y 15° C. Este tipo de bombas de calor son viables cuando se tiene cerca, ya sea un pozo, río, lago o manto freático.

1.6.2.4. Bomba de calor agua-agua

El funcionamiento de este tipo de bomba de calor es similar al tipo anterior, es decir, el foco frío es un circuito de agua del cual se transferirá el calor (río, lago, pozo, etc.), más el producido por el compresor del sistema, a otro circuito de agua. Este calor también se puede utilizar para calentar edificios a través del sistema de suelo radiante. De esta forma se pueden tener temperaturas de 35° C e inferiores. Cabe señalar que este sistema, de suelo radiante, suele alcanzar coeficientes de rendimiento del orden de 5. La figura 1.8 muestra a continuación nos muestra la disposición de estos sistemas (tanto el agua-aire, como el agua-agua):



Figura 8. Esquema de Bomba de Calor agua-agua y/o agua-aire.

Fuente: frigasat. Aerotermia. <http://www.frigasat.com/renovables/aerotermia.html>

Se observa en la figura 1.8 que la característica sobresaliente de las bombas de calor agua-agua y agua-aire es el tener disponible una fuente cercana de aguas, preferentemente superficiales.

1.6.2.5. Bomba de calor geotérmica

Finalmente existe un tipo de bomba de calor que tiene como foco frío, en lugar del aire o el agua, el suelo. Dichas bombas se conocen como bombas de calor geotérmicas. Una ventaja importante es que la temperatura del suelo es constante y uniforme, con lo que estas máquinas están menos limitadas por las condiciones climatológicas que los tipos descritos anteriormente. La figura 1.8 ilustra este tipo de bomba de calor.

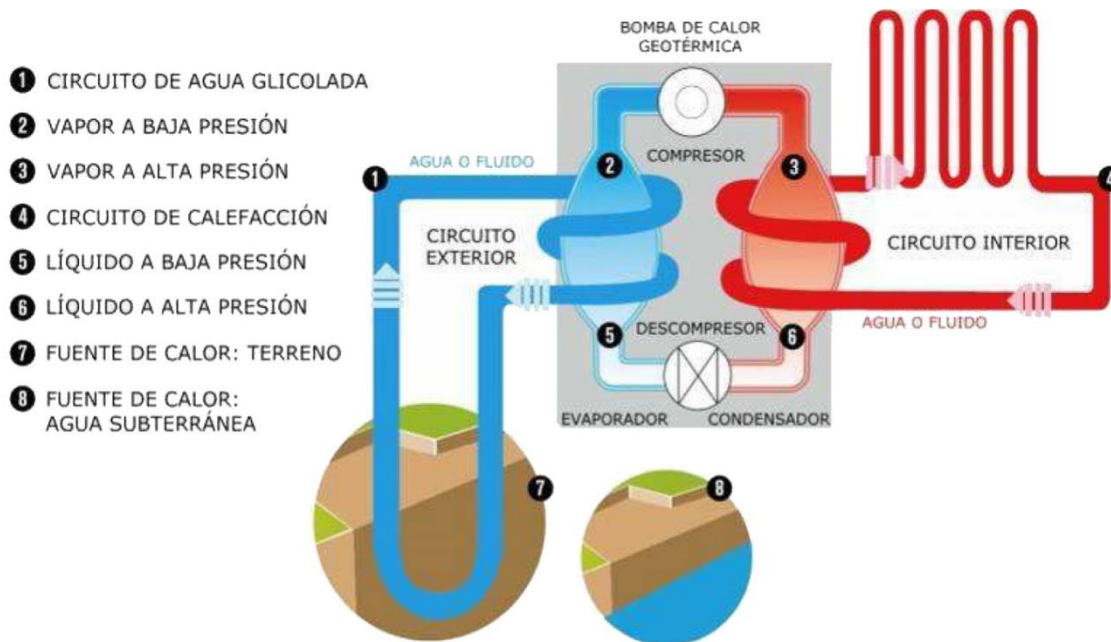


Figura 9. Esquema de Bomba de Calor geotérmica

Fuente: <http://tukimica.blogspot.com/2013/11/bombas-de-friocalor.html>

1.7. Refrigerantes

Los refrigerantes son los fluidos, que son considerados fluidos de trabajo en la bomba de calor, viene a transportar el calor desde el punto frío hasta el llamado punto caliente, es decir, que transportan el calor del evaporador, que se encuentra a baja temperatura, hasta el condensador a alta temperatura.

Lo primero que hay que mencionar es que existen dos tipos de fluidos refrigerantes, los llamados refrigerantes primarios o fluidos frigorígenos, los cuales tiene la característica, para el transporte de calor, de cambiar de fase (de líquido a vapor) aprovechando el calor latente de vaporización. Y los refrigerantes secundarios o fluidos frigoríficos, los cuales al no cambiar de fase, solo operan mediante el calor sensible, o sea a través de diferencias de temperatura.

Cabe agregar que son los fluidos frigorígenos los que se utilizan principalmente en las bombas de calor, sobre todo si estas son sistemas frigoríficos basados en la compresión mecánica.

Ahora bien, es importante señalar que para elegir un determinado fluido refrigerante es necesario considerar las propiedades termodinámicas, físicas, químicas, así como las condiciones de seguridad y de operación, principalmente, esto último, en lo referente a las cuestiones climatológicas, de estas sustancias de tal forma que se puedan cubrir los aspectos de control de la temperatura, presiones de trabajo, así como también el costo de la inversión inicial, entre otras consideraciones.

- En el segundo grupo, si es tóxico o corrosivo, o si al mezclarse con el aire puede ser combustible o explosivo a un 3.5% en volumen. A este grupo pertenecen el amoníaco, el SO₂ y algunos clorocarbonados.

- En el tercer grupo, si su mezcla con el aire es combustible o explosiva a menos de un 3.5% en volumen. Aquí se encuentran alcanos como el propano y el butano entre otros.¹⁷

1.8. Ventajas y desventajas de las bombas de calor

En general son equipos muy eficientes: con 1 kW eléctrico pueden aportar 3 kW térmicos y existen diferentes tipos, para diferentes necesidades y condiciones (como las climatológicas), además de que pueden operar en conjunto con las fuentes renovables de energía y/o con fuentes no renovables de energía (Sistemas Híbridos). Y son aptas para todo tipo de superficies.

Es importante abundar en las ventajas de las bombas de calor con respecto al medio ambiente. A modo de ejemplo se tiene que la EHPA (European Heat Pump Association) informa que aproximadamente 3.8 millones de hogares en la Unión Europea tienen instaladas bombas de calor tanto para calefacción como para agua caliente sanitaria. Dichas instalaciones producen 41 TWh de energía térmica, con lo que se dejan de consumir 29 TWh de energía térmica provenientes de fuentes convencionales de energía (Fuentes no renovables).

Las desventajas que puede tener una bomba de calor son que a temperaturas muy bajas el rendimiento de estos equipos disminuye, es decir son hasta cierto punto susceptibles o limitadas por las condiciones climatológicas, ya que en climas muy fríos (por lo regular a temperaturas por debajo de 0°C) pueden no ser tan eficientes. La inversión económica pudiera llegar a ser alta, dependiendo del uso que se le vaya a dar, esta pudiera ser una condicionante importante.

1.9. Sistemas Híbridos

Los sistemas con mayor eficiencia energética no se basan en la utilización de un solo sistema de energía renovable como puede ser la energía solar, sino en utilizar un sistema híbrido, en donde se puedan aprovechar las ventajas de cada sistema y así, entre otras cosas, las potenciales desventajas. De hecho los sistemas híbridos no son una novedad, ya que se han venido usando constantemente, aunque dichas combinaciones de sistemas no se han restringido a las fuentes renovables. Así se pueden utilizar en la actualidad sistemas de energía renovables combinados con fuentes no renovables de energía.

Dichas combinaciones pueden ser de dos o más tipos de fuentes de energía. Tales como:

¹⁷ Rey, Francisco J., (2005).

- Generadores Diésel con Energía Eólica.
- Generadores Diésel con Energía Solar Fotovoltaica.
- Energía Solar Fotovoltaica con Energía Eólica.
- Generadores Diésel, Energía Solar Fotovoltaica y Biogás.
- Generadores Diésel, Energía Solar Fotovoltaica y Energía Eólica.
- Energía Solar Fototérmica con Bombas de Calor.

Para el presente trabajo de investigación se analizará el sistema híbrido, que está compuesto por un calentador solar y una bomba de calor. Este sistema cuenta, aparte de los dispositivos propios de los calentadores solares (colectores, depósitos de agua, sistemas de mando y control y accesorios) con una bomba de calor convencional aire-agua (aunque pudieran ser de otros tipos, como agua-agua o geotérmicas).

Este tipo de sistema híbrido se utiliza para calentar agua sanitaria, tanto de uso doméstico como en hoteles, y para calentar el agua de las albercas. Es de señalar que estos sistemas, tienen un potencial importante en el futuro inmediato debido, entre otras cosas, a que pueden ser un medio para lograr la popularización de las fuentes renovables de energía. A continuación se muestran en la tabla 1.2 características técnicas y costos de algunas bombas de calor para agua caliente sanitaria (ACS) existentes para el mercado de México.

Tabla 1.2. Bombas de Calor existentes en el mercado y sus características de operación.

Tipo de Bomba de Calor (marca)	Capacidad del tanque de almacenamiento (L)	Potencia Térmica (w) (aire a 20°C)	Rango de trabajo (temperatura del aire, °C)	COP	Temperatura máxima al Alcanzada (°C)	Precio (€)
Ariston Nuos Primo 80	80	750	10 - 40	2.5*	55	677.47
Panasonic Aquarea PAW-DHW80	80	2350	-7 - +35	2.65*~	55	1015.74
HTW AT-O-80VB1	80	200	-7 - +43	2.8~	70	611.61
Beretta Acquazenit 80	80	2350	7 - +35	2.65~	55	829.54

Fuentes: GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR ARISTON. <http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-para-acs-ariston-nuos-primo-80>.

GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR PANASONIC. <http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-panasonic-aquarea-dhw-paw-dhwm80znt>.

GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR AEROTERMIA. <http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-para-acs-htw-at-o-80vb1>

GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR BERETA. <http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-beretta-acquazenit-80>

En la tabla anterior se puede observar que entre mayor sea la potencia térmica de la bomba de calor mayor será el rango de temperatura de trabajo, puesto que con potencias de 2000 w o mayores estas pueden operar desde temperaturas de trabajo negativas, aunque evidentemente el costo es mayor.

Cabe señalar que los fabricantes de calentadores solares recomiendan que se tenga como respaldo los “boilers de gas”. Aunque la propuesta del presente trabajo de investigación, es sustituir a estos calentadores de gas en su papel de respaldo, por las bombas de calor, es decir la posibilidad de que se tenga una fuente totalmente renovable para calentar agua existente; lo cual se describirá en los siguientes capítulos basados en la práctica cotidiana y comercial de sistemas ya existentes en el mercado, junto con la implementación de una bomba de calor como complemento o respaldo de un calentador solar.

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS, FÍSICAS, MEDIOAMBIENTALES Y DE POBLACIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO: CIUDAD DE MÉXICO.

2.1. Características Geográficas, Físicas y Medioambientales

La Ciudad de México actualmente es la entidad número 32 de la Federación, se encuentra ubicada, geográficamente, dentro de las coordenadas siguientes: Al norte 19° 36´, al sur 19° 03´, al este 99° 57´, y al oeste 99° 22´. Colindando, al norte, este y oeste, con el estado de México, y al sur con el estado de Morelos.

La Ciudad de México posee un territorio de 1,499 km² (que representan el 0.1% del territorio del país), repartidos entre 16 delegaciones políticas. Al área urbana le corresponde una extensión del 48% (que viene a ser propiamente la ciudad) y a la zona rural el restante 52%. Dentro de esta área rural encontramos actividades agrícolas, forestales y pecuarias. Es de destacar que la Ciudad se encuentra ubicada al sur del Valle de México, el cual está rodeado por la Sierra Madre Oriental, destacando el cerro del Ajusco. También es de destacar que tiene una altitud promedio de 2 300 m sobre el nivel medio del mar. Esta entidad federativa está asentada sobre el lecho de lo que fue un lago, no es de sorprender, a pesar del paisaje urbano cotidiano, que todavía existan cuerpos de agua y ríos como son, entre otros: Mixcoac (entubado), Churubusco (entubado), Los Remedios, La Piedad (entubado), Tacubaya, Consulado (entubado), La Magdalena y Canales como: Chalco, General, Nacional y Cuemanco. En cuanto cuerpos de agua destacan: la Presa Anzaldo, Lago San Juan de Aragón (artificial), Lagos de Chapultepec (artificiales), Lagos de Xochimilco y el Canal del desagüe profundo (artificial)¹⁸.

En cuanto al clima, en la figura 2.1 se tiene que la mayor parte del territorio (87%) es subhúmedo, mientras que hacia la parte norte, una pequeña zona (7%) de clima seco y semiseco y hacia el sur templado húmedo (6%). Se presenta una precipitación pluvial promedio de entre unos 600 mm, en la parte seca, a unos 1200 mm anuales en la parte húmeda. La temperatura media anual se ubica alrededor de 16° C (algunas fuentes la ubican en un rango de 10 a 17° C)¹⁹. Entre los meses de primavera y verano (sobre todo de marzo a mayo) se dan los días más calurosos, con temperaturas que pueden alcanzar los 29 °C, así como también la temporada de precipitaciones más intensas se da en los meses de agosto y septiembre.

¹⁸ Inafed. Medio Físico. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/mediofisico.html>

¹⁹ Inafed. Medio Físico <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/mediofisico.html>

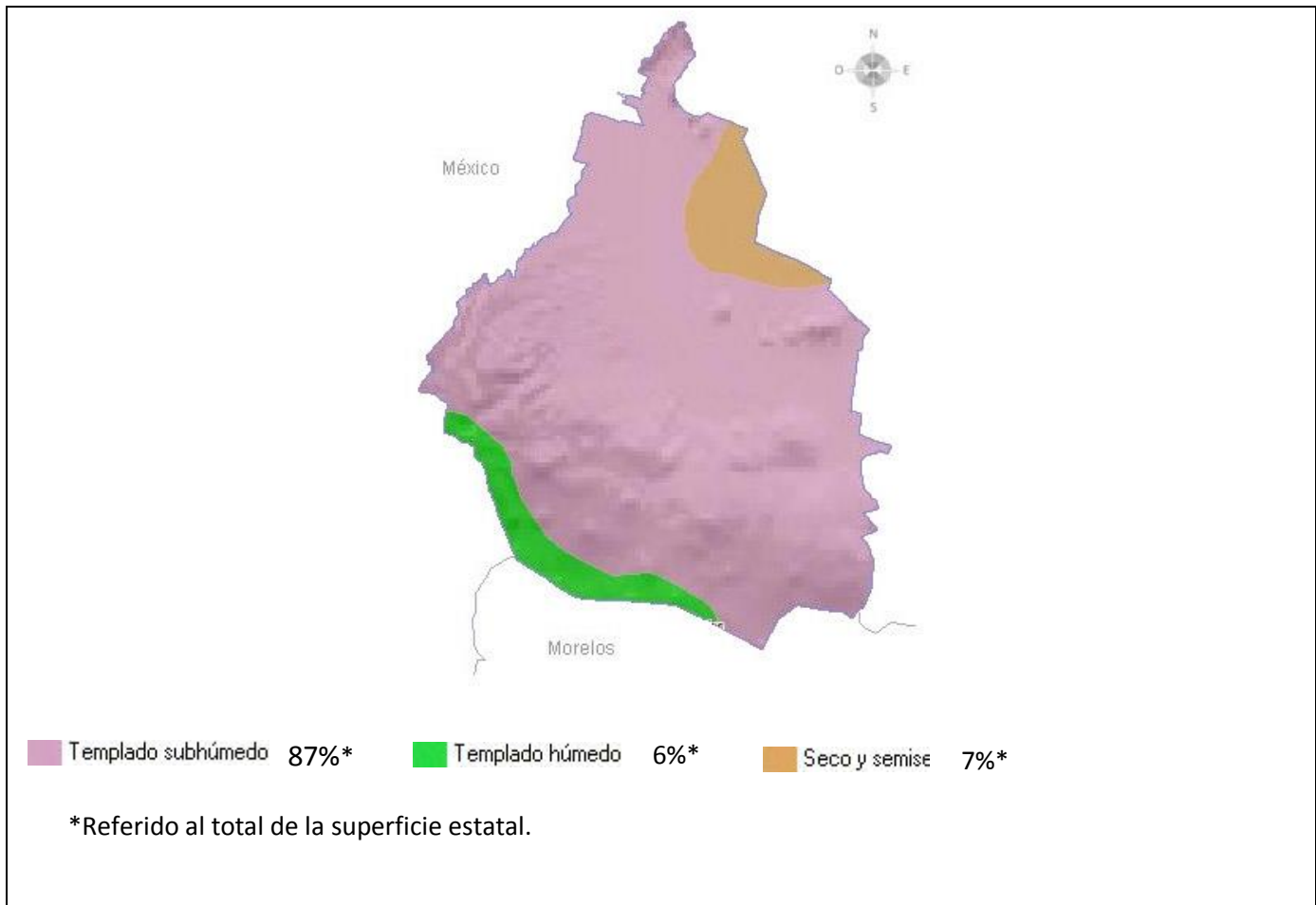


Figura 2.1 Climas existentes en la Ciudad de México.

Fuente: INEGI. Ciudad de México.

<http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09>

En el invierno las temperaturas pueden llegar a descender hasta los 9 °C e incluso alcanzar los 0°C, sucediendo esto en los meses de diciembre y enero, que son por regla general los más fríos del año. Por otra parte, uno de los datos importantes para llevar a cabo el presente trabajo de investigación es la cantidad de radiación solar que se tiene en la Ciudad de México. A continuación se muestran, en la tabla 2.1, los datos de la irradiación solar para todos los meses del año, también se incluyen los valores mínimo, máximo y medio.

Tabla 2.1. Radiación solar mensual (en kWh/m²), durante el año 2016, en la Ciudad de México.

Estado	Lugar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Min	Max	Med
CDMX	Tacubaya	5.4	6	6.4	5.9	5.3	5.1	4.5	4.9	4.5	4.8	5.2	5.2	4.5	6.4	5.3

Fuente: smartbitt. RADIACIÓN SOLAR. <http://energiasolar.smartbitt.com/radiacion-solar/>

Como se observa en la tabla 2.1 los niveles de radiación, en la Ciudad de México, oscilan entre unos valores mínimos, de entre 4.5 y 4.9, que se da predominantemente entre los meses del otoño y unos valores máximos, de entre 5.9 y 6.4, que se dan en los primeros meses de primavera, pasando por los valores medios, de entre 5.1 a 5.4, valores que ciertamente se tienen durante unos meses del invierno, pero que también los encontramos hacia finales del otoño y de la primavera, de lo que se puede deducir que en realidad no hay una época predominante, en cuanto a radiación solar se refiere, durante el año.

2.2 Datos de población

La Ciudad de México es la segunda entidad con el mayor número de habitantes del país (el estado de México es la entidad con mayor población), ya que, para el año 2015, contaba con 8,918,653 habitantes²⁰. Como es la entidad federativa con menor superficie (tiene solo el 0.1% de la superficie total del país) tiene la mayor densidad de población de la nación, siendo esta de 5,967 habitantes por km cuadrado²¹. También es de destacar que en la Ciudad existen 2,601,323 viviendas particulares²², por lo que considerando la población que habita en esta ciudad y que las diferentes delegaciones, en que está dividida la ciudad, no tienen la misma densidad de población, se tiene que el promedio de personas por vivienda es de 3.6. Este valor es el promedio de los diferentes valores, de habitantes/vivienda, de las delegaciones que conforman la Ciudad, y que van desde 3.0 hasta 4.1 habitantes/vivienda. Cabe señalar que el promedio, de 3.6 habitantes/vivienda ha mostrado una disminución de 4.2 (en 1995) hasta el valor de 3.8 (en el 2005)²³.

²⁰ INEGI. Información por entidad. Ciudad de México.

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=09>

²¹ INEGI. Información por entidad. Ciudad de México

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=09>

²² INEGI. Información por entidad. Ciudad de México

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=09>

²³ INEGI. Red Nacional de Metadatos. <http://www3.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/3/datafile/F8>

Por otro lado, es importante señalar que el mercado de los calentadores solares se ha venido incrementando año con año, como se observa en la tabla 2.2 y la figura 2.2, donde el incremento de la superficie instalada de calentadores solares a partir del año 2001 paso de casi 450mil metros cuadrados en el 2012 hasta poco más de 2.3 millones de metros cuadrados, los cuales son incrementos absolutos.

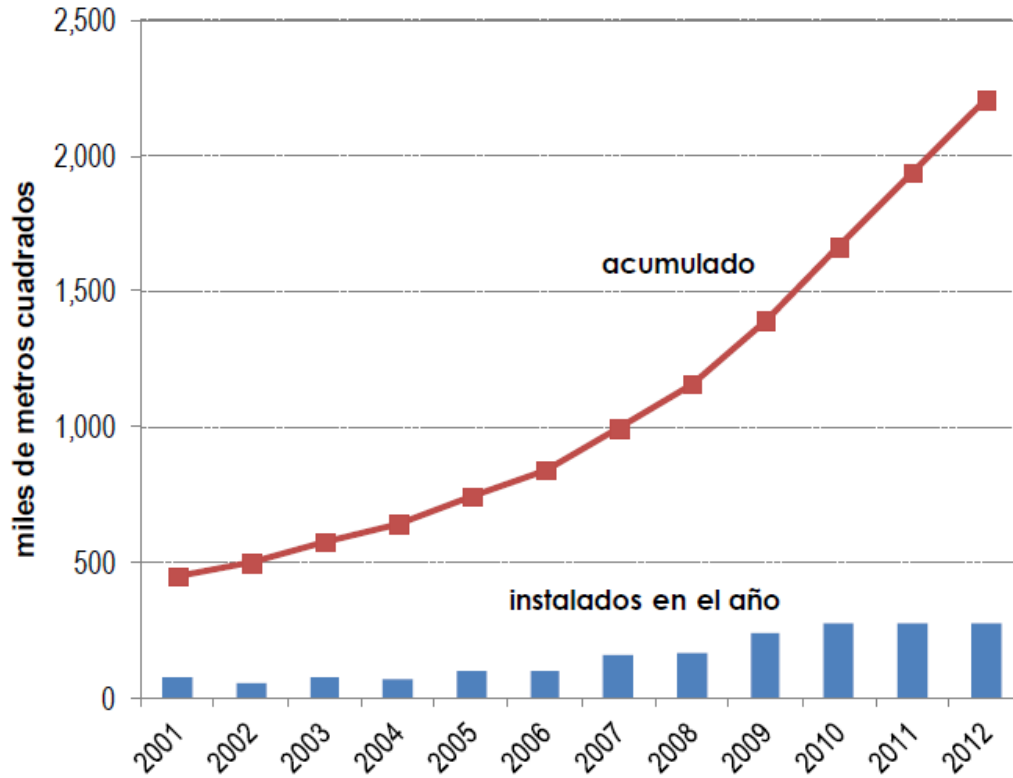
Tabla2.2. Área instalada de colectores solares, en metros cuadrados.

Año	m ² Instalados	Diferencia anual	Diferencia en porcentaje
2001	447,704	74,609	
2002	498,615	50,911	11.37
2003	573,919	75,304	15.10
2004	642,644	68,725	11.97
2005	742,922	100,348	15.61
2006	839.686	96,694	13.01
2007	993 953	154,267	18.37
2008	1 159,5860	165,633	16.66
2009	1 392,922	233,336	20.12
2010	1 665,502	272,580	19.57
2011	1 937,802	272,300	16.35
2012	2 208,200	270,400	13.95

Fuente: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA PARA SERVICIOS COMERCIALES EN LA CD. DE MÉXICO. FLORES BARRRIOS CLAUDIA ANGÉLICA.

[http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7137/tesis.pdf?sequence=1:](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7137/tesis.pdf?sequence=1)

Figura 2.2. Área instalada de colectores solares en miles de metros cuadrados (México)



Fuente: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA PARA SERVICIOS COMERCIALES EN LA CD. DE MÉXICO. FLORES BARRIOS CLAUDIA ANGÉLICA.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7137/tesis.pdf?sequence=1>:

A continuación se muestra en la tabla 2.3 (Encuesta intercensal, 2015) la cantidad de viviendas que cuentan con calentador de agua convencional y solar, en cantidades porcentuales.

Tabla 2.3. Porcentaje de viviendas que cuentan con calentadores convencionales y viviendas que tienen colectores solares.

Entidad Federativa	Número de viviendas particulares habitadas	Disponibilidad de calentador de agua (Porcentaje)			Disponibilidad de calentador solar de agua (Porcentaje)		
		Disponible	No dispone	No especificado	Disponible	No dispone	No especificado
Estados Unidos Mexicanos	31 924 863	48.82	50.40	0.78	3.18	95.79	1.02
Distrito Federal (CDMX)	2 599 081	81.47	17.64	0.88	2.20	96.46	1.34
México	4 166 570	62.77	36.38	0.85	2.59	96.31	1.10

Fuente: INEGI. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb286&s=est&c=32904>

Como se puede observar en la Tabla 2.3, el porcentaje de viviendas que disponen de calentador de gas en la Ciudad de México es muy alto, puesto que con un 81.47% supera ampliamente el porcentaje nacional y aún el del Estado de México, que si bien es menor la diferencia, esta sigue siendo apreciable, sin embargo como también se puede ver, los porcentajes de viviendas que cuentan con calentador solar son muy bajas en las dos entidades y a nivel nacional, no habiendo una diferencia significativa entre los tres casos. Los datos anteriores nos indican que existe un amplio mercado para los calentadores solares con la ventaja adicional de que, de masificarse el uso de estos tendría un impacto importante en la disminución de las emisiones contaminantes, en particular de las emisiones de dióxido de carbono.

2.3 Caso de estudio

El caso a estudiar, es el dimensionamiento de una bomba de calor para ser operada en la Ciudad de México. Ésta se utilizará como respaldo de un calentador solar con el que se calienta agua sanitaria (principalmente para bañarse) de uso doméstico. Se considerará para este caso, una familia de cinco miembros, cada uno de los cuales con un consumo aproximado de 35 litros diarios en promedio por persona²⁴. Suponiendo que se cuenta con regaderas ahorradoras y que el tiempo empleado para bañarse es el de un “baño rápido” (recordando que entre más tiempo se tarde una persona en bañarse mayor es el consumo de agua).

²⁴ Ciencia y Tecnología 10 ISEU 2010. Los ciudadanos y su relación con el agua. Cattaneo Maricel, López Sardi Estela M. http://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2012/cyt/numero10/10N_ISEU_CyT08.pdf

En cuanto a la temperatura a que debe ser calentada el agua, tanto por el calentador solar como por la bomba de calor, se tomará en cuenta que existen una variedad de rangos de temperatura a los que están acostumbradas las personas a la hora de bañarse y que van desde el baño muy caliente (con un rango de temperatura de 38 a 43 °C), hasta un baño frío (<18°C), pasando por baño caliente (29 a 38°C), de agua templada (24 a 29°C) y de agua fresca (de 18 a 24°C)²⁵. Con estos valores de temperatura podemos considerar que tanto los calentadores solares (fundamentalmente los de colectores planos) como las bombas de calor aire-agua, cubre estos rangos de temperatura. En consecuencia la temperatura a la que hay que calentar el agua sería el valor de, al menos, 43°C, con esta temperatura se cubrirían los rangos de temperatura de todos los “tipos de baños”. Así también se cubriría lo respectivo a la seguridad para evitar posibles quemaduras graves (que se pueden dar si el agua alcanza una temperatura de 60°C). Ciertamente en el colector solar o en la bomba de calor en sí, se tendría una temperatura algunos grados más alta que en la regadera. Se podrían estimar unos 49°C, temperatura máxima recomendada para calentadores de agua, que bien se puede aproximar a los 50°C.

Para la temperatura ambiente se considerarán las temperaturas máximas, mínimas y promedio mensual, durante un año (2016), de la Ciudad de México. Cabe señalar que estos valores de temperatura ambiente juegan un papel preponderante en el dimensionamiento de una bomba de calor, puesto que tanto la demanda de calor como la energía entregada por la bomba de calor dependen mucho de la temperatura del aire exterior. A continuación se muestra la tabla 2.4 donde se registran dichas temperaturas.

Tabla 2.4. Temperaturas máximas, mínimas y medias (en °C) mensuales en la Ciudad de México (2016)

Temperatura	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Tmáx prom.	20.7	23.5	24.1	27.2	27.8	24.4	24.5	24.8	24.1	23.5	21.3	23.3	24.1
Tmín prom.	7.5	8.1	10.8	12.9	14.1	13.3	13.1	13.6	13.7	12.2	10	9.9	11.6
T med	14.1	15.8	17.4	20.1	20.9	18.9	18.8	19.2	18.9	17.9	15.7	16.6	17.9

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. CONAGUA. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia.

<https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMAX/2016.pdf>

²⁵ [Cosas de Mujer. La temperatura del agua de la ducha. Riot Jane. https://cosasdemujer.com/la-temperatura-del-agua-de-la-ducha/](https://cosasdemujer.com/la-temperatura-del-agua-de-la-ducha/)

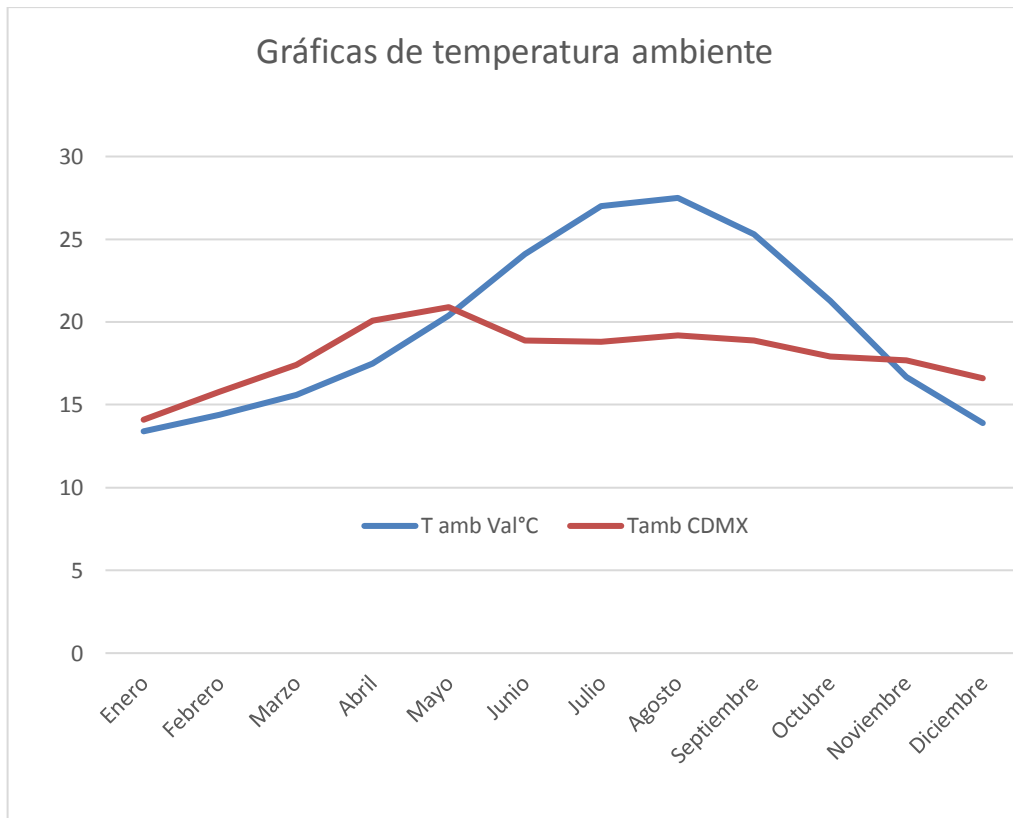
Un parámetro muy importante dentro de las características de confort es la temperatura ambiente, puesto que si es muy alta o muy baja se busca regularla, ya que incluso pudiera afectar seriamente el modo de vida que se tiene, incidiendo en varios aspectos de la vida cotidiana, como son alimentación, salud y esparcimiento, esto se logra no solo mediante aislamiento, como podría ser en el caso de temperaturas muy bajas, sino también a través de dispositivos que permiten acondicionar las viviendas para una mejor estancia en ellas. Dentro de estos dispositivos se tienen las bombas de calor, cuyo ejemplo más claro es el refrigerador. Pues bien, dichos dispositivos termodinámicos no escapan a la influencia de las temperaturas ambiente, puesto que si las temperaturas son muy altas afectan, por ejemplo, el funcionamiento de un refrigerador. Y si la bomba de calor tiene por objeto el producir agua caliente sanitaria las bajas temperatura afectarían de manera determinante para la eficiencia de dicho dispositivo.

Como se puede observar en la tabla 2.4 en la Ciudad de México por lo regular no se presentan temperaturas muy bajas, ya que de la misma tabla 2.4 se observa que la temperatura más baja, dentro de las temperaturas mínimas promedio, no es menor a los 7.5°C e incluso esta se da en el primer mes del año. Estas condiciones de temperatura se pueden considerar casi ideales para la producción de agua caliente sanitaria.

2.4 Comparativo entre Valencia, España y la Ciudad de México

A pesar que globalmente la radiación solar media diaria es menor en España, y en particular en Valencia, que en México, si se comparan los niveles de radiación solar entre la ciudad de Valencia, que es una de las zonas con mayor radiación del país ibérico, con los niveles de radiación que se tienen en la Ciudad de México, se observa que son niveles de radiación son bastante aproximados ya que en Valencia, España se tiene de 4.6 a 5.0 kWh/m²día y en la Ciudad de México va de 5.0 a 5.1 kWh/m². (Gráfica 2.1)

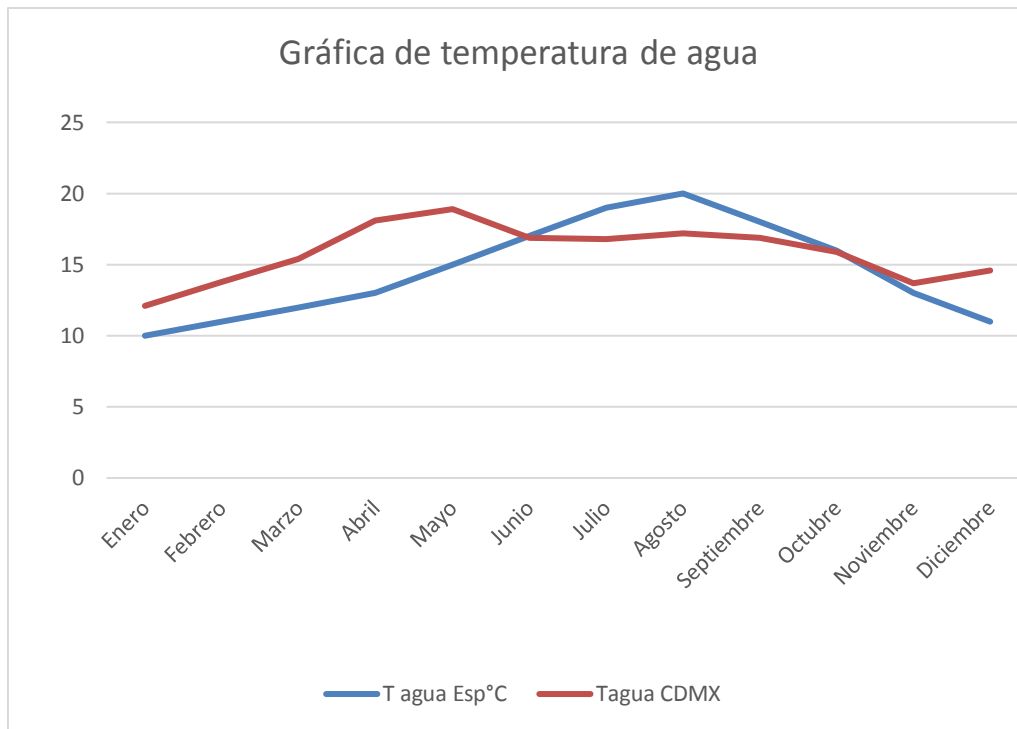
Gráfica 2.1. Gráficas de temperaturas ambiente en Valencia, España y en la Ciudad de México.



Fuente: Elaboración propia con datos del SMN

En cuanto a la temperatura ambiente que como ya se mencionó son determinantes para los dispositivos termodinámicos, como las bombas de calor, si bien hay diferencias, globalmente estas no resultan tan significativas como puede observarse en la gráfica 2.1. Esto nos lleva suponer que si los dispositivos, como las bombas de calor, funcionan adecuadamente en la región de Valencia, España, dado que las condiciones, como ya se mencionó, no difieren sustancialmente entre ambas ciudades e incluso serían mejores en la Ciudad de México, no habría impedimentos técnicos, en particular no se observan impedimentos termodinámicos, para que estos dispositivos puedan funcionar eficientemente en la Ciudad de México. En cuanto a las temperaturas del agua en la Ciudad de Valencia y la Ciudad de México, ocurre la misma situación que con la temperatura ambiente como se puede observar en la gráfica 2.2.

Gráfica 2.2. Gráficas de temperaturas del agua en Valencia, España y en la Ciudad de México.



Fuente: Elaboración propia con datos de SMN

2.5 Rendimiento de la bomba de calor para agua caliente sanitaria

A continuación se muestra el ahorro energético que se puede lograr con la instalación de una bomba de calor en una casa-habitación de la Ciudad de México considerando un promedio de cuatro personas, en donde la demanda de agua caliente sanitaria es de 140 litros por día a 50°C (Tabla 2.5).

Para calcular la demanda energética para el uso de agua sanitaria mostrada en la tabla 2.5 se utilizó la siguiente ecuación: $Q_H = \dot{m} C_p (T_H - T_L)$ la cual se mostrará más adelante (ecuación 25), convirtiendo los valores obtenidos (en kJ) a kWh.

Tabla 2.5. Demanda de energía para el uso de agua sanitaria

Mes CDMX	Días	Temperatura del agua fría (°C)	Demanda de energía KWh/día	Demanda de KWh
Enero	31	12.1	6.16	191
Febrero	28	13.8	5.89	164.78
Marzo	31	15.4	5.62	174.37
Abril	30	18.1	5.19	155.58
Mayo	31	18.9	5.06	156.73
Junio	30	16.9	5.38	161.43
Julio	31	16.8	5.40	167.32
Agosto	31	17.2	5.33	165.30
Septiembre	30	16.9	5.38	161.43
Octubre	31	15.9	5.54	171.83
Noviembre	30	13.7	5.90	177.04
Diciembre	31	14.6	5.76	178.04
Anual	365	15.9	5.54	2,023.40

Fuente: Elaboración propia con datos SMN

Con los datos anteriores se puede calcular el consumo de energía eléctrica que tiene una bomba de calor y en base a la siguiente ecuación: $COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_n}$ (la cual se mostrará más adelante, ecuación 22) y al COP (Coeficiente de Operación del sistema) de donde se obtiene el potencial de ahorro teórico expresado en porcentaje. Considerando que para el presente trabajo de investigación se tomará como base un COP con un valor de 3; se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Ahorro teórico en porcentaje al utilizar una bomba de calor con un COP constante

Mes CDMX	Temperatura ambiente (°C)	COP (Valor = 3)	Demanda de KWh	Consumo de energía kWh	Ahorro teórico (%)
Enero	14.1	3	191	63.67	66.67
Febrero	15.8	3	164.78	54.93	
Marzo	17.4	3	174.37	58.12	
Abril	20.1	3	155.58	51.86	
Mayo	20.9	3	156.73	52.24	
Junio	18.9	3	161.43	53.81	
Julio	18.8	3	167.32	55.77	
Agosto	19.2	3	165.30	55.10	
Septiembre	18.9	3	161.43	53.81	
Octubre	17.9	3	171.83	57.28	
Noviembre	15.7	3	177.04	59.01	
Diciembre	16.6	3	178.04	59.47	
Anual	17.9	3	2,023.40	674.47	

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN y uso diseño de herramienta elaborada en hoja de excel.

Posteriormente se consideró modificar los valores del COP, con la finalidad de determinar si el ahorro de energía se pudiera incrementar en el sistema propuesto; lo cual dio como resultado los valores reportados en la Tabla 2.7, utilizando la misma ecuación usada para calcular los valores de la tabla 2.6.

Tabla 2.7. Ahorro teórico en porcentaje al utilizar una bomba de calor, con un COP variable
(Dependiente de la temperatura ambiente)

Mes CDMX	Temperatura ambiente (°C)	COP	Demanda de KWh	Consumo de energía kWh	Ahorro teórico (%)
Enero	14.1	2.99	191	63.88	66.55
Febrero	15.8	3.06	164.78	53.85	67.32
Marzo	17.4	3.16	174.37	55.18	68.35
Abril	20.1	3.25	155.58	47.87	69.23
Mayo	20.9	3.42	156.73	45.83	70.76
Junio	18.9	3.65	161.43	44.23	72.60
Julio	18.8	3.83	167.32	43.67	73.90
Agosto	19.2	3.86	165.30	42.82	74.10
Septiembre	18.9	3.73	161.43	43.28	73.19
Octubre	17.9	3.48	171.83	49.38	71.26
Noviembre	15.7	3.20	177.04	55.33	68.75
Diciembre	16.6	3.01	178.04	59.07	66.89
Anual	17.9	3.39	2,023.40	596.87	70.50

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN y uso diseño de herramienta elaborada en hoja de excel.

De los resultados mostrados en las Tablas 2.6 y 2.7 se puede observar que los valores recomendados para poder obtener el mayor rendimiento del sistema propuesto se encuentran en los meses de mayo a septiembre; ya que las temperaturas son idóneas. Además que los consumos de energía se minimizan de manera considerable.

2.6 Marco regulatorio para el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables.

Los cambios legales en materia de energías renovables para México con los que se ha impulsado el desarrollo de este tipo de fuentes, se inician con la Reforma Energética de 2008, la cual pretendía la implementación de instrumentos regulatorios que pudieran fomentar el uso de las fuentes renovables de energía. En su momento se puntualizó que para el éxito de una política energética a largo plazo se debe considerar el desarrollo de las energías renovables, las cuales deben de estar enmarcadas en una legislación actualizada que estimule la inversión en nuevas tecnologías. En nuestro país se han tomado medidas para impulsar estas tecnologías energéticas con el fin de hacer frente a las consecuencias del cambio climático y a la vez coadyuvar a la seguridad energética de la nación.

La primera ley que se tiene que considerar en el ámbito energético, como en todos los ámbitos legales de nuestra vida nacional, es la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, donde en varios de sus artículos dan sustento a varios conceptos sobre el aprovechamiento de las energías renovables y las no renovables, así como el derecho a un medio ambiente adecuado y que al Estado le corresponde el velar porque el desarrollo nacional no solo sea integral sino también sustentables.

En 2008 se publicó la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la transición energética cuyo fin era regular el aprovechamiento de las fuentes de energía y las tecnologías limpias para la generación de electricidad. Derivadas de esta ley se establecieron metas para impulsar el desarrollo de las energías renovables, dentro de estas se pueden mencionar el que las fuentes renovables de energía (eólica, geotérmica, biomasas, etc.) representen el 7.6% de la capacidad total instalada en México, así como que para el año 2012, la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables se debería encontrar entre el 4.5 y el 6.5% del total.²⁶

Para el año 2015 se promulga la Ley de Transición Energética, que básicamente regula el aprovechamiento sustentable de la energía. En este marco legal se pueden incluir a las bombas de calor, puesto que dentro de la sustentabilidad está incluida la eficiencia energética y la reducción de las emisiones contaminantes, sobre todo las emisiones de CO₂, como se puede ver en los siguientes artículos de la ya mencionada ley.

Artículo 1. La presente Ley tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos.

Artículo 2. Para los efectos del artículo anterior, el objeto de la Ley comprende, entre otros:

- Prever el incremento gradual de la participación de las Energías Limpias en la Industria Eléctrica con el objetivo de cumplir las metas establecidas en materia de generación de energías limpias y de reducción de emisiones;
- Facilitar el cumplimiento de las metas de Energías Limpias y Eficiencia Energética establecidos en esta Ley de una manera económicamente viable;
- Determinar las obligaciones en materia de aprovechamiento sustentable de la energía y Eficiencia Energética;
- Establecer mecanismos de promoción de energías limpias y reducción de emisiones contaminantes;
- Apoyar el objetivo de la Ley General de Cambio Climático, relacionado con las metas de reducción de emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y de generación de electricidad provenientes de fuentes de energía limpia;
- Promover el aprovechamiento sustentable de la energía en el consumo final y los procesos de transformación de la energía;

²⁶ SECRETARÍA DE ENERGÍA. Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026.
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva de Energ as Renovables 2012-2026.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2012-2026.pdf)

Artículo 3. Para efectos de esta Ley se considerarán las siguientes definiciones: I. Aprovechamiento sustentable de la energía: El uso óptimo de la energía en todos los procesos y actividades para su explotación, producción, transformación, distribución y consumo, incluyendo la Eficiencia Energética

Artículo 36. El PRONASE incluirá al menos, aquellas acciones, proyectos y actividades derivadas de la Estrategia en materia de Eficiencia Energética que permitan:

- Elaborar y ejecutar programas a través de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal para fomentar el Aprovechamiento sustentable de la energía en Usuarios con un patrón de alto consumo de energía conforme lo determine el Reglamento de la presente Ley;
- Identificar áreas prioritarias para la investigación científica y tecnológica en materia de Aprovechamiento sustentable de la energía;
- Promover el desarrollo de materiales para incluir en los programas de estudios a nivel de educación básica, media y media superior, temas de Aprovechamiento sustentable de la energía;
- Promover, a nivel de educación superior, la formación de especialistas en materia de Aprovechamiento sustentable de la energía;
- Promover la aplicación de tecnologías y el uso de equipos, aparatos y vehículos energéticamente

Del Financiamiento para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, se tiene:

Artículo 55. El Financiamiento para el Aprovechamiento sustentable de la energía tiene por objeto:

- Contribuir a la sustitución de equipos y aparatos energéticamente ineficientes.

Por otra parte, la realización de mejoras a edificaciones en las que se realice el consumo energético para su acondicionamiento con el fin de que este sea más eficiente, es el parámetro más importante que se consideró para llevar a cabo este proyecto de investigación; además de considerar la instalación de equipos económicamente viables que permiten aprovechar a los hogares las fuentes de energía renovables para la satisfacción de sus necesidades.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS TÉRMICOS DE LAS BOMBAS DE CALOR

3.1. Introducción

El presente capítulo describe que la metodología estará orientada hacia el análisis de si es factible, termodinámicamente el uso de una bomba de calor como respaldo de una Calentador Solar. Para esto es necesario dimensionar dicha bomba con base en los parámetros del Calentador Solar y las necesidades de agua caliente sanitaria. Para lo cual es necesario analizar las ecuaciones termodinámicas básicas que permitan no solo determinar la carga de calor necesaria que debe suministrar la bomba de calor sino también determinar la factibilidad técnica con respecto a las variables del medio ambiente en el que se desempeñará ésta y finalmente establecer los modelos que puedan describir la demanda de flujo de calor con relación a las temperaturas y flujos aportados por el medio. A continuación se describirá el desarrollo de estas relaciones matemáticas a partir de un balance de energía aplicado.

3.2. Balance de energía de una bomba de calor

La energía, que está definida como la capacidad para realizar cambios o en particular la capacidad de realizar trabajo, se puede encontrar, o se presenta, en diferentes formas, como son la energía calorífica (o simplemente calor), la energía mecánica, en sus variantes cinética y potencial o la energía química entre otras; estas diferentes formas se pueden transformar unas en otras, como cuando un cuerpo que cae, desde una determinada altura, transforma su energía potencial, que depende de la altura desde donde empieza a caer, en energía cinética cuando dicho cuerpo empieza a caer y adquiere una velocidad. También es de destacar que para el aprovechamiento de la energía es necesario recurrir a las fuentes de energía, una de las características de estas es que se pueda obtener trabajo útil, para realizar todo tipo de actividades. Entre estas fuentes se puede mencionar la energía del petróleo, la geotérmica, la energía solar, eólica, entre otras más.

Al hablar de la energía y sus transformaciones se hace considerando un determinado sistema, el cual se define "como una cantidad de materia o una región en el espacio para análisis"²⁷. Ejemplos de sistema son: El cuerpo humano, el motor de automóvil, el motor eléctrico, el calentador de gas, un refrigerador, etc. También se debe entender que esas transformaciones de energía se dan en un determinado proceso (que viene a ser el cambio que va a experimentar el sistema), dentro de estos se tienen el proceso por medio del cual la energía eléctrica se convierte en energía cinética en un motor eléctrico o el proceso de combustión, donde un combustible transforma su energía química en energía calorífica, ya

²⁷Yunus A. Cengel, Boles (2006). Termodinámica. Ed. Mc Graw Hill.

sea para calentar agua en un calentador de gas o para cocinar o también en el proceso donde el calor se convierte en trabajo mecánico, como en un motor de combustión interna o en una turbina de vapor. Ahora bien, el cambio en el contenido energético de un sistema o proceso energético es igual a la diferencia entre la entrada y la salida de energía de dicho sistema, o lo que es lo mismo un balance de energía, el cual se expresa de forma general como:

$$(E \text{ entrada}) - (E \text{ salida}) = \Delta E \quad (1)$$

Donde:

ΔE : Es el cambio en el contenido energético del sistema

E entrada: Energía que entra al sistema

E salida: Energía que sale del sistema

Y es precisamente en este punto donde se puede mencionar el principio que da validez al balance anterior: El principio de conservación de la energía. El cual enuncia que, durante un proceso energético, la energía puede cambiar de forma pero la cantidad global de esta permanece constante, o dicho de la forma más popular o conocida “La energía, en un proceso, no se crea ni se destruye solo se transforma”. Cabe mencionar que la Primera ley de la termodinámica es una forma equivalente al principio de conservación de la energía, puesto que enuncia que “para todos los procesos adiabáticos entre dos estados especificados de un sistema cerrado, el trabajo neto realizado es el mismo sin importar la naturaleza del sistema cerrado ni los detalles del proceso”. Como se puede deducir del enunciado anterior, que es la primera ley, el trabajo neto entre dos estados especificados en cualesquier proceso adiabático, en un sistema cerrado, solo depende de los estados finales del sistema. Lo que llevó a considerar que existía una propiedad del sistema, que era la que cambiaba, dicha propiedad es la energía total de éste²⁸.

Lo que lleva a enunciar, quizá de manera más formal, el principio de conservación de la energía: “El cambio neto (incremento o disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso”²⁹. Este enunciado se puede expresar en forma de la siguiente ecuación:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Energía total que entra} \\ \text{al sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Energía total que sale} \\ \text{del sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Cambio en la Energía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right] \quad (2)$$

²⁸Op. cit. Çengel (2006).

²⁹Op. cit. Çengel (2006).

Que como se puede observar es el balance de energía de la ecuación (1). La primera ley de la termodinámica del principio de conservación de la energía y permite establecer una relación entre el calor Q, el trabajo W y la energía total del sistema. Es pertinente hacer notar que las formas de transferir energía a un sistema son a través de flujo de calor, trabajo y flujo másico. Por lo que el balance de energía se puede mostrar de forma más explícita, con base en la siguiente ecuación:

$$(E_{\text{entrada}}) - (E_{\text{salida}}) = (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) + (W_{\text{salida}} - W_{\text{entrada}}) + (E_{\text{masa, entrada}} - E_{\text{masa, salida}}) \quad (3)$$

Donde:

$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}$: Es la transferencia neta de energía, al sistema, mediante calor, trabajo y masa.

$Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}$: Es la transferencia neta de calor.

$W_{\text{salida}} - W_{\text{entrada}}$: Es la transferencia neta de trabajo.

$E_{\text{masa, entrada}} - E_{\text{masa, salida}}$: Es la transferencia neta de masa.

Como el principio de conservación de la energía se puede aplicar en cualquier sistema en el que se desarrolle un proceso energético, se podría aplicar a un motor de combustión interna, a una turbina de vapor o de gas, o a un refrigerador doméstico, así como en general a cualquier bomba de calor (la cual en las ecuaciones se nombrará como BC). Por lo que el balance de la ecuación de la ecuación (2) se reescribiría de la siguiente forma:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Energía total que entra} \\ \text{a la bomba de calor (BC)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Energía total que sale} \\ \text{de la bomba de calor (BC)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Cambio en la Energía total} \\ \text{de la bomba de calor (BC)} \end{array} \right] \quad (4)$$

Como se mencionó la energía es una propiedad del sistema y esta no cambia, durante un proceso energético, a menos que el estado del sistema cambie. También es importante puntualizar que pueden existir diferentes formas de energía en el sistema, como son la energía interna (que puede agrupar a las energías sensible, latente, química y nuclear), así como también las energías, potencial, cinética, eléctrica y magnético. En ausencia de efectos eléctricos, magnéticos y de tensión superficial; que ciertamente están no se presentan en una bomba de calor porque el gas de ésta no está ionizado ni sometido a campos eléctricos o magnéticos. Y no hay tensión superficial debido a que el diámetro de los tubos de la misma son lo suficientemente grandes como para que se presenten efectos capilares que produzcan tensión superficial. El cambio en la energía total del sistema, en este caso la ya mencionada

bomba de calor, durante su operación sería la suma de los cambios en la energía interna (ΔU), cinética (ΔEC) y potencial (ΔEP) del refrigerante de la bomba de calor, es decir:

$$\Delta E_{BC} = \Delta U_{BC} + \Delta EC_{BC} + \Delta EP_{BC} \quad (5)$$

Ahora bien, como el sistema de la bomba de calor es estacionario, puesto que no experimenta cambios de velocidad o de altura, ocasiona que los cambios en las energías cinéticas y potencial se consideran cero, es decir $\Delta EC_{BC} = \Delta EP_{BC} = 0$

Por lo que la ecuación (5) se reduce a la siguiente forma:

$$\Delta E_{BC} = \Delta U_{BC} \quad (6)$$

Y como se sabe que para un sistema cerrado no se tiene flujo másico en sus fronteras, entonces:

$$E_{masa, entrada} - E_{masa, salida} = 0 \quad (7)$$

Y también se tiene que:

$$(E_{entrada_{BC}}) - (E_{salida_{BC}}) = \Delta E_{BC} \quad (8)$$

Además de que:

$$W_{neto} = W_{salida} - W_{entrada} = W_{flecha} \quad (9)$$

$$Q_{neto} = Q_{entrada} - Q_{salida} \quad (10)$$

Y combinando las ecuaciones (3), (6), (7), (8), (9) y (10) se obtiene:

$$Q_{neto} - W_{neto} = \Delta E_{BC} = \Delta U_{BC} \quad (11),$$

o sea:

$$Q_{neto} - W_{neto} = \Delta U_{BC} \quad (12)$$

Aunque para un sistema cerrado que experimenta un ciclo (y la bomba de calor trabaja cíclicamente) los estados inicial y final son energéticamente idénticos, es decir que ambos estados tienen la misma energía interna, por lo que $\Delta U_{BC} = 0$, entonces:

$$Q_{neto} - W_{neto} = 0 \quad (13),$$

o también:

$$Q_{neto} = W_{neto} \quad \text{y} \quad Q_{neto} = W_{flecha}$$

Si se renombra al calor de salida (Q_{salida}) como Q_H , que es, en una bomba de calor, el calor del foco caliente y al calor de entrada ($Q_{entrada}$) como Q_L , que es, en una bomba de calor, el calor del foco frío, se obtiene:

$$Q_{neto} = Q_H - Q_L \quad \text{y} \quad W_{flecha} = Q_H - Q_L$$

Ahora bien, con el fin de poder establecer la relación entre los flujos de calor de entrada (Q_L) y salida (Q_H), con el trabajo que realiza el compresor (W_{flecha}) de una Bomba de calor es necesario establecer el concepto de coeficiente de desempeño (COP).

3.3. Coeficiente de desempeño (COP)

La forma que se mide el desempeño de una bomba de calor es a través de lo que se conoce como coeficiente de desempeño COP_{HP} (siglas de coefficient of performance). Este se define como:

$$COP_{HP} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{neto,entrada}} \quad (14)$$

Si se considera un proceso como reversible se tiene que:

$$\left[\frac{Q_H}{Q_L}\right]_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_L} \quad (15)$$

y entonces:

$$\text{COP}_{\text{HP, rev}} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (16)$$

Donde:

COP: Coeficiente de desempeño

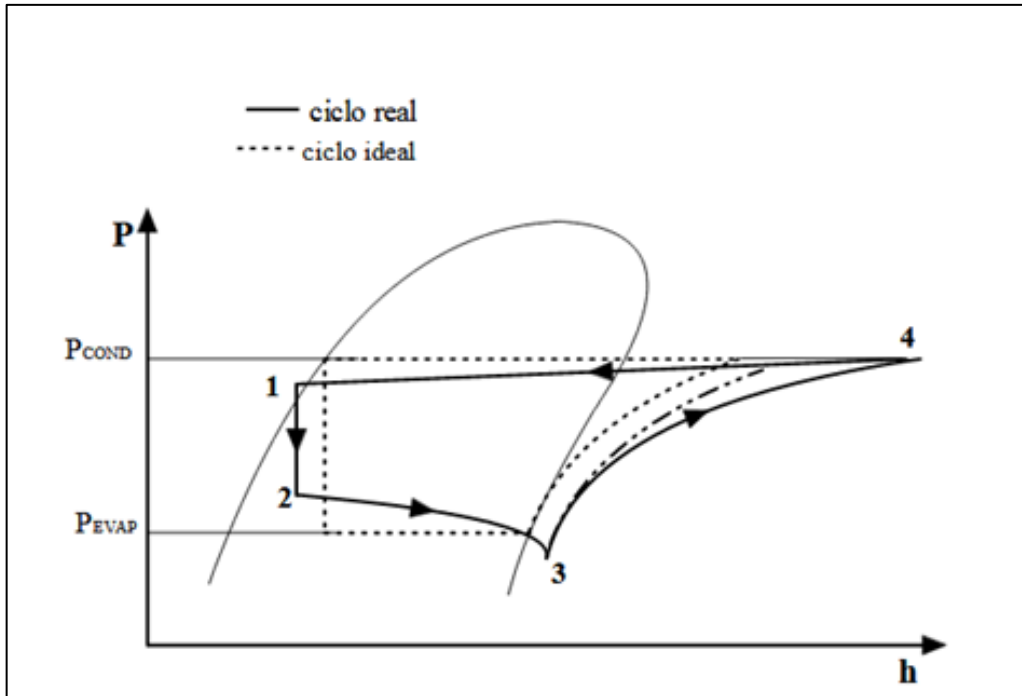
T_L : Temperatura del aire exterior

T_H : Temperatura del agua requerida

Este es el coeficiente de desempeño que puede tener una bomba de calor que opera entre las temperaturas T_L y T_H . Ciertamente esta es una idealidad ya que las bombas de calor reales, que operan entre estos límites, tienen coeficientes de desempeño menores, puesto que las bombas de calor reales presentan, entre otras, las siguientes limitaciones, su ciclo no es completamente reversibles ya que para esto tendría que darse la expansión del fluido de trabajo en una turbina isentrópica, con lo cual la bomba de calor entregaría trabajo. El compresor no es isentrópico, porque una parte del trabajo que realiza se disipa en forma de calor (aquí habría que hacer notar que en toda máquina, casi en general, se cumple que “el calor es impuesto inevitable sobre lo utilizable”³⁰) A continuación se muestra en la figura 3.1 el diagrama del ciclo real de una bomba de calor junto con el ciclo ideal:

³⁰ “Energía”, Colección científica de Time-Life. (1969).

Figura 3.1. Diagramas P-h del ciclo real e ideal de una bomba de calor



Fuente: Rey, Francisco J (2005). Bombas de Calor y Energías Renovables en Edificios

El coeficiente de desempeño, desde otro punto de vista también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} \quad (17)$$

De donde:

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (18)$$

$$\frac{Q_H}{W_{\text{neto, entrada}}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (19)$$

finalmente:

$$Q_H = W_{\text{neto, entrada}} \left(\frac{T_H}{T_H - T_L} \right) \quad (20)$$

Con esta última ecuación, se puede calcular el flujo de calor aportado por la bomba de calor en función de la temperatura del aire exterior, considerando fijas la potencia del compresor de la bomba de calor y la temperatura de salida³¹.

Dónde:

- Q_H : Calor de salida
- Q_L : Calor de entrada
- $W_{\text{neto, entrada}}$: Trabajo del compresor

Para calcular el flujo de calor necesario se requiere utilizar una ecuación en función de la temperatura del aire exterior, lo que se representa en un balance de energía aplicado a la cantidad de agua que se requiere calentar³²:

$$Q_H = \dot{m} C_p (T_H - T_L) \quad (21)$$

Dónde:

- \dot{m} = flujo másico (kg/s)
- C_p = Coeficiente calorífico del agua a presión constante = 4.18 kJ/ K kg
- T_L = Temperatura del aire exterior (k)
- T_H = Temperatura del agua requerida (k)

De acuerdo a lo anterior es importante mencionar que se considerarán ciertas condiciones ideales, como son el considerar que el compresor operará en forma isentrópica, es decir, operará con un ciclo reversible, para el dimensionamiento del sistema de bomba de calor.

3.4. Descripción del sistema propuesto

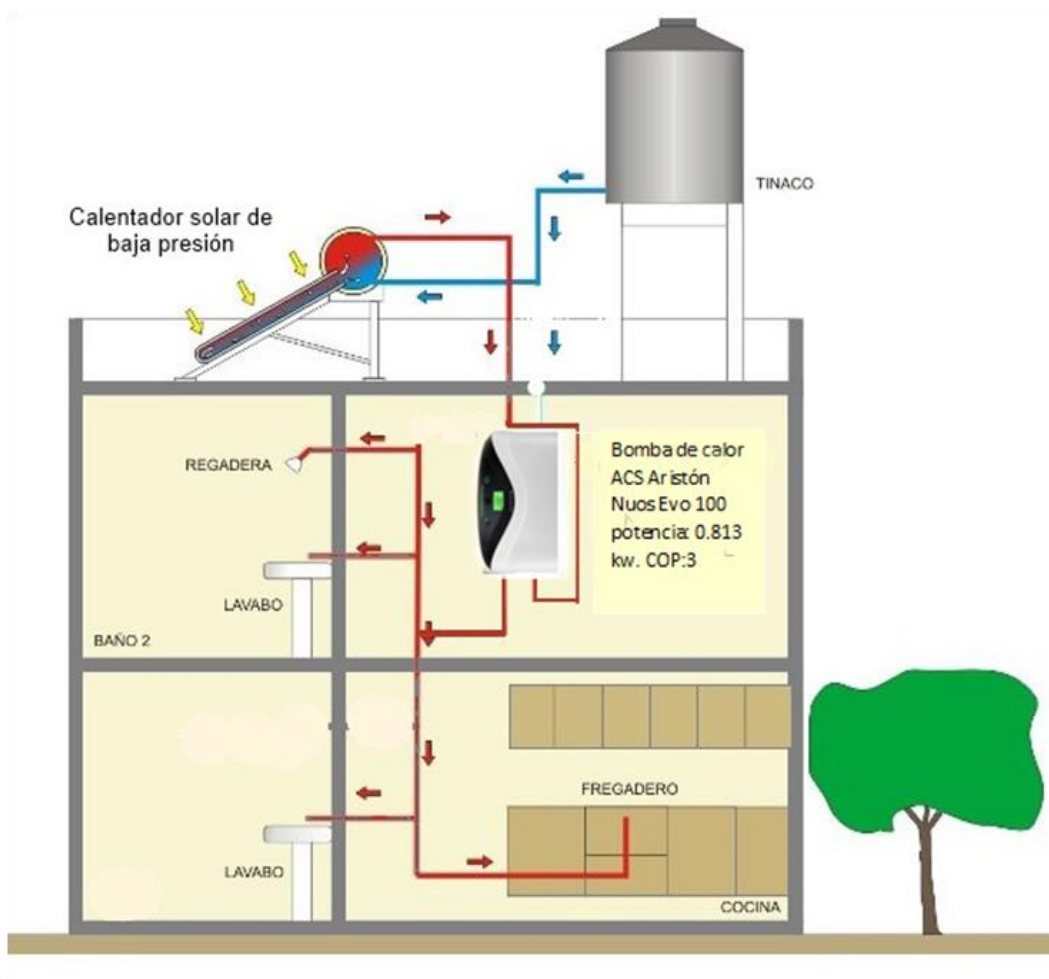
El sistema que se propone en el presente trabajo de investigación se podría considerar como híbrido, ya que estará compuesto por una bomba de calor y un calentador solar plano, que a diferencia de lo que actualmente se tiene en una vivienda, no estaría respaldado por un calentador de gas, particularmente un calentador de paso, sino por dicha bomba de calor, la cual operaría en los días que el calentador solar no pudiera proveer agua caliente sanitaria, situación que llega a presentarse en los días nublados o lluviosos, así como en los días de

³¹Op. cit., Cengel (2006)

³²Op. cit., Cengel (2006)

invierno particularmente extremos en lo que se refiere a bajas temperaturas. También es de señalar que la bomba de calor operará cuando por eventos fortuitos la capacidad del calentador solar fuera rebasada. La interconexión entre el calentador solar y la bomba de calor sería de tal forma que en el momento que el calentador solar dejara de proporcionar agua a determinada temperatura la bomba de calor entraría en funciones, esto con base en una temperatura límite o a un gradiente de temperatura. (Figura 3.2).

Figura 3.2. Sistema Propuesto para el estudio



Fuente: Elaboración propia con información de: FILLSUN. <http://energia-solar.com.ar/info/>

Cabe mencionar que debido a la intermitencia que depende de las condiciones meteorológicas, la energía solar térmica del calentador puede generar variaciones de calor significativas. Por ello, la solución que se propone en este sistema de respaldo con una bomba de calor permite aumentar la capacidad de producción de agua caliente y reducir el uso de otros recursos más caros (gas) manteniendo la estabilidad y disponibilidad del sistema.

CAPÍTULO 4. CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR.

4.1. Demanda de calor

Para poder establecer si es factible, técnicamente, emplear una bomba de calor como respaldo de un calentador solar es necesario dimensionar dicha bomba con las condiciones termodinámicas que se requieren para realizar el calentamiento de agua sanitaria. Para poder realizarlo es necesario primeramente, calcular la carga de calor necesaria para calentar el agua sanitaria, que también se puede denominar demanda de flujo de calor o simplemente demanda de calor. La carga energética se calcula utilizando la ecuación 21 del capítulo anterior:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T$$

Dónde: Q: Es la energía calorífica requerida, en kJ (En la bomba de calor correspondería al calor del foco caliente, es decir, Q_H)

\dot{m} : flujo másico, en kg/h

C_p : Calor específico, a presión constante, del agua, cuyo valor considerado es $4.18 \frac{kJ}{kg K}$

$\Delta T = T_H - T_L$. Diferencia de temperaturas, de entre la temperatura del agua requerida, T_H , y la temperatura del aire exterior, T_L .

Ahora es necesario establecer el flujo másico, así como las temperaturas, ya que el calor específico se tomó constante, a pesar de que ciertamente varía con el incremento de temperatura, aunque ésta es mínima. Para estimar el flujo másico se considerará un gasto de agua, promedio por persona, para ducharse de 35 L (este valor corresponde al de una ducha rápida utilizando regaderas ahorradoras³³. También es necesario considerar la cantidad promedio de personas por vivienda en la Ciudad de México, que es de cuatro³⁴. De donde se tiene que considera el volumen de agua requerida por vivienda (V); dando como resultado:

$$V = (4 \text{ personas /vivienda}) (35 \text{ L/persona}) = 140 \text{ L/vivienda}$$

³³ Op. Cit. Cengel (2006).

³⁴ Censo de Poblacion y Vivienda. INEGI. (2010). <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>

Por otro lado, se considera el tiempo de calentamiento que puede emplear una bomba de calor para llevar a la temperatura deseada el agua sanitaria. Esto se puede hacer con base en el tiempo que emplea un calentador solar para calentar el agua y teniendo presente que la bomba de calor trabajaría como respaldo, por lo que se hace necesario que emplee menos tiempo que el calentador solar. Como una acotación; es necesario mencionar que un calentador de gas puede calentar unos 190 L (≈ 50 galones) en una hora. Por lo que se tendría, que si un calentador solar emplea entre 2 y 4 horas, en promedio en calentar agua a la temperatura nominal (la establecida por el fabricante) entonces sería conveniente el elegir como tiempo de calentamiento de la bomba de calor, el valor mínimo, es decir; de dos horas, de donde se tiene:

$$m = V \rho_{H_2O} = (140 \text{ L}) (1 \text{ kg/L}) = 140 \text{ kg}, \text{ y}$$

$$t = 2 \text{ horas (tiempo de calentamiento), luego entonces}$$

$$m = m/t = \frac{140 \text{ kg}}{2 \text{ horas}} = 70 \text{ kg/hora}$$

Como una primera aproximación; se puede elegir la temperatura del agua caliente en 50°C , que es un poco más (1 grado arriba) de la temperatura que se recomienda ajustar los calentadores, y que es superior a la temperatura de agua considerada muy caliente ($38 - 43^\circ \text{C}$), esto en previsión de que ciertamente el agua “pierde” unos grados de temperatura en las tuberías, desde la Bomba de Calor hasta la regadera. Adicionalmente la temperatura T_H se puede estimar en unos 20°C , que es la temperatura ambiente promedio en la Ciudad de México. Por lo que se tiene:

$$Q_H = m C_p (T_H - T_L) = (70 \text{ kg/h}) (4.18 \text{ kJ/kg K}) (323\text{k} - 293\text{K})$$

$$Q_H = 8\,778 \text{ kJ/h} = 8\,778 \text{ kJ/h} \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) = 2.44 \text{ kW}$$

Lo cual es la cantidad de flujo de calor necesaria para calentar agua, para uso sanitario, con las condiciones ya descritas anteriormente. Por otra parte, es necesario considerar que un factor que influye en el calentamiento del agua sanitaria, y en consecuencia en la carga de calor necesaria, es la temperatura del aire exterior, puesto que entre más baja sea ésta, más rápidamente se enfriará el agua. Por lo que con un flujo másico y una temperatura deseada del agua sanitaria fijos, además de que el calor específico del agua se toma como constante, la demanda de flujo de calor se puede poner en función de la temperatura del aire exterior (foco frío).

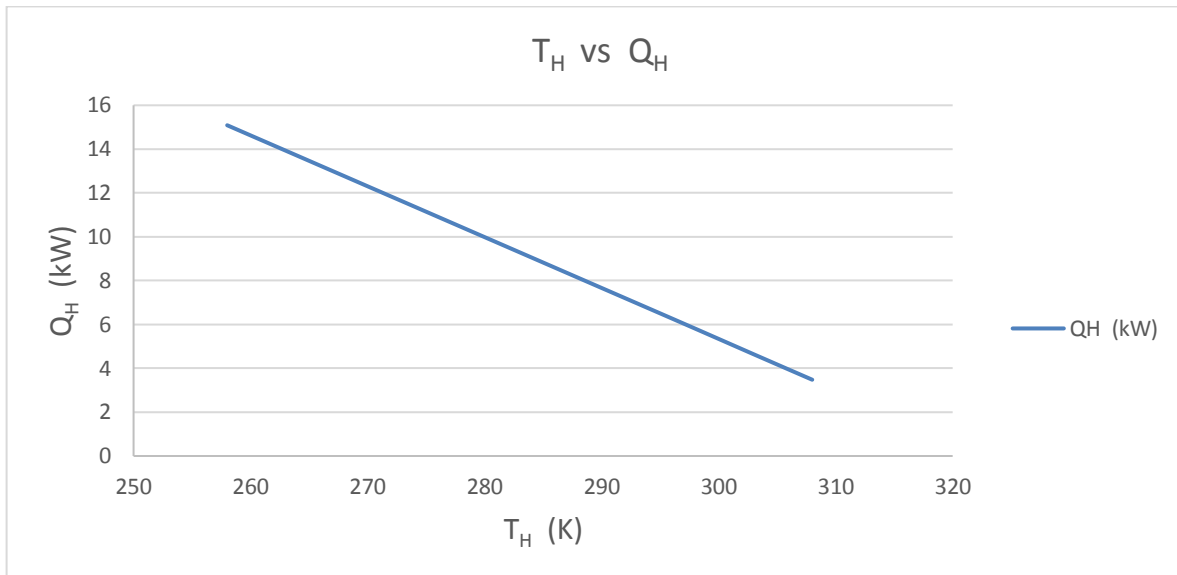
Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se pueden generar, considerando la ecuación (21), los siguientes datos presentados en la tabla 4.1, donde se puede observar que hay una relación proporcional entre ellos.

Tabla 4.1. Descripción del comportamiento de la temperatura T_H (K) en función de la variación de calor Q_H (kW)

T_H (K)	Q_H (kW)
308	3.48
303	4.64
298	5.81
293	6.97
288	8.13
283	9.29
278	10.45
273	11.61
268	12.77
263	13.93
258	15.09

Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

En este cálculo se consideró fundamentalmente un flujo másico constante para obtener las cantidades de temperatura necesarias por requerimiento de vivienda, sin embargo los calores encontrados tienen diferentes comportamientos sobre la variación de temperaturas, aunque cumplen con las necesidades del termostato propuesto que van desde los 150 hasta los 300 litros. Si se aplican estos valores a los siguientes cálculos, manteniendo fijos el calor específico y el tiempo de calentamiento de 2 horas, las temperaturas entre 20°C y 50°C, lograrán desarrollar un COP muy cercano a 3; lo cual es fundamental para el diseño propuesto en el presente trabajo. Con la información descrita en la tabla 4.1 se obtiene la gráfica 4.1, donde se muestra claramente que la relación entre la demanda de flujo de calor y la temperatura del aire exterior es inversamente proporcional. Y es ciertamente algo esperado, puesto que a mayor temperatura del aire exterior menos se enfría el agua caliente sanitaria y en consecuencia se requiere que menos demanda de calor fluya hacia ésta.



Gráfica 4.1. Demanda de flujo calor con relación a la temperatura del aire exterior (foco frío).

Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

4.2. Determinación del tamaño del compresor.

Para realizar el cálculo de potencia que debe tener la bomba de calor es necesario considerar que:

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto, entrada}}} = \frac{Q_H}{W_n} \quad (22)$$

Se sabe también que la mayoría de las bombas de calor existentes en el mercado tienen un $\text{COP} = 3^{35}$, por lo que se obtiene:

$$W_{\text{neto}} = \frac{Q_H}{\text{COP}_{\text{HP}}} = \frac{2.44 \text{ kW}}{3} = 0.813 \text{ kW} \quad (23)$$

$$W_{\text{neto}} = 0.813 \text{ kW} \quad (24)$$

que es la potencia que debe tener el compresor de la bomba de calor. Es de hacer notar que también la potencia del compresor puede variar en función de la temperatura del aire exterior y claro está que si la temperatura deseada del agua sanitaria cambia, así como el flujo másico, la potencia del compresor de igual forma variará. Para analizar todos estos posibles

³⁵ Op. Cit. Cengel (2006).

cambios, se desarrolló una herramienta de apoyo basada en una hoja electrónica de cálculo (Excel), donde se llevaron a cabo diferentes corridas de datos para encontrar los valores óptimos para el mejor desempeño del sistema propuesto en el presente trabajo de investigación. A continuación se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos (figura 4.1).

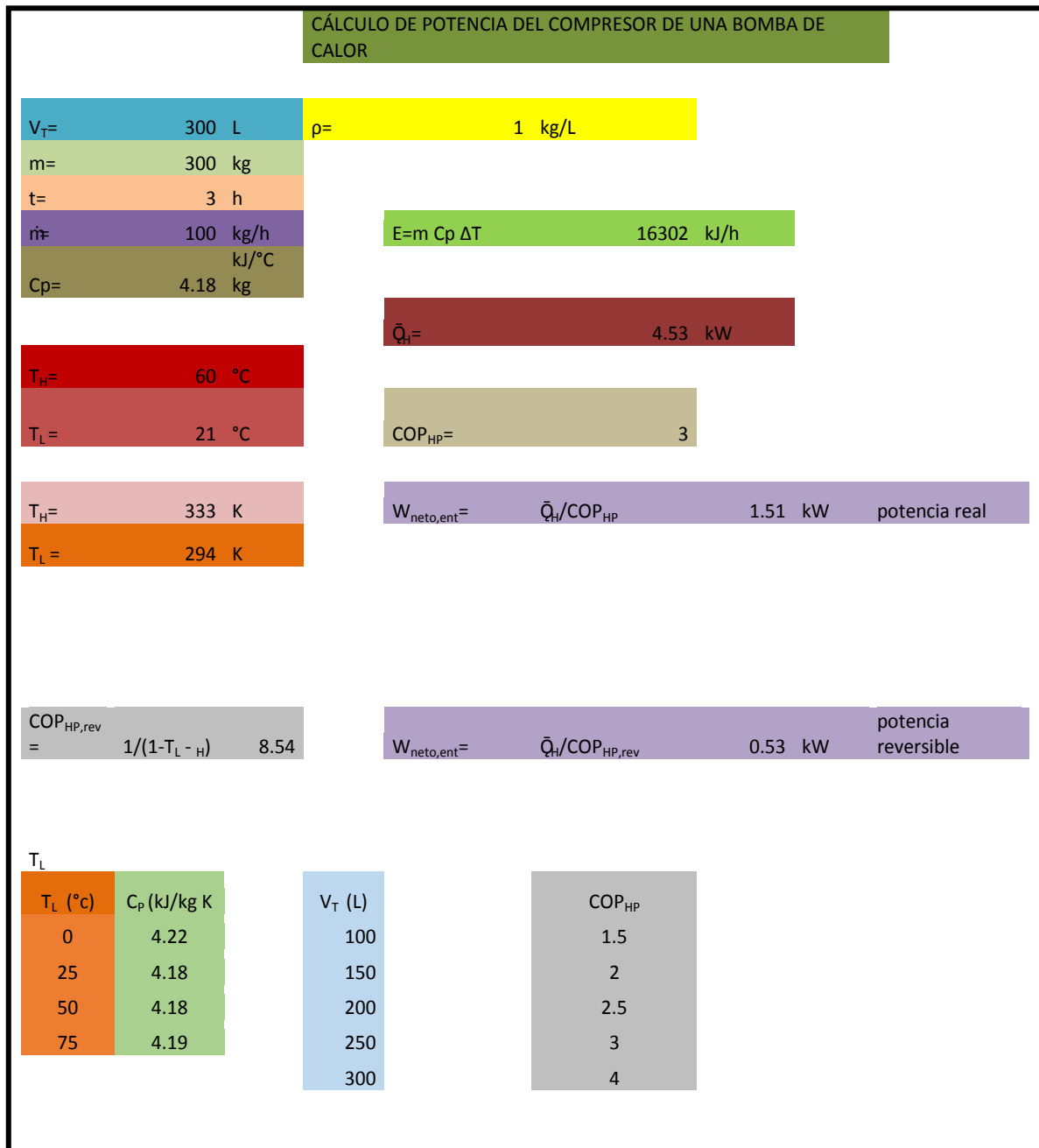


Figura 4.1. Determinación de la potencia del Compresor.

Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

En particular si se considera que varía el flujo másico, porque las necesidades de agua caliente sanitaria son las que más probablemente varíen, se tendría que el rango estaría dentro de las diferentes capacidades, tanto de los calentadores solares como de las bombas

de calor comerciales. En la tabla 4.2 se muestran los resultados de las diferentes potencias de los compresores de las correspondientes bombas de calor que pueden emplearse.

Tabla 4.2. Potencia de la Bomba de Calor para diferentes flujos másicos.

Capacidad de termotanque (L)	Temperatura de aire exterior (°C)	Temperatura del agua (°C)	Tiempo de calentamiento (horas)	Flujo másico (kg/h)	Q (kW)	Potencia de la bomba de calor (kW)
150	20	50	2	75	2.61	0.87
200	20	50	2	100	3.48	1.16
250	20	50	2	125	4.35	1.45
300	20	50	2	150	5.23	1.74

Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

4.3. Capacidad de calefacción de una Bomba de Calor

Ahora bien, después del análisis de cómo varía la demanda de calor con respecto a la temperatura del aire exterior se hace necesario analizar cómo cambia la capacidad de la bomba de calor con respecto a esta misma temperatura. De forma similar al análisis de la demanda de calor se mantiene fijo el flujo másico y la temperatura deseada del agua sanitaria. También se toma el mismo rango de temperatura que se utilizó para la demanda de calor, y la ecuación utilizada es la ecuación (20) del capítulo 3, que a continuación se muestra.

$$Q_H = W_{\text{neto,entrada}} \left(\frac{T_H}{T_H - T_L} \right)$$

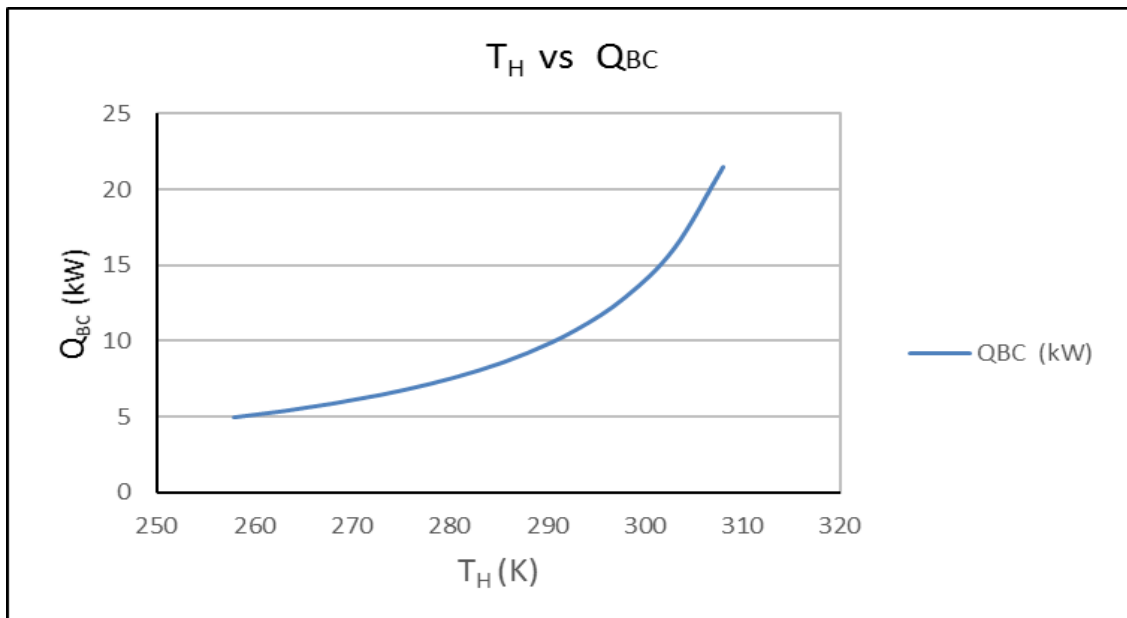
También es importante mencionar que el trabajo neto de entrada ($W_{\text{neto,entrada}}$) se fija en 1 kW. Con los anteriores parámetros se generaron los datos que se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Variación de la temperatura T_H (K) con respecto al calor Q_{BC} (kW)

T_H (K)	Q_{BC} (kW)
308	21.53
303	16.15
298	12.92
293	10.77
288	9.23
283	8.07
278	7.18
273	6.46
268	5.87
263	5.38
258	4.97

Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

Como se puede observar de los datos, no solo no son proporcionales, sino que a menor temperatura del foco frío menor es la eficiencia de la bomba de calor. Con esta información se pudo generar una gráfica donde se observa mejor el comportamiento (Gráfica 4.2).



Gráfica 4.2. Capacidad de la Bomba de Calor y temperatura.
Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

De la gráfica 4.2 se puede verificar que la capacidad de la Bomba de Calor aumenta, aunque no proporcionalmente, significativamente conforme aumenta la temperatura del aire exterior (Foco frío) y evidentemente, como ya se mencionó, al descender la temperatura del foco frío la capacidad de la Bomba disminuye de manera drástica.

4.4. Punto de diseño del sistema

Si las curvas anteriores, tanto de la carga térmica como la de la capacidad de la bomba de calor, se elaboran en una misma gráfica, se cortarán en un punto, a dicho punto se le denomina punto de diseño del sistema y le corresponde una temperatura del aire exterior, la que será la mínima para que la bomba de calor pueda proporcionar la demanda de flujo de calor deseada. Por encima de este valor la bomba de calor proporcionará toda la carga térmica que necesite el sistema. Si la temperatura del aire exterior es inferior a la temperatura correspondiente al punto de diseño del sistema, entonces será insuficiente dicha bomba, precisándose al menos una de mayor potencia.

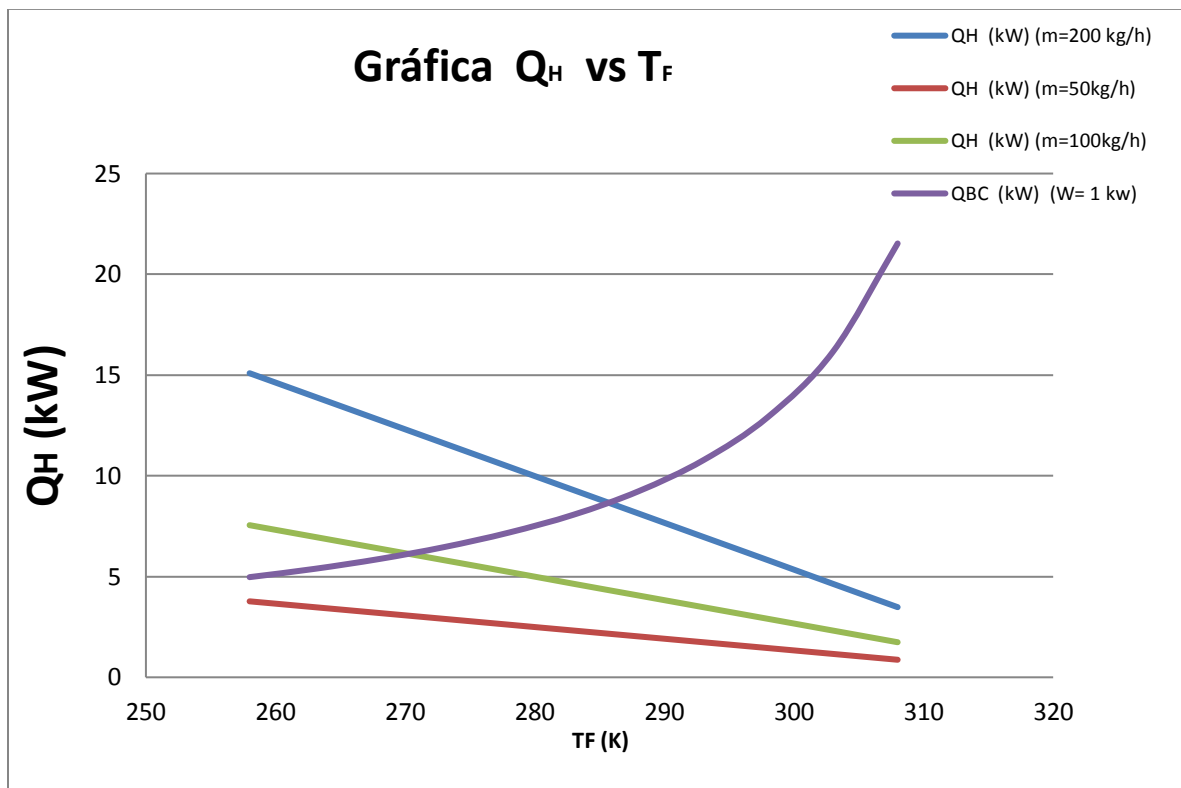
A continuación se muestran los datos (Tabla 4.4), y sus correspondientes gráficas, de la demanda de calor y de la capacidad de la bomba de calor, para flujos máscicos de 50, 100 y 200 kg/h. Con los mismos rangos de temperatura del foco frío de las gráficas anteriores y una potencia del compresor de la bomba de calor de 1 kW.

Tabla 4.4. Comportamiento de la temperatura T_H (K) con respecto a los calores Q_H , Q_{BC} (kw).

TF (K)	Q_H (kW) (m=200 kg/h)	Q_H (kW) (m=50kg/h)	Q_H (kW) (m=100kg/h)	Q_{BC} (kW) (W= 1 kw)
308	3.48	0.87	1.74	21.53
303	4.64	1.16	2.32	16.15
298	5.81	1.45	2.9	12.92
293	6.97	1.74	3.48	10.77
288	8.13	2.03	4.06	9.23
283	9.29	2.32	4.64	8.07
278	10.45	2.61	5.23	7.18
273	11.61	2.9	5.81	6.46
268	12.77	3.19	6.39	5.87
263	13.93	3.48	6.97	5.38
258	15.09	3.77	7.55	4.97
	m=200 kg/h	m=50 kg/h	m=100 kg/h	W=1 kW

Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

Donde se consideran variaciones de los flujos másicos del orden de 50, 100 y 200 kg/h, junto con la potencia supuesta de 1 Kw para la bomba de calor; dando como resultado los comportamientos mostrados en la gráfica 4.3.



Gráfica 4.3. Variación del calor y la temperatura con respecto a la potencia de la bomba de calor.

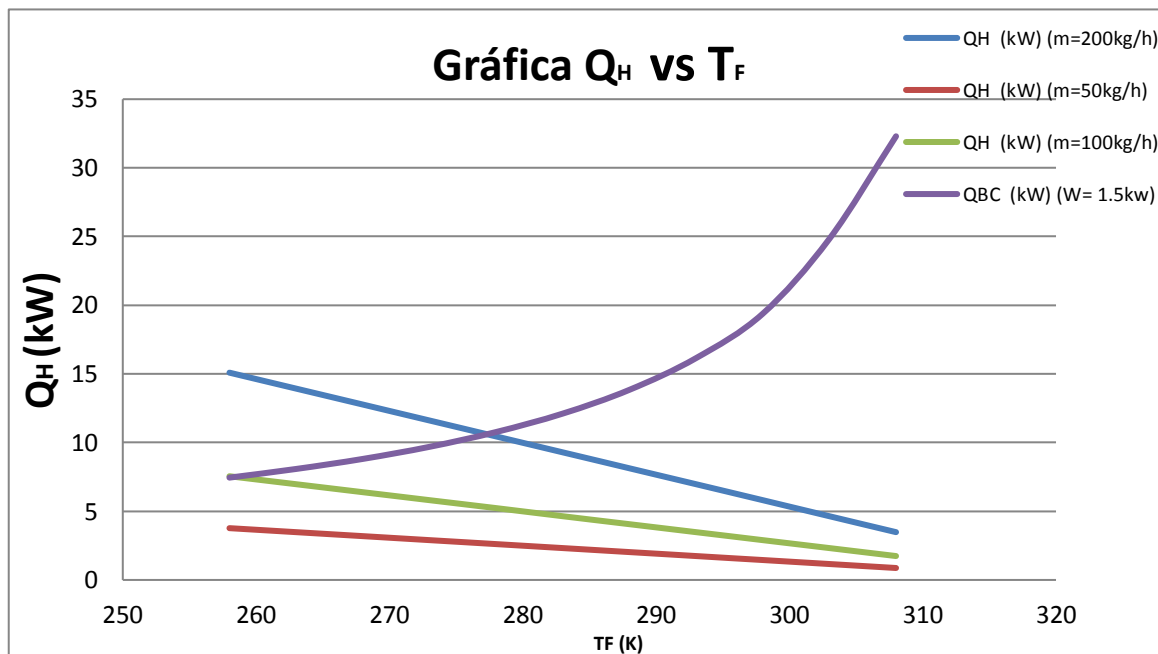
Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

En la gráfica 4.3 se puede observar los puntos de diseño del sistema para diferentes flujos másicos (50, 100 y 200 kg/h) con una potencia de la Bomba de Calor de 1 kW. Dando como resultado que para un flujo másico de 200 kg/h la temperatura del punto del diseño del sistema es relativamente alta, aproximadamente 10°C, que podría no ser una temperatura muy adecuada para proveer la carga de calor necesaria para determinadas épocas del año en la Ciudad de México. Ya para un flujo másico de 100 kg/h la temperatura correspondiente del sistema sería, lo suficientemente baja, unos -5°C, puesto que estas temperaturas son realmente raras casi en cualquier época del año en la ciudad capital del país. Obviamente para el flujo másico de 50 kg/h la temperatura mínima es aún más baja, siendo inferior al -15°C. Si se considera una potencia de la bomba de calor mayor, digamos 1.5 kW, entonces las temperaturas mínimas, que corresponden a los puntos de diseño del sistema para los diferentes flujos másicos disminuyen sensiblemente, como se muestra a continuación (Tabla 4.5).

Tabla 5. Variación de la temperatura T_H (K) con respecto a los calores Q_H , Q_{BC} (kW).

T_F (K)	Q_H (kW) (m=200kg/h)	Q_H (kW) (m=50kg/h)	Q_H (kW) (m=100kg/h)	Q_{BC} (kW) (W= 1.5kw)
308	3.48	0.87	1.74	32.3
303	4.64	1.16	2.32	24.83
298	5.81	1.45	2.9	19.38
293	6.97	1.74	3.48	16.15
288	8.13	2.03	4.06	13.84
283	9.29	2.32	4.64	12.11
278	10.45	2.61	5.23	10.77
273	11.61	2.9	5.81	9.69
268	12.77	3.19	6.39	8.81
263	13.93	3.48	6.97	8.08
258	15.09	3.77	7.55	7.45
	m=200 kg/h	m=50 kg/h	m=100 kg/h	W=1.5kW

Donde se consideran variaciones de los flujos másicos del orden de 50, 100 y 200 kg/h, junto con la potencia supuesta de 1.5 Kw para la bomba de calor; dando como resultado los comportamientos mostrados en la gráfica 4.4.



Gráfica 4.4. Variación del calor y la temperatura con respecto a la potencia de la bomba de calor. Fuente: Elaboración propia con datos desarrollados sobre el modelo propuesto.

Se observa en la gráfica 4.4 el comportamiento de los puntos de diseño del sistema para diferentes flujos máxicos (50, 100 y 200 kg/h) con una potencia de la Bomba de Calor de 1.5 kW. Lo cual es de esperarse debido a las condiciones de operación del sistema.

4.5. Evaluación económica del sistema con respaldo de la bomba de calor

Para decidir si un proyecto es viable, económicamente hablando, es necesario aplicar una metodología de evaluación de proyectos con la cual se pueda calcular la rentabilidad de una determinada inversión o si dicha inversión se puede recuperar, ya sea obteniendo beneficios (dividendos económicos) o a través de la elaboración de un servicio que no resulte demasiado oneroso. Para evaluar económicamente el presente proyecto, es decir, para evaluar si una bomba de calor usada como respaldo de un calentador solar es económicamente viable, se aplicará la última opción, que el servicio que proporciona la bomba de calor no resulte demasiado costoso.

Para la evaluación económica de una inversión se emplean dos de los índices más utilizados, el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). Aquí es de señalar que un concepto muy importante es el cambio del valor del dinero conforme pasa el tiempo, puesto que, por ejemplo, cien pesos al día de hoy no tendrán el mismo poder adquisitivo que dentro de seis meses, un año, dos o más tiempo, y esto es necesario considerarlo, ya que las potenciales ganancias se dan a través del tiempo e incluso para el caso (como el presente) que no se pretenda obtener dividendos de una inversión, siempre es necesario evaluar si se obtendrá el servicio deseado a un costo razonable, o dicho de otra forma, que el precio del servicio no resulte ser muy alto, sobre todo si existen alternativas más económicas.

También es necesario puntualizar que para el caso particular que se pretende evaluar, es importante considerar el tiempo de retorno de inversión versus el servicio obtenido, ya que entre menos tiempo se tarde el retorno de la inversión más factible será que esta se lleve a cabo.

Para realizar la evaluación económica del proyecto que nos ocupa se aplicará el valor presente neto (VPN), el cual se puede definir como “El valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial”³⁶. Cabe señalar que cuando se desea pasar el dinero del presente al futuro se aplica una tasa “i” de interés y cuando se requiere pasar cantidades futuras al presente se habla de una tasa de descuento, como será en este caso.

Para calcular el VPN es necesario tener el costo de capital o TMAR, que es la tasa mínima aceptable de rendimiento, que bien puede ser la tasa inflacionaria promedio pronosticada para un determinado periodo de tiempo. Una forma de representar el cálculo del valor presente neto es mediante el siguiente diagrama (Figura 4.2) que muestra la inversión inicial y los flujos netos de efectivo (FNE).

³⁶ Baca Urbina Gabriel. (2010). Evaluación de Proyectos. Editorial Trillas. 2da Edición.

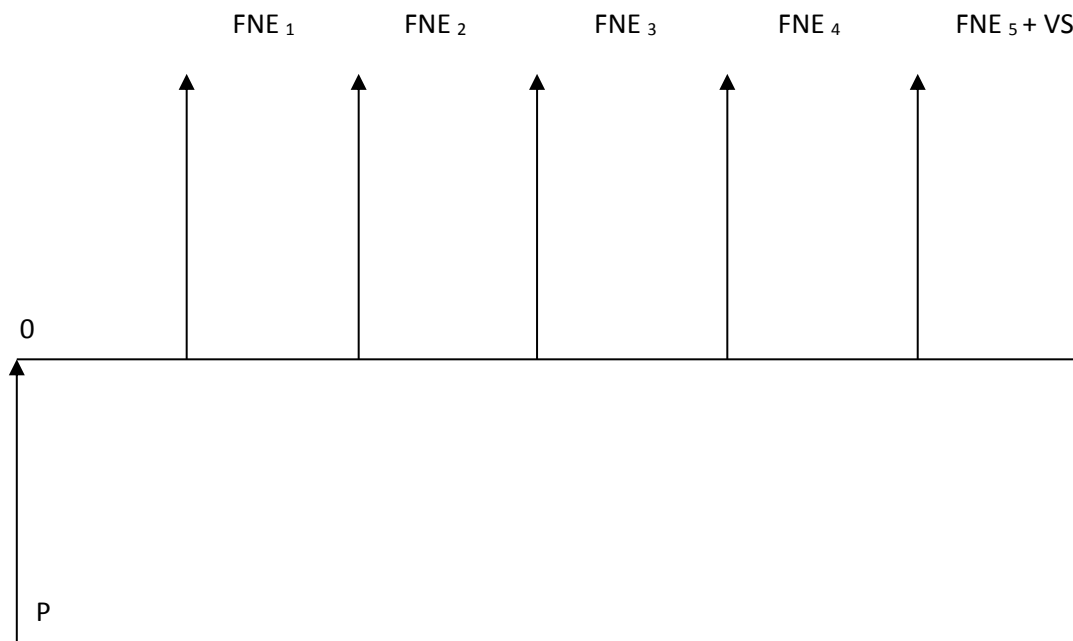


Figura 4.2. Diagrama de variación del valor presente neto a través del tiempo

Fuente: Baca (2010)

Donde:

P: Inversión inicial

FNE: Flujos netos de efectivo

VS: Valor de salvamento.

Posteriormente se realiza el cálculo del valor presente neto, tomando como base la ecuación siguiente (Ecuación 25):

$$VPN = -P + \frac{FNE}{(1+i)^1} + \frac{FNE}{(1+i)^2} + \frac{FNE}{(1+i)^3} + \frac{FNE}{(1+i)^4} + \frac{FNE+VS}{(1+i)^5} \quad (25)$$

Donde:

P: Inversión inicial

FNE: Flujos netos de efectivo

VS: Valor de salvamento

i : Tasa inflacionaria promedio pronosticada a cinco años

También es importante señalar que el VPN se puede interpretar fácilmente si su resultado se encuentra en términos monetarios, si se considera una reinversión total de todas las ganancias anuales, si el valor depende exclusivamente de la “i” aplicada que es la TMAR, o su valor lo determina el evaluador y los criterios de evaluación son considerando si VPN es mayor o igual a cero; se llega a aceptar la inversión, y si VPN es menor a cero, se rechaza dicha inversión.³⁷

Por lo consiguiente se realizará la evaluación económica utilizando el VPN, para lo cual se necesitará: la inversión inicial, que es el costo de la bomba de calor, los flujos netos de efectivo (FNE) que serán los ahorros anuales por no usar un calentador de gas, la tasa inflacionaria y el valor de salvamento, para este último se estimara el porcentaje de depreciación.

Se tiene entonces que el precio estimado de una bomba de calor es aproximadamente 725 euros, lo cual para efectos del presente trabajo de investigación se considerará alrededor de \$21.62 pesos, al tipo de cambio actual (julio 2018); por lo cual se tiene que:

$$\text{Precio bomba de calor} = \$ 15,674.28 \text{ M.N.}$$

Los flujos netos de efectivo se calculan considerando que un calentador solar, para producir agua caliente sanitaria, trabaja alrededor de un 90%, por lo que requiere de un 10% de respaldo. Además se sabe que el consumo energético medio para una vivienda ocupada por 4 personas es aproximadamente 4,590 kWh anual y considerando que el combustible usado habitualmente en las viviendas es gas LP, el cual está compuesto por una mezcla de 60% propano y 40% de butano, y que el propano tiene un poder calorífico de 12.83 kWh/kg y el butano tiene 12.44 kWh/kg. Se tiene que:

Potencial energético del combustible = (consumo energético) (% del combustible en la mezcla)

$$\text{Potencial energético del propano} = 4,590 \text{ kWh} (60\%) = 2,754 \text{ kWh} \quad (26)$$

$$\text{Potencial energético del butano} = 4,590 \text{ kWh} (40\%) = 1,836 \text{ kWh} \quad (27)$$

Por lo que la cantidad de ambos gases se calcula:

$$\text{Masa del propano} = 2754 \text{ kWh} \left(\frac{1 \text{ kg}}{12.83 \text{ kWh}} \right) = 214.65 \text{ kg} \quad (28)$$

³⁷ Op. cit. Baca (2010).

$$\text{Masa del butano} = 1836 \text{ kWh} \left(\frac{1 \text{ kg}}{12.44 \text{ kWh}} \right) = 147.9 \text{ kg} \quad (29)$$

Entonces de acuerdo con las aproximaciones anteriores, se tiene que la masa de gas LP utilizada anualmente es de 362.24 kg por vivienda en la Ciudad de México. Como se requiere de un 10% de éste consumo como respaldo, entonces se necesitarán quemar en un calentador de gas poco más de 36 kg de gas LP, lo cual se considerará con la base para analizar económicamente el uso de la bomba de calor como respaldo de un calentador solar.

Por lo anterior, si se supone el costo actual (segundo semestre de 2018) del kilogramo de gas LP en \$21.00³⁸; se tiene que el monto del gas usado será de \$760.70; y este es el valor que se utilizará como los FNE anuales, descritos anteriormente. También es necesario mencionar que para el cálculo del valor de salvamento (VS) se estimara una depreciación del 10% anual para un periodo de cinco años. Por lo que se asume que:

$$\text{VS} = (\$15,674.28) (0.1) (5) = \$ 7 836.14$$

Finalmente se considerará una inflación promedio anual del 6% que será la tasa mínima de rendimiento aceptable (TMAR). Con todo lo anterior; se puede aplicar la ecuación 25 del valor presente neto VPN donde:

$$\text{VPN} = -P + \frac{\text{FNE}}{(1+i)^1} + \frac{\text{FNE}}{(1+i)^2} + \frac{\text{FNE}}{(1+i)^3} + \frac{\text{FNE}}{(1+i)^4} + \frac{\text{FNE}+\text{VS}}{(1+i)^5}$$

$$\text{VPN} = -15674.28 + \frac{760.7}{(1+0.06)^1} + \frac{760.7}{(1+0.06)^2} + \frac{760.7}{(1+0.06)^3} + \frac{760.7}{(1+0.06)^4} + \frac{760.7+7836.88}{(1+0.06)^5} = -6,613.65$$

De los resultados obtenidos para el valor presente neto se observa que éste es menor a cero; por lo que, considerando que este es una comparación de la inversión inicial o gasto inicial con los esperados ahorros, a lo largo periodo de evaluación, se puede ver que dicha inversión inicial supera estos ahorros esperados en cinco años, por lo que muy probablemente este gasto, de la inversión inicial si puede resultar muy costoso.

Una posibilidad de paliar el alto costo de la inversión, sería recibir, de parte del gobierno federal, un determinado porcentaje, de apoyo, del costo de la bomba de calor, quizá similar

³⁸ EL FINANCIERO. <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/precio-de-gas-lp-crecio-19-en-un-ano>

al programa FIDE, que se impulsó en el sexenio de Felipe Calderón³⁹, para que las familias pudieran cambiar sus refrigeradores antiguos por unos modernos, energéticamente más eficientes. En base a esta idea se realizaron varios cálculos del valor presente neto para diferentes porcentajes, de apoyo gubernamental, del costo de la bomba de calor, buscando con esto que el VPN sea igual a cero, considerando este valor como el mínimo aceptable para un periodo de cinco años.

Si se considera un apoyo gubernamental de un 50%, se tiene que:

$P' = 50\%$ $P = 0.5$ $P = 0.5$ ($\$15674.28$) = $\$7\ 882.14$, por lo que el VPN es:

$$VPN = -7\ 882.14 + \frac{760.7}{(1+0.06)^1} + \frac{760.7}{(1+0.06)^2} + \frac{760.7}{(1+0.06)^3} + \frac{760.7}{(1+0.06)^4} + \frac{760.7+7836.88}{(1+0.06)^5}$$

$$VPN = -7\ 882.14 + 9060.63 = 1\ 178.40$$

$$VPN = \$1\ 178.40 > 0.$$

Como el valor presente neto es mayor a cero, entonces calculamos para un 45% de apoyo gubernamental, por lo que se tiene:

$P' = 55\%$ $P = 0.55$ $P = 0.55$ ($\$15674.28$) = $\$8\ 620.85$, por lo que el VPN es:

$VPN = -8\ 620.85 + 9060.63 = 439.78$ (puesto que la suma de los FNE es constante)

$$VPN = \$439.78 > 0.$$

Como el valor presente neto aún era mayor que cero, se calculó para un 43% y posteriormente para un 42% teniendo:

$$VPN = \$126.29 > 0 \text{ (para 43\% de apoyo gubernamental)}$$

$$VPN = -\$31.05 < 0 \text{ (para 42\% de apoyo gubernamental)}$$

Por lo que realizó una aproximación más precisa, de un 57.8% (42.2% de apoyo gubernamental), teniendo como resultado:

$$VPN = -9\ 059.73 + 9060.63 = 0.896$$

$$VPN = \$0.896 > 0$$

Que a pesar de que en rigor sigue siendo mayor que cero, dicho valor ya está muy cercano a este, por lo que se considera que el porcentaje de apoyo gubernamental adecuado sería el 42.2% del costo de la bomba de calor.

³⁹ Vivo con Crédito. ¡Cambia tu viejo por uno nuevo! <https://www.viveconcredito.com/post/2010/11/24/al-cambiar-tu-refrigerador-viejo-con-apoyo-del-fide-recibiras-bonificaciones-y-creditos/>

Ahora bien, considerando que la inversión de un calentador solar se recupera en promedio en tres años a continuación se mostrará el cálculo realizada para estimar el porcentaje de apoyo gubernamental que se requiere para recuperar la inversión en este tiempo. Para lo cual, de la ecuación (25) el VPN se igualó a cero y se calculó el valor de P, inversión inicial, a tres años, con un valor de salvamento de:

$$\begin{aligned} VS &= \$15\,674.28 (0.1) (3 \text{ años}) \\ &= \$ 4702.28 \end{aligned}$$

Por lo que se tiene, sustituyendo este valor y los flujos netos de efectivo (FNE), en la ecuación (25):

$$0 = -P + \frac{760.7}{(1+0.06)^1} + \frac{760.7}{(1+0.06)^2} + \frac{760.7+4\,702.28}{(1+0.06)^3}, \text{ por lo que se tiene:}$$

$$P = \frac{760.7}{(1+0.06)^1} + \frac{760.7}{(1+0.06)^2} + \frac{760.7+4\,702.28}{(1+0.06)^3} = \$ 5\,981.54$$

$$P = \$ 5\,981.54$$

Que es el monto que el usuario pagaría, correspondiendo a un porcentaje de:

$$p = \frac{5\,981.54}{15\,674.28} (100\%) = 38.16\%, \text{ donde}$$

p: porcentaje que el usuario paga, por lo que se tiene:

$$p' = 100\% - 38.16\% = 61.34\%, \text{ donde}$$

p': porcentaje de apoyo gubernamental

Este último porcentaje de apoyo calculado, al compararlo con el anterior porcentaje de apoyo (42.2%) es significativamente mayor por lo que no sería muy recomendable, por lo que el apoyo gubernamental recomendado sería del 42.2% para un periodo de cinco años.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Después de llevar a cabo la evaluación térmica del sistema de bomba de calor como respaldo de un calentador solar para producir agua caliente sanitaria, y realizar la evaluación económica de dicho sistema se está en condiciones de analizar los datos obtenidos.

En lo que respecta a la cuestión térmica, los resultados mostraron que de acuerdo a los parámetros del sistema propuesto, como son flujo volumétrico, potencia del compresor de la bomba de calor entre otros, es factible o viable llevar a cabo este tipo de proyectos para las condiciones ambientales, sobre todo considerando la temperatura del aire en la Ciudad de México, puesto que para un flujo de 100 litros por hora y con una potencia de 1 kW la bomba de calor puede operar eficientemente; y de acuerdo a los cálculos realizados la temperatura mínima de operación, el punto de diseño del sistema, es de -5°C (268 K), que está por debajo de la temperatura mínima promedio en la capital mexicana (aproximadamente 7.5°C).

Cabe señalar que se toma 1 kW de potencia del compresor de la bomba a pesar de que el cálculo respectivo arrojó un valor de 0.813 kW, debido a que por lo general no se tienen compresores con esta cantidad de potencia, puesto que por lo regular se tienen potencias comerciales de 0.5, 0.75, 1, 1.5 y 2 kW; y como la potencia calculada está entre 0.75 y 1 kW, no se puede estar por debajo de la potencia calculada y teniendo en cuenta que es un cálculo prácticamente en condiciones ideales se consideró tomar el valor más alto.

Por otra parte, se encontró también que 100 L/h (o 100 kg/h) es un valor constante de flujo volumétrico de agua caliente sanitaria que puede proporcionar en condiciones ideales un calentador solar, puesto que éste tarda hasta un mínimo de dos horas para producir agua caliente con un máximo de radiación solar.

También habrá que señalar que las bombas de calor disponibles en el mercado tienen flujos volumétricos sensiblemente menores, puesto que hay equipos que tienen valores desde 17 L/h, hasta 100 L por cada 6 horas de funcionamiento; lo cual vendría a ser una desventaja técnica con respecto a los calentadores solares, porque aun cuando estos tiempos para calentar agua son ideales, se pueden tardar un promedio de 5 horas, que es sensiblemente mayor a lo deseado; y por consecuencia tendrían una desventaja las bombas de calor al usarse como respaldo de éstos.

Para la parte de evaluar la factibilidad del presente proyecto se recurrió al valor presente neto (VPN), con el cual se pretendió determinar el tiempo de retorno de la inversión, ya que se sabe que entre más mayor sea éste, el retorno de dicha inversión será menos factible. Como se describió en la evaluación económica, el valor presente neto calculado a cinco años, resultó ser menor que cero por lo que se podría concluir el no recomendar que se lleve a cabo dicha inversión, ya el proyecto al menos en un horizonte a cinco años no es factible, porque los costos son bastante elevados. Por ello se contempló la alternativa de un escenario donde intervenga una aportación económica por parte del gobierno federal; lo cual se ve reflejado en el costo directo de la bomba de calor, el cual se amortizó hasta cinco años y así

se pudo nuevamente recalcularse el VPN, dando un porcentaje de apoyo gubernamental de alrededor de un 42.2%, lo cual ya se adapta mejor a las necesidades y objetivos del presente trabajo de investigación. Otro escenario que se podría considerar es el de un nuevo VPN con un horizonte a diez años sin considerar apoyo gubernamental, y así ver opciones, tanto económicas como técnicas, para adaptar la utilización de la bomba de calor como respaldo de un calentador solar.

También se podría tener dentro de otras opciones el utilizar el sistema propuesto ya no para uso residencial o doméstico, sino para otras aplicaciones que económicamente pudieran ser más rentables, como el uso de este sistema en hoteles, puesto que los requerimientos térmicos y energéticos, junto con su potencial factibilidad económica son diferentes. Para producir agua caliente sanitaria en los hoteles en algunas ocasiones no son suficientes los calentadores solares por sí solos, ya que la cantidad de agua caliente sanitaria requerida es muy variable, esto debido a la población flotante que tiene este tipo de servicios, sobretodo porque no se puede prever el tiempo de llegada de los huéspedes, los cuales ingresan en periodos de tiempo muy espaciados en el día. Además de que si se optara por tener agua caliente sanitaria para la capacidad máxima de ocupación podría representar un derroche energético y económico bastante elevado.

Otra de las opciones que podría existir para emplear el sistema calentador solar- bomba de calor sería usarlo en el calentamiento del agua de las albercas públicas de los centros deportivos, puesto que estos lugares maneja un horario de atención al público bastante amplio, que va desde las primeras horas de la mañana hasta altas horas de la noche, con lo cual puede exceder la capacidad de los calentadores solares, y por ende serían una muy buena opción el sistema propuesto en este trabajo de investigación

Finalmente, otra opción a futuro, para seguir explorando la posibilidad de poder implementar el ya mencionado sistema híbrido, sería en el ámbito tecnológico, donde se plantee la necesidad de apoyos gubernamentales para facilitar la adquisición, diseño, elaboración o adaptación de este tipo de sistemas; junto con la producción a mayor escala de bombas de calor, y así reducir los costos en el mercado y que puedan ser adquiridos con mayor facilidad por los usuarios finales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) Alonso, Abraham, Muy interesante, AÑO XIX, No 08, (2002).
- 2) Anda Cuauhtémoc. México y sus Problemas Socioeconómicos. IPN (1981).
- 3) Baca Urbina, Gabriel. Evaluación de Proyectos. Editorial Trillas. 2da Edición (2010).
- 4) Çengel Yunus A., Boles Michael A., Termodinámica. Editorial Mc Graw Hill. Quinta edición, 2006.
- 5) O'Brien, Robert; Máquinas, Colección científica de Time-Life (1976)
- 6) Rey Martínez, Francisco J.; Velasco Gómez, Eloy. Bombas de calor y Energías Renovables en Edificios. Editorial Thomson-Paraninfo, 2005.
- 7) Tonda, Juan. El Oro Solar y otras Fuentes de Energía. Fondo de Cultura Económica. Tercera Edición, 2003.
- 8) Wilson, Michel; Energía, Colección científica de Time-Life (1969).

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- 1) Statista. El portal de las estadísticas. Evolución anual de las reservas de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos (Pemex) entre 2006 y 2017. <https://es.statista.com/estadisticas/611755/reservas-probadas-de-hidrocarburos-de-la-empresa-petroleos-mexicanos/>
- 2) SECRETARÍA DE ENERGÍA (2012), PROSPECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES 2012-2026. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2012-2026.pdf
- 3) RALEY ESTUDIOS COSTEROS (2012). <http://raleystudioscosteros.blogspot.mx/2012/06/21-de-junio-dia-internacional-del-sol.html>
- 4) SUELO SOLAR. Grandes oportunidades para las energías renovables en México. <http://www.suelosolar.com/newsolares/newsol.asp?id=8108>
- 5) Global solar horizontal irradiation. https://www.researchgate.net/figure/Global-solar-horizontal-irradiation-in-Europe-Source-GeoModel-Solar-2011_fig14_311487436

- 6) H2O TEK. La historia del boiler solar. <https://h2otek.com/blog/la-historia-del-boiler-solar/>
- 7) *EnergíaSolar.mx. Historia de la energía solar. www.energiasolar.mx/inventos/historia-energia-solar.html*
- 8) EcoInventos. Uno de los primeros calentadores solares de la Historia (2014). <http://ecoinventos.com/calentador-solar/#ixzz3a3odLLWa>
- 9) *EnergíaSolar.mx. Historia de la energía solar. www.energiasolar.mx/inventos/historia-energia-solar.html*
- 10) MetrosCúbicos. Un calentador solar para tu casa. <https://www.metroscubicos.com/articulo/decoracion-y-hogar/2013/06/18/un-calentador-solar-para-tu-casa>
- 11) Catalogo calentadores IUSA. http://www.iusa.com.mx/brochure/catalogo_calentadores.pdf
- 12) Cal-o-Rex. Calorex Solar. <http://www.calorex.com.mx/calentadores/calorex/solar/solar/calorex-solar-termosifon-150>
- 13) http://www.solaire.com.co/images/aprende_mas/CAPACITACION_ENERGIA_SOLAR_TERMICA_CHROMAGEN.pdf
- 14) http://www.alfasolar.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=5:nacionales&catid=25:empresa
- 15) <http://proyectedeenergiarenovable.com/Termicos-Solares/Tipos.asp>
- 16) www.docsetools.com/articulos-utiles/article_105674.html

- 17) Coche español. La historia de la bomba de calor.
<http://www.automotriz.biz/coches/car-maintenance/general-car-maintenance/126716.html>
- 18) Esquema de Bomba de Calor. Fuente: Ciclos de refrigeración. Refrigeradores y bombas de calor.
<http://ciclosderefrigeraciontermodinamica.blogspot.mx/2015/02/refrigeradores-y-bombas-de-calor.html>
- 19) https://www.gasnaturalfenosa.es/hogar/ahorro_y_eficiencia_energetica/climatizacion_eficiente/aire_acondicionado_y_bomba_de_calor
- 20) Ciclos de refrigeración. Refrigeradores y bombas de calor
<http://ciclosderefrigeraciontermodinamica.blogspot.mx/2015/02/refrigeradores-y-bombas-de-calor.html>
- 21) https://gasfriocalor.com/images/Tecnico/Bomba_de_calor/Esquema_Acumuladores_Junkers_G.jpg
- 22) frigasat. Aerotermia. <http://www.frigasat.com/renovables/aerotermia.html>
- 23) <http://tukimica.blogspot.com/2013/11/bombas-de-friocalor.html>
- 24) GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR ARISTON
<http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-para-ac-s-ariston-nuos-primo-80>
- 25) GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR PANASONIC.
<http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-panasonic-aquarea-dhw-paw-dhwm80znt>
- 26) GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR AEROTERMIA.
<http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-para-ac-s-htw-at-o-80vb1>

- 27) GASFRIOCALOR. BOMBAS DE CALOR BERETTA. <http://www.gasfriocalor.com/bomba-de-calor-beretta-acquazenit-80>
- 28) Inafed. Medio Físico. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/mediofisico.html>
- 29) INEGI. Ciudad de México. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09>
- 30) smartbitt. RADIACIÓN SOLAR. <http://energiasolar.smartbitt.com/radiacion-solar/>
- 31) INEGI. Información por entidad. Ciudad de México. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=09>
- 32) INEGI. Red Nacional de Metadatos. <http://www3.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/3/datafile/F8>
- 33) EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA PARA SERVICIOS COMERCIALES EN LA CD. DE MÉXICO. FLORES BARRRIOS CLAUDIA ANGÉLICA. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7137/tesis.pdf?sequence=1>:
- 34) INEGI. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb286&s=est&c=32904>
- 35) Ciencia y Tecnología 10 ISEU 2010. Los ciudadanos y su relación con el agua. Cattaneo Maricel, López Sardi Estela M. http://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2012/cyt/numero10/10N_ISEU_CyT08.pdf

- 36) Servicio Meteorológico Nacional. CONAGUA. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia.
<https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMAX/2016.pdf>
- 37) Cosas de Mujer. La temperatura del agua de la ducha. Riot Jane.
<https://cosasdemujer.com/la-temperatura-del-agua-de-la-ducha/>
- 38) FILLSUN. <http://energia-solar.com.ar/info/>
- 39) Censo de Población y Vivienda. INEGI. (2010).
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- 40) EL FINANCIERO. <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/precio-de-gas-lp-crecio-19-en-un-ano>
- 41) Vivo con Crédito. ¡Cambia tu viejo por uno nuevo!
<https://www.viveconcredito.com/post/2010/11/24/al-cambiar-tu-refrigerador-viejo-con-apoyo-del-fide-recibiras-bonificaciones-y-creditos/>

ANEXOS

Bomba de calor para ACS Ariston Nuos Primo 80

Bomba de calor mural para ACS de 80 litros Nuos Primo

Comentarios 0

entrega bajo pedido **Garantía 2 años**



51,59 €x15

639,59€

		Datos técnicos - Dimensiones del producto			
		NUOS PRIMO 80	NUOS PRIMO 100	NUOS PRIMO 80	NUOS PRIMO 100
Capacidad	L	80	100	a mm	1.140
Potencia térmica media BC, aire a 20°C*	W	750	750	b mm	629
Potencia eléctrica absorbida media bomba de calor*	W	250	250		
COP aire 20°C*		3,0	3,0		
COP según norma EN 16147 aire 20°C**		2,5	2,5		
Temperatura máxima bomba de calor	°C	55	55		
Temperatura aire mín./máx.	°C	10/40	10/40		
Cantidad máx. agua a 40 °C en una extracción única	L	98	118		
Tiempo de calentamiento, aire a 20°C*	h, min	4:45	6:00		
Potencia máxima absorbida	W	1.550	1.550		
Caudal de aire nominal	m³/h	170	170		
Volumen mínimo del local (inst. sin conductos aire)	m³	20	20		
Potencia resistencia	W	1.200	1.200		
Temperatura máx. resistencia	°C	75 (65 de fábrica)	75 (65 de fábrica)		
Presión máx. de ejercicio	bar	8	8		
Peso	kg	45	49		
Protección IP:		IPX4	IPX4		

TARIFA NUOS	NUOS PRIMO 80	NUOS PRIMO 100
Código	3629006	3629007
Canon de reciclaje	3,45	3,45
Precio Euros	1.080,00	1.180,00

* Datos expresados para una temperatura de calentamiento de 55°C y temp. agua fría de 15°C según la norma EN255-3.

** Datos expresados para una temperatura de calentamiento de 55°C y temp. agua fría de 10°C según la norma EN16147

LEYENDA **E** Entrada agua fría. **S** Salida agua caliente.
C Conexión descarga condensados.

Bomba de calor Baxi BC ACS IN 180

Bomba de calor Baxi BC ACS IN 180 de suelo con acumulación de 180 litros sin serpentín logrando ahorros de hasta un 70% en la factura energética respecto a los termos eléctricos

Comentarios 0

entrega bajo pedido **Garantía 2 años**



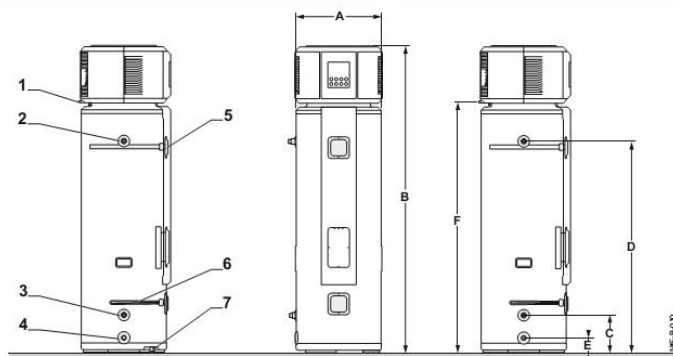
82,60 €x15

1.024,01€

		180 ⁽⁴⁾	230 ⁽⁴⁾
Capacidad	l	180	230
Potencia BC con 15°C aire	W	1500	1500
COP con 15°C de aire (2)		3,5	3,5
COP con 7°C de aire (3)		2,4	2,5
Clase de Eficiencia en ACS/Perfil dem.		A/L	A/XL
Potencia de la resistencia eléctrica	W	1550	1550
Peso aproximado en vacío	kg	102	116
Referencia		7629067	7629068

1. Evacuación de condensados
2. Salida de agua caliente sanitaria 3/4"
3. Entrada agua fría sanitaria 3/4"
4. Vaciado
5. Ánodo de magnesio
6. Resistencia eléctrica
7. Pies regulables

	BC ACS 180	BC ACS 230
A mm	552	552
B mm	1670	1990
C mm	240	240
D mm	1050	1370
E mm	93	93
F mm	1308	1628



Bomba de calor Beretta Acquazenit 80

Bomba de Calor mural Beretta Acquazenit para producción de Agua Caliente Sanitaria de 80 litros.

Comentarios 0

entrega bajo pedido **Garantía 2 años**



1.180,00 €

antes

70,44 €x15

Características Técnicas

Modelo		80	E 80	120	E 120
Capacidad acumulación	l	80		120	
Presión nominal	MPa	0,6			
	bar	6			
Protección anticorrosión del acumulador		Esmaltado / Anodo Magnesio			
Espesor aislamiento	mm	40-85			
Tiempo de calentamiento ⁽¹⁾	h:min	04:40		06:40	
Consumo de energía durante el calentamiento ⁽¹⁾	kWh	0,99		1,41	
Consumo energía en ciclo escogido de las emisiones ⁽¹⁾	kWh	2,04		2,08	
COP ACS en ciclo escogido de las emisiones ⁽¹⁾		3,1			
Tiempo de calentamiento ⁽²⁾	h:min	05:20		08:41	
Consumo de energía durante el calentamiento ⁽²⁾	kWh	1,12		1,78	
Consumo energía en ciclo escogido de las emisiones ⁽²⁾	kWh	2,45		2,51	
COP ACS en ciclo escogido de las emisiones ⁽²⁾		2,65		2,61	
Potencia en modo stand-by conforme EN 16147	W	19		27	
Clase de protección		IP 24			
Consumo	W	2350			
Tensión de alimentación	V-Hz	230-50			
Potencia resistencias eléctricas	W	1000 x 2			
Protección eléctrica	A	16			
Temperatura mínima aire	°C	7	-7	7	-7
Temperatura máxima aire	°C	35			
Consumo máximo de agua (40°C)	l	90		142	
Temperatura agua seleccionada	°C	55			
Temperatura máxima agua con bomba de calor	°C	55			
Temperatura máxima agua con resistencias eléctricas	°C	75			
Temperatura programa antilegionela	°C	70			
Temperatura de almacenamiento (mín-máx)	°C	2-35			
Refrigerante		R134a			
Carga de refrigerante	g	490	540	490	540
Nivel sonoro	dB (A)	51			
Presión sonora a 1 m.	dB (A)	39,5			
Caudal de aire	m³/h	100-230			
Presión estática útil (con caudal de 100 m³/h)	Pa	95			