



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA TÉRMICA

“Diseño de un sistema híbrido para calentamiento de alberca”

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

PRESENTA:
Ing. Félix Rivera Trejo

DIRECTORA DE TESINA: M.I. Verónica Flores García

CIUDAD DE MÉXICO

Octubre 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Durante la etapa de desarrollo de este proyecto agradezco los servicios brindados por la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería perteneciente a la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería, a la Especialización en Ahorro y Uso Eficiente de la Energía, así como al grupo de profesores que contribuyó en mi formación académica y profesional, a mis familiares que me apoyaron en esta nueva etapa de mi vida y también al proyecto “Formación de recursos humanos para la sustentabilidad energética en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Proyecto Conacyt No. 246077), el cual me ayudó a formar actitudes y habilidades para la vida profesional.

Diseño de un sistema híbrido para calentamiento de alberca

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
2. Interés y justificación del proyecto.....	1
3. Planteamiento del problema	3
3.1 Antecedentes del caso de estudio.....	3
4. Objetivos.....	5
5. Sistema híbrido	5
6. Metodología para el dimensionamiento del sistema híbrido	7
6.1 Determinación y evaluación de los requerimientos del calor	7
6.2 Análisis de la energía Solar.....	10
6.2.1 Colectores Solares	13
6.3.2 Colectores de polietileno de alta densidad	14
6.3.3 Colectores solares de cobre	18
6.3.4 Configuraciones hidráulicas para colectores	21
6.4 Generadores de agua caliente.....	24
6.4.1 Funcionamiento general de los generadores de agua caliente.....	24
6.5 Bombas de calor.....	28
6.5.1 Funcionamiento de una bomba de calor.....	28
6.6 Sistema hidráulico.....	30
6.6.1 Bomba centrífuga	32
7. Evaluación energética del proyecto	39
8. Evaluación económica del proyecto	41
8.1 Tarifas eléctricas	42
8.2 Tarifas de combustibles	44
8.3 Cobro por servicios y rentabilidad del proyecto	44
9. Conclusiones.....	46
10. Bibliografía.....	47

1. Introducción

El presente proyecto considera el diseño del sistema de calentamiento de agua sanitaria para climatizar una alberca en una instalación deportiva. Dicha alberca se encontrará dentro de un deportivo, las instalaciones estarán ubicadas al sur de la Ciudad de México.

Los deportivos requieren importantes cantidades de energía térmica, dicha energía satisface diversos requerimientos en las instalaciones.

El presente proyecto hace una propuesta de diseño, para el sistema de calentamiento de agua para climatizar la alberca, considerando aquellas tecnologías que cumplan con los requisitos de ser eficientes poniendo en relevancia la importancia de este criterio en el diseño. Asimismo, se propone la utilización de energías renovables debido a cuestiones de cumplimiento de la normatividad aplicable en la Ciudad de México.

Entonces, para el diseño se consideraron las normas vigentes: NADF-008-AMBT-2005 “Especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en albercas, fosas de clavados, regaderas, lavamanos, usos de cocina, lavandería y tintorerías” [31] y la norma de aplicación voluntaria “NMX-ES-001-NORMEX-2005 “Energía Solar-Rendimiento térmico y Funcionalidad de colectores solares para el calentamiento de agua-Métodos de prueba y Etiquetado”. [32]

El diseño aquí propuesto considera la evaluación de dos diferentes sistemas, el dimensionamiento de la tubería y los accesorios que conforman todo el sistema de calentamiento de la instalación deportiva, todo lo anterior teniendo como marco de análisis el ahorro y uso eficiente de la energía.

2. Interés y justificación del proyecto

Actualmente muchos de los diseños de sistemas para calentamiento de agua de servicio no se hacen con la visión de la eficiencia energética, por otro lado, es común que se confunda el uso de fuentes renovables con este concepto, incluso, en muchos casos los diseños que incluyen el uso de fuentes renovables no toman en cuenta criterios de eficiencia energética.

Es conveniente aclarar la diferencia entre eficiencia energética y la utilización de energías renovables, ya que son cosas totalmente distintas, pero que pueden ir de la mano, la eficiencia energética se refiere a aumentar el aprovechamiento de los recursos, por ejemplo en el caso de interés de la presente tesina que por cada unidad de combustible se pueda

calentar mayor cantidad de agua. Mientras que la utilización de energías renovables sólo supone un cambio de fuente energética o sustitución de fuente.

Existen otros factores a considerar y que ponen en relieve la importancia de un diseño eficiente y esto es que el sector privado se encuentra en expansión en lo que a instalaciones deportivas se refiere, sobre todo en grandes cadenas de gimnasios distribuidos en las grandes ciudades del país, así como deportivos, entre otros, este tipo de instalaciones tienen algo en común, requieren energía térmica para brindar algunos de los servicios básicos.

Los equipos que normalmente se usan para calentamiento de agua de servicio en estos centros deportivos son calderas. El agua de servicio es usada en: regaderas, cuartos de vapor, climatización de albercas, entre otros, estos usos demanda una gran cantidad de energía; dicha demanda está en función de la masa de agua que se requiere calentar y la temperatura objetivo a la que se desee llegar la cual está definida por normativas deportivas como en el caso de la climatización de albercas como se verá más adelante.

Cubrir la demanda para este tipo de servicio requiere un alto consumo de combustibles fósiles, por esta razón en el caso de México es cada vez más frecuente apoyarse en el uso de tecnologías renovables como los sistemas solares para el calentamiento de agua de alberca, son varios los factores que promueven el uso de este tipo de sistemas en este sector comercial entre los cuales destacan:

- El recurso solar en territorio mexicano con valores diarios de radiación en un rango de 4.4 kWh/m² y 6.6 kWh/m² [15]
- La normatividad vigente de entidades específicas como la NADF-008-AMBT-2005 [31] aplicable en la CDMX y la norma de aplicación voluntaria “NMX-ES-001-NORMEX-2005” [32]
- Los programas nacionales que han venido promoviendo los sistemas solares: PROCALSOL, (Programa de Calentamiento Solar de Agua México), [16] el cual se aboca a los sectores: residencial, comercial y de servicios, agropecuario e industrial.

Con base a lo anterior se justifica el tema desarrollado en esta tesina la cual propone el diseño del sistema de calentamiento en una alberca deportiva que cumpla con criterios de eficiencia energética, así como atender la normatividad vigente en cuanto al uso de energía renovable, en particular la solar contribuyendo de esta manera con la disminución del uso de combustibles fósiles y por lo tanto la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI). [17]

3. Planteamiento del problema

El requerimiento de energía térmica para alcanzar la temperatura objetivo a la cual el agua debe estar para las actividades de natación a nivel profesional está relacionado con las normativas para la instalaciones deportivas, tal es el caso del reglamento de la FINA en Facilities Rules, FR 2.12¹ [18]. Esta norma indica la temperatura ideal del agua para las competiciones o entrenamientos, a la cual debe estar el agua y que debe oscilar en un rango de 25°C a 28°C, esta variable es relevante porque es la base para realizar una propuesta de tecnologías que cumplan con los requerimientos energéticos.

Alcanzar esta temperatura demanda mucha energía, por lo cual uno de los puntos clave para esta propuesta es evaluar, dimensionar y seleccionar la tecnología o combinación de tecnologías adecuadas para alcanzar y mantener el agua en el rango de temperatura ideal y que se cumplan los criterios de eficiencia energética teniendo además en cuenta que la cantidad de energía requerida puede variar dependiendo de la hora del día y la estación del año.

3.1 Antecedentes del caso de estudio

La propuesta de diseño para este caso de estudio, parte de que el deportivo tiene considerada la instalación de una alberca semi-olímpica de dimensiones 8 m x 25 m con 1.5 metros de profundidad, esto es un volumen total 300 m³. En la Figura 1 se muestra el esquema de una alberca con las medidas oficiales para semi-olímpicas estipuladas en el reglamento de instalaciones de la, Federación Internacional de Natación (FINA²) [18], además en el estatuto de la Federación Mexicana de Natación (FMN). [19]

Como puede observarse en la Figura 1, se proponen 4 carriles con una extensión de 2 m de ancho por 25 m de largo. Se considera una alberca semi-olímpica por que las medidas oficiales de las albercas olímpicas tienen una extensión de 50 m de largo y suelen tener 2.5 metros de profundidad.

¹La Federación Mexicana de Natación (FMN) en su apartado de reglamentos deportivos marca como referencia el cumplimiento de la FR 2.12 de la FINA. Cabe comentar que los expertos en natación recomiendan este rango de temperatura, ya que si se mantiene por arriba el atleta puede deshidratarse y tener un menor rendimiento, por otro lado si se mantiene por debajo de 25°C el cuerpo puede tardar en reaccionar y hacer más lento al atleta.

² La FINA es la organización que regula las normas de la natación a nivel competitivo.

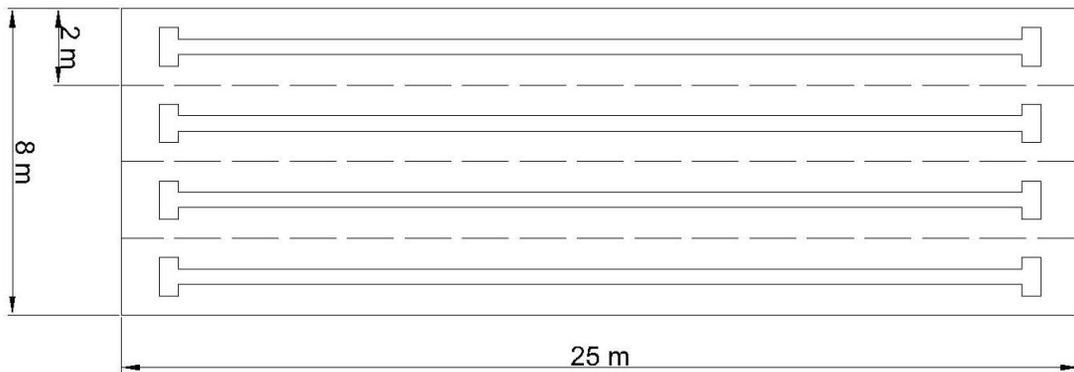


Figura 1 “Vista de la alberca”

Fuente: Elaboración propia

La evaluación del espacio para instalar la alberca se muestra en la Figura 2, la zona azul es el área total del lugar de 600 m² aproximadamente, el área roja corresponde a la superficie que utilizará la alberca y la zona verde corresponde al área que se podría disponer para la instalación de los colectores solares.



Figura 2 “Mapa de distribución del sitio”

Imagen obtenida de Google maps y edición propia [34]

La ocupación del espacio también debe considerar un cuarto de máquinas, para colocar la bomba hidráulica, la tecnología de calentamiento, el sistema de control eléctrico entre otros.

4. Objetivos

Como objetivo principal se tiene:

- Diseñar un sistema de calentamiento de agua para alberca en un deportivo que sea eficiente y que utilice energía renovable para cumplir con la normatividad vigente.

Y un objetivo secundario es:

- Determinar cuál tecnología es mejor para la implementación de este proyecto, tomando en cuenta tiempos de operación y costos, entre la bomba de calor y el generador de agua caliente.

5. Sistema híbrido

El sistema híbrido es la combinación de dos tecnologías con el mismo propósito pero con un principio diferente, generalmente los sistemas consideran tecnología convencional y una tecnología sustentable, esta combinación tiene el propósito de disminuir el consumo de combustible, dentro de la clasificación de tecnología convencional entran las calderas o generadores de agua caliente, los cuales usan el combustible para suministrar calor a un fluido, en este caso agua, mientras que la tecnología sustentable es la que se usa para captar energía de una fuente de renovable, como es la energía solar.

Se considera, a su vez, el uso de las bombas de calor, las cuales son una alternativa que no demanda de forma directa el uso de combustibles, ya que estas funcionan con energía eléctrica. El funcionamiento básico de las bombas de calor es similar al de un refrigerador pero a diferencia de éste absorben calor de un espacio para suministrarlo a otro espacio. En lo que respecta a las energías renovables se tienen beneficios para el ambiente ya que su uso representa un menor impacto.

Una de las desventajas que tienen las energías renovables es su nivel de captación de la energía, ya que está sujeta a la disponibilidad de la fuente energética, por ejemplo, la energía eólica está a disposición de que el viento tenga una velocidad adecuada para comenzar con la captación de energía mecánica para transformarla a energía eléctrica. Otra de las desventajas es que la cantidad de energía que se puede obtener con estas fuentes no es la suficiente para considerar un cambio total de tecnología, en contraparte los

combustibles tienen altos niveles de aportación energética, por esta razón se busca la combinación de ambas tecnologías para disminuir el consumo de combustibles y la generación de gases de efecto invernadero.

En la Figura 3 se puede apreciar el funcionamiento básico de un sistema híbrido, el cuál combina la tecnología convencional (caldera) con un sistema de captación solar (paneles térmicos). El agua que viene de la alberca es succionada por el sistema de bombeo principal, posteriormente pasa por el filtro para luego entrar en la zona de intercambio de calor*, este intercambio de calor se realiza con el vapor que sale de la caldera, por otro lado, el sistema de los colectores solares puede ser cerrado o abierto en el primer caso el agua que se caliente no se mezcla con el agua, esto es el intercambio se lleva a cabo a través de intercambiadores de calor, en el segundo caso los flujos se mezclan; estas dos formas de operar representan ventajas y desventajas respectivas, cuando se mezcla la vida útil de los colectores puede verse disminuida pero se mejora la eficiencia de intercambio, mientras que en el sistema cerrado la vida útil se incrementa pero demerita en cuanto a la eficiencia de intercambio de calor. [33]

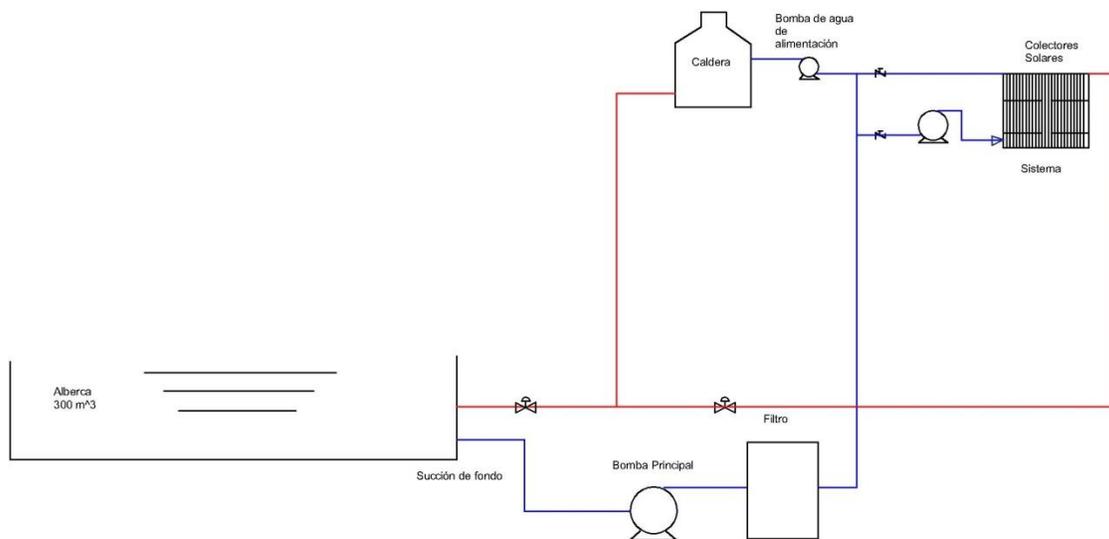


Figura 3 “Sistema Híbrido”

Fuente: Elaboración propia

En el caso del sistema abierto, para mejorar el sistema se coloca una válvula de control entre el sistema de caldera y el sistema de paneles, esta válvula tendrá la función de dejar pasar el agua directamente de los paneles hacia la alberca cuando ésta alcance la temperatura de 28°C, sino alcanza dicha temperatura la válvula conducirá al fluido precalentado hacia la caldera para incrementar la temperatura hasta alcanzar los 28°C por tanto se trata de un sistema de control para asegurar el mejor aprovechamiento de la energía térmica proveniente de ambas fuentes de calor.

6. Metodología para el dimensionamiento del sistema híbrido

La metodología a seguir para el dimensionamiento del sistema híbrido está detallada a continuación:

1. Para comenzar se debe conocer la cantidad de energía que debe utilizarse para calentar el agua (en un rango de 25°C a 28°C) para la alberca y brindar el servicio de natación: se debe, también de considerar los casos extremos, como la temperatura más fría registrada en un año atípico, para tener la seguridad del buen funcionamiento del sistema y poder cumplir con el objetivo de abastecer la demanda.
2. Seguidamente, se evaluará la tecnología solar, ya que esta energía no siempre está disponible, está sujeta al horario e incluso a la época del año.
3. Después se hará la evaluación de la tecnología que suele usarse para estos fines, que es un calentador de agua, también se incluye el análisis de una nueva tecnología que está comenzando a usarse en estas aplicaciones, la bomba de calor y,
4. Finalmente se hará una comparación para comprobar ventajas y desventajas de cada tecnología y así determinar cuál es la mejor combinación de tecnologías para conformar el sistema híbrido.

6.1 Determinación y evaluación de los requerimientos del calor

Para estimar el calor que se requiere para elevar la temperatura se necesita conocer el volumen de agua a calentar, para el caso de diseño se considera la temperatura más alta que hay que alcanzar, además de la elevación de temperatura en el mes más frío del año, con ello se espera que el sistema tenga la capacidad de alcanzar la temperatura requerida sin ningún tipo de problema.

Para un volumen de 300 m³ se obtiene una masa de agua de 299,400 kg, la densidad promedio del agua es de 998 kg/m³ a 28°C. La ecuación que se utilizó para determinar la cantidad de masa es la ecuación de masa derivada de la ecuación de la densidad, representada en la Ecuación 1.

$$m = \rho \times v \quad (1)$$

Dónde:

- *m* es la masa del agua en kg
- *ρ* es la densidad del agua en $\frac{kg}{m^3}$
- *v* es el volumen del agua en m³

Sustituyendo los valores de volumen y densidad en dicha ecuación es como se obtuvo la cantidad de masa de agua que debe calentarse.

Para calcular el calor se utilizará la ecuación 2, la cual está en función de la masa y de la diferencia de temperaturas entre la inicial y la final.

$$Q = mc\Delta T \quad (2)$$

Dónde:

- *m es la masa del agua en kg*
- *c es la capacidad calorífica del agua $\left(4.186 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$*
- *ΔT es la diferencia entre temperaturas $(T_2 - T_1) \text{ } ^\circ C$*
- *Q es el calor en kJ*

La temperatura T_1 se tomó con base a los datos proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional, la cual fue de $7.5 \text{ } ^\circ C$ registrada como la temperatura promedio más baja durante todo el año 2016 y la temperatura T_2 es a la cuál dictan las normas de competencias que son $28 \text{ } ^\circ C$. Se tomó esta temperatura de $7.5 \text{ } ^\circ C$ con fines de diseño ya que aún no está instalada la alberca.

Sustituyendo los valores obtenidos del diseño en la ecuación 2 el resultado es el siguiente:

$$Q = (299,400 \text{ kg}) \left(4.186 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}\right) (28 \text{ } ^\circ C - 7.5 \text{ } ^\circ C) = 25,692,412.2 \text{ kJ}$$

Se determinó que la demanda máxima de energía que el sistema tiene que cubrir, es de $25,692,412.2 \text{ kJ}$ o bien 25.7 GJ , esta cantidad de energía es sólo cuando el sistema entra en operación por primera vez. Las ecuaciones utilizadas en esta sección se obtuvieron del libro de termodinámica Cengel [1].

Para satisfacer esta demanda energética de 25.7 GJ , un calentador de agua de 300 cc (caballos caldera) [28] tardaría 24.25 horas, mientras que un conjunto de 3 bombas de calor de 141,000 BTU [9] tardarían 172 horas, estos resultados se deben a la cantidad de energía que pueden suministrar por hora.

Realizando una estimación de la energía consumida durante el año, se toma la fórmula 1 de la norma NADF-008-AMBT 2005, la cual hace referencia al Cálculo del Consumo Energético Anual (CEA) en la(s) alberca(s) y/o fosa(s) de clavados, la fórmula es la siguiente: [31]

$$CEA = V * \rho * C_p * \Delta T * t$$

Fórmula 1

Dónde:

- CEA es el consumo energético anual por utilización de agua caliente en la(s) alberca(s) y/o fosa(s) de clavados, (kJ/año);
- V es el volumen de la(s) alberca(s) y/o fosa(s) de clavados, corresponde al agua a calentar por día, (l/día);
- ρ es la densidad del agua, para fines de la presente norma se utilizará: 1 kg/l;
- C_p es el calor específico, para fines de esta norma, se utilizará: 4,19 kJ/kg°C;
- ΔT es la pérdida promedio de temperatura nocturna en el agua de la(s) alberca(s) y/o fosa(s) de clavados, para fines de la presente norma se utilizará 2,5°C; y
- t es el tiempo de operación del establecimiento por año (días/año).

Sustituyendo los datos para calcular el consumo y tomando a consideración 312 días al año para laborar de lunes a sábado las 52 semanas da como resultado es de 1,131,300 kJ/año, o bien 1,131 GJ/año, cabe mencionar que este resultado es cuando el sistema haya alcanzado su punto óptimo de operación, por eso sólo se toma en cuenta 2.5 grados como diferencial de temperatura a calentar diariamente. Por lo que los colectores solares deben de aportar 339,390 kJ/año, equivalentes al 30% de la energía térmica requerida.

A lo largo del año y sus respectivas estaciones se presentan diferentes temperaturas, dichas temperaturas se muestran en la Tabla 1, los datos se refieren a la región de la Ciudad de México ya que el sistema está diseñado para esta región, si se desea conocer o dimensionar el sistema para alguna otra región se deberán considerar los datos de dicha región.

Mes	T Min °C	T media °C	T Max °C
Enero	7.5	14.1	20.7
Febrero	8.1	15.8	23.5
Marzo	10.8	17.4	24.1
Abril	12.9	20.1	27.2
Mayo	14.1	20.9	27.8
Junio	13.3	18.9	24.4
Julio	13.1	18.8	24.5
Agosto	13.6	19.2	24.8
Septiembre	13.7	18.9	24.1
Octubre	12.2	17.9	23.5
Noviembre	10	15.7	21.3
Diciembre	9.9	16.6	23.3

Tabla 1 “Datos de temperatura de la Ciudad de México en 2016”

Fuente: Elaboración propia con los datos del MN [20]

La Tabla 1 se puede interpretar como un comportamiento que tendrá el sistema en los diferentes meses del año y en sus diferentes horarios del día. Puede notarse que en la tarde cuando la tierra alcanza su máxima temperatura hay una menor diferencia con la temperatura objetivo aquí es cuando se utilizará menor cantidad de energía, sin embargo también es el horario dónde se puede captar mayor cantidad de energía solar para el calentamiento. Además los meses de Abril y Mayo son los más calurosos, por lo que se utilizará menos energía para calentar en esos meses.

6.2 Análisis de la energía Solar

El Sol brinda energía en forma de luz y calor, esta energía la genera mediante reacciones nucleares en su interior. Se considera al Sol una fuente de energía inagotable por el tiempo de vida que aún le queda, el uso de este recurso energético no se había considerado por la presencia de los combustibles, que hasta hace unas décadas se tenía la certeza de que suministrarían la demanda energética. En el año 2010 tras realizar un estudio, se estimó que las reservas totales de hidrocarburos en México durarán hasta 31.3 años [25], por esta razón se están considerando el uso de las energías alternas (energías renovables), más limpias y por su posibilidad de renovación.

La única forma de transmisión del calor es por medio de radiación electromagnética, esto se debe a la ausencia de fluidos en el espacio y a la distancia que existe entre el sol y la tierra, la transmisión de energía se realiza de acuerdo a la ley cero de la termodinámica, la cual establece que dos cuerpos que están en equilibrio térmico tendrán la misma lectura de temperatura, entonces la diferencia de temperaturas entre el Sol y la tierra hace posible la transferencia de energía. [26]

El valor de la irradiación solar varía entre 1338 y 1386 W/m^2 . El valor propuesto por World Radiation Center (WRC) es de 1367 W/m^2 , las variaciones en esta constante se deben a varios factores, entre los cuales está la inclinación terrestre, la órbita elíptica alrededor del sol, la posición terrestre (altitud y latitud), entre otras [27].

Para nuestro caso de interés los datos de radiación solar que inciden al sur del Ciudad de México donde se instalará el club deportivo con alberca se obtuvieron con los sistemas de medición de la NASA [21] están contenidos en la Tabla 2.

Mes	Radiación solar diaria horizontal [kWh/m ² /día]	Presión atmosférica [kPa]	Velocidad del viento [m/s]
Enero	4.78	81.2	3.1
Febrero	5.73	81.1	3.2
Marzo	6.55	81.0	3.5
Abril	6.5	81.0	3.4
Mayo	6.24	81.0	3.1
Junio	5.6	81.0	2.9
Julio	5.51	81.2	2.8
Agosto	5.42	81.1	2.6
Septiembre	4.95	81.0	2.4
Octubre	4.92	81.1	2.6
Noviembre	4.81	81.2	2.9
Diciembre	4.49	81.2	2.9

Tabla 2 “Radiación solar promedio en el año 2016”

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos de la NASA [21]

Se aclara que estos son los datos promedio por mes durante el año 2016, los cuales pueden obtenerse de la página “*Atmospheric Science Data Center*” con las coordenadas geográficas del lugar (Altitud y longitud) [21].

Vale la pena notar que: suele confundirse a la radiación solar y la irradiancia solar como un misma cosa debido a las unidades de medición que son similares, pero son cosas distintas, la radiación solar se refiere a la cantidad de energía solar por unidad de área en un día solar y se mide en kWh/m²/día, mientras que la irradiancia es la potencia por unidad de área que puede suministrar el Sol a la tierra, la potencia se mide en kW/m². kWh no es lo mismo que kW, la primer unidad es utilizada para medir energía mientras que la segunda se usa para medir potencia que es la energía utilizada en un tiempo determinado [27].

Con los datos de la Tabla 2 se calculará el nivel de irradiancia solar, y como se explicó en el párrafo anterior la potencia y la energía no son lo mismo, la potencia debe de multiplicarse por alguna unidad de tiempo para obtener unidades de energía, la pregunta es ¿Cómo saber por cuánto tiempo se debe de multiplicar a la radiación solar para obtener irradiancia?, La respuesta a esto, son las llamadas horas solar pico que equivalen a un día solar ya que un día solar no se puede asegurar que dure 12 horas o más, aún que desde que sale aporte el nivel máximo de energía.

El Instituto de Geofísica de la UNAM realizó un estudio para determinar las horas efectivas del sol [13], llamadas horas solar pico (HSP), una hora solar pico equivale a 1 kWh/m². El

Sol comienza a salir entre las 6 y 7 de la mañana, llegando al máximo de radiación a las 12 horas del día, de ahí comienza a bajar el nivel de radiación, la curva se asemeja a una parábola, y para saber la energía total obtenida se debe de hacer una integración para tener el área bajo la curva, para hacer el cálculo más sencillo se hace un rectángulo que se aproxime para cubrir el área total de dicha curva, con un nivel de radiación máximo y las horas que se utilizarán, para la Ciudad de México se determinó que son 4.65 horas efectivas de sol de acuerdo con curva que se muestra en la Figura 4.



Figura 4 “horas solar pico”

Fuente: Obtenida del Depto, de Geofísica [13]

Con esta información y los datos de la Tabla 2 se calcula la irradiación del lugar para cada mes del año, dividiendo el dato de la radiación solar entre las horas solar pico de la región, este dará unidades de kW/m², finalmente se multiplica por 1000 para obtener las unidades de la irradiación del SI (W/m²).

Mes	Radiación solar diaria horizontal [kWh/m ² /día]	Irradiancia solar diaria horizontal [W/m ²]
Enero	4.78	1027.96
Febrero	5.73	1232.26
Marzo	6.55	1408.60
Abril	6.5	1397.85
Mayo	6.24	1341.94
Junio	5.6	1204.30
Julio	5.51	1184.95
Agosto	5.42	1165.59
Septiembre	4.95	1064.52
Octubre	4.92	1058.06
Noviembre	4.81	1034.41
Diciembre	4.49	965.59

Tabla 3 “Niveles de irradiancia solar”

Fuente: Elaboración propia, resultado de los cálculos

6.2.1 Colectores Solares

Una de las tecnologías que aprovechan la energía solar son los colectores solares los cuales captan la energía solar, el funcionamiento básico de estos es tener una superficie para absorber la energía solar e intercambiarla a un fluido de trabajo, el fluido de trabajo puede ser aire, agua, aceites y refrigerantes. El fluido de trabajo recorre una red de tubos soldados o pegados en todo el panel, esta red suele tener algún tipo de recubrimiento o en algunos casos está hecha de materiales para un alto coeficiente de absorción. El recubrimiento más simple puede hacerse con una capa de pintura negra, cuya absorbitividad puede alcanzar un cociente de 0.95 [1].

En el absorbedor se pueden presentarse pérdidas hacia el medio ambiente por radiación y convección, estas pérdidas se deben de tratar de disminuir, así el calor transmitido al fluido de trabajo será el máximo aprovechable [26].

Las aplicaciones de los colectores solares pueden ser muy variadas, los factores a elegir la aplicación dependen de la temperatura objetivo y el tipo de fluido de trabajo que se use. Algunas de sus aplicaciones pueden ser:

- Calentamiento de agua para uso doméstico
- Calefacción para alberca
- Secado de alimentos

- Aplicaciones comerciales e industriales

La temperatura requerida para estas aplicaciones tiene un rango de 25 a 90 °C, por esta razón es importante seleccionar el tipo de colector solar que se requiere para cada aplicación y obtener la temperatura deseada [33].

En el caso de climatización de albercas existen dos tipos de colectores en el mercado, los colectores de polietileno de alta densidad y los colectores de cobre, cada uno tiene sus características pero el fin es el mismo en las secciones siguientes se explica esto al respecto.

6.3.2 Colectores de polietileno de alta densidad

Este tipo de colector solar está conformado por una serie de tubos en paralelo unidos entre sí a dos tubos comunes, uno para la entrada y otro para la salida, la Figura 5 muestra esta distribución de tubos de radio pequeño que terminan en común con una tubería más grande, el objetivo es que el fluido de trabajo pueda abarcar toda la red y alcanzar la misma temperatura además de mantener el caudal con el cual el fluido entra a los colectores [4].



Figura 5 “Estructura básica del colector de polietileno”

Fuente: Imagen obtenida de la red [4]

El fluido ingresa por la parte superior y se utiliza el método de inyección, es decir, hasta que la presión dentro del tubo de mayor diámetro es constante, la misma presión realizará la inyección del fluido en cada uno de los tubos de menor diámetro de acuerdo con el principio de Pascal, el cual dice que la presión aplicada en un fluido será la misma en todas las direcciones posibles dentro del fluido. También puede notarse que existen barras espaciadoras para mantener la misma distancia entre un tubo y otro [4].

Este tipo de colector acostumbra instalarse de manera horizontal, con inclinación 0° a la superficie en la que reposa cubriendo un área de 3.84 m² y una capacidad de 11.7 litros por

cada uno. Para suministrar la presión para toda la red de colectores se sugiere utilizar una bomba hidráulica independiente, ya que el sistema está limitado a pocas horas de operación durante el día, se hace esta recomendación para no sobrecargar a la bomba principal del sistema hidráulico de la alberca [4].

6.3.2.1 Aportación de calor de los colectores de polietileno

El cálculo de calor que puede aportar este tipo de colector se realiza de manera indirecta, primero se debe de determinar la eficiencia de captación y después esa eficiencia se multiplicará por la energía aportada en el día de acuerdo con la zona. La curva de eficiencia y su ecuación respectiva son brindadas por el fabricante, esto se debe a que cada fabricante tiene su propia técnica para la manufactura del colector y por lo tanto realizan sus propias pruebas de laboratorio para determinar la curva de eficiencia de captación del colector [4].

En la Figura 6 se muestra una curva típica para este tipo de colector, y además corresponde al fabricante seleccionado en este caso de estudio, se puede apreciar en la curva que ningún tipo de colector alcanzará una eficiencia del cien por ciento. También de la curva puede obtenerse un modelo matemático que permite determinar la eficiencia teórica de captación.

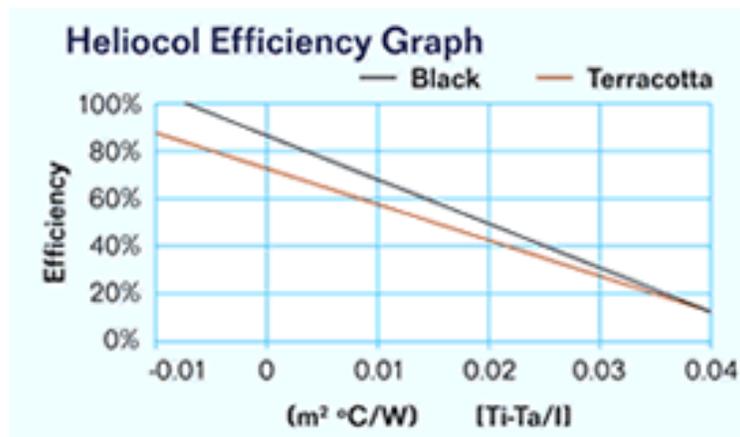


Figura 6 “Curva de eficiencia”

Fuente: Imagen obtenida de la red [4]

La Ecuación 3 está dado por el fabricante y es con el cual se generó esta curva, usando las temperaturas de medio ambiente mostradas en la Tabla 4 y haciendo la diferencia de temperatura con respecto a la temperatura objetivo de 28°C, se determinará la eficiencia de captación promedio para cada mes del año.

$$\eta = 0.828 - \frac{18.52(T_i - T_a)}{I} \quad (3)$$

Dónde:

- η es la eficiencia del colector [%]
- T_i es la temperatura objetivo [28°C]
- T_a es la temperatura del ambiente [°C]
- I es la irradiancia solar $\left[\frac{Watt}{m^2}\right]$

Con el modelo matemático anterior (Ecuación 3) y los datos de temperatura de la Tabla 1, y los datos contenidos en la Tabla 3 se realiza el cálculo de la eficiencia mínima, media y máxima. Los resultados obtenidos al usar la Ecuación 3 con estas variables se muestran en la Tabla 4.

Mes	Delta T Min	Delta T Med	Delta T Max	Eff % min	Eff% media	Eff %max
Enero	20.5	13.9	7.3	45.87%	57.76%	69.65%
Febrero	19.9	12.2	4.5	52.89%	64.46%	76.04%
Marzo	17.2	10.6	3.9	60.19%	68.86%	77.67%
Abril	15.1	7.9	0.8	62.79%	72.33%	81.74%
Mayo	13.9	7.1	0.2	63.62%	73.00%	82.52%
Junio	14.7	9.1	3.6	60.19%	68.81%	77.26%
Julio	14.9	9.2	3.5	59.51%	68.42%	77.33%
Agosto	14.4	8.8	3.2	59.92%	68.82%	77.72%
Septiembre	14.3	9.1	3.9	57.92%	66.97%	76.01%
Octubre	15.8	10.1	4.5	55.14%	65.12%	74.92%
Noviembre	18	12.3	6.7	50.57%	60.78%	70.80%
Diciembre	18.1	11.4	4.7	48.08%	60.93%	73.79%

Tabla 4 “eficiencia del colector de polietileno”

Fuente: Elaboración propia resultado de los cálculos

Como puede observarse en la Tabla 4 la máxima eficiencia se encuentra en los meses de Abril y Mayo, respectivamente, esta eficiencia llega a obtenerse cuando se alcanza la máxima temperatura del día, por lo tanto hace que la diferencia entre temperaturas sea mínima.

Finalmente para determinar el calor aportado por cada colector se utilizan estos datos de eficiencia junto con la radiación solar, la radiación solar no está en unidades del sistema internacional por tanto debe hacerse la conversión de unidades, la radiación se encuentra en kWh lo cual equivale a 3600 kJ [1].

Con los datos de radiación mostrados en la Tabla 3 y las unidades correspondientes se deben multiplicar por la eficiencia y por el área de captación que tiene cada colector, cada

colector de este tipo tiene un área efectiva de 3.85 m², la Tabla 5 se muestran los resultados de la conversión y del calor captado por cada colector.

Mes	Radiación solar diaria [kJ/m ²]	Energía por cada colector [kJ]	Energía con mínima eficiencia [kJ]	Energía con eficiencia media[kJ]	Energía con máxima eficiencia [kJ]
Enero	17208	66078.72	30308.03	38165.30	46022.56
Febrero	20628	79211.52	34950.13	42597.14	50244.15
Marzo	23580	90547.2	39770.01	45504.02	51324.90
Abril	23400	89856	41493.55	47796.95	54012.80
Mayo	22464	86261.76	42037.08	48238.34	54530.79
Junio	20160	77414.4	39775.44	45466.01	51054.96
Julio	19836	76170.24	39324.89	45211.69	51098.48
Agosto	19512	74926.08	39594.33	45473.88	51353.44
Septiembre	17820	68428.8	38273.76	44251.73	50229.70
Octubre	17712	68014.08	36438.59	43031.32	49508.39
Noviembre	17316	66493.44	33417.92	40161.42	46786.61
Diciembre	16164	62069.76	31773.48	40264.97	48756.46

Tabla 5 “Calor absorbido por cada colector”

Fuente: Elaboración propia resultado de los cálculos

La Norma ambiental NADF-008-AMBT-2005 establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en albercas, en el Apartado 5 “Especificaciones generales” Punto 5.3 la capacidad mínima de operación del sistema de calentamiento de agua por medio del aprovechamiento de la energía solar deberá ser tal, que provea al menos 30% del consumo energético anual por utilización de agua caliente para cada establecimiento. [31]

Sin embargo, el cumplimiento de esta norma se puede ver afectado debido a el área disponible de cada establecimiento para instalar los colectores solares, es decir, si no se tiene la suficiente área disponible para la instalación de colectores como mínimo para cumplir con la demanda energética es difícil que se llegué a 30% de aportación energética anual para el calentamiento de agua de alberca.

En el presente caso de estudio, el área disponible del centro deportivo alcanza para 23 colectores solares de este tipo, es decir, se tiene una superficie aproximada para la instalación de 89 m², de acuerdo con los cálculos con base a la curva del fabricante cada colector puede aportar en condiciones mínimas de diseño 30,308 kJ/día que corresponden al mes de enero, y por tanto 23 colectores aportarán 697,085 kJ/día. Debido a que el sistema de calentamiento requiere aportar 3,136,215 kJ/día, los 23 colectores aportan 32.2% de la energía total promedio durante el año.

La Tabla 6 muestra el porcentaje de aportación energética durante cada mes del año en baja, media y alta temperatura ambiente, además con estos datos de aportación se determinó que la aportación promedio anual es del 32.2% con esta cantidad de colectores.

Mes	Min	Med	Max
Enero	22.2%	28.0%	33.8%
Febrero	25.6%	31.2%	36.8%
Marzo	29.2%	33.4%	37.6%
Abril	30.4%	35.1%	39.6%
Mayo	30.8%	35.4%	40.0%
Junio	29.2%	33.3%	37.4%
Julio	28.8%	33.2%	37.5%
Agosto	29.0%	33.3%	37.7%
Septiembre	28.1%	32.5%	36.8%
Octubre	26.7%	31.6%	36.3%
Noviembre	24.5%	29.5%	34.3%
Diciembre	23.3%	29.5%	35.8%

Tabla 6 “porcentaje de aportación”

Fuente: Elaboración propia resultado de los cálculos

Por lo que el diseño cumple con lo estipulado en la norma NADF-008-AMBT-2005 respecto al aprovechamiento de la energía solar para climatización de alberca(s) y/o fosa(s) de clavados

6.3.3 Colectores solares de cobre

Los colectores de cobre son muy similares a los colectores de polietileno en funcionamiento cuentan con una red de tubos en paralelo unidos a un tubo común, a diferencia de los anteriores, estos se encuentran cubiertos, cada colector está confinado en una caja de poliéster reforzada con un vidrio templado que funciona como tapa, este vidrio recibe la radiación solar y la distribuye para calentar los tubos. La estructura básica de este tipo de colector se muestra en la Figura 7, se aprecia que es una estructura más compleja a los colectores anteriores, además de que el área útil (1.95 m²) [22] y por tanto es aproximadamente la mitad del tamaño anterior y su capacidad es de 1.55 litros. Para cubrir la misma área con estos colectores se deberán utilizar aproximadamente el doble de colectores respecto a la cantidad anterior de 23, la capacidad en litros es un poco mayor al 10% con los colectores de polietileno.

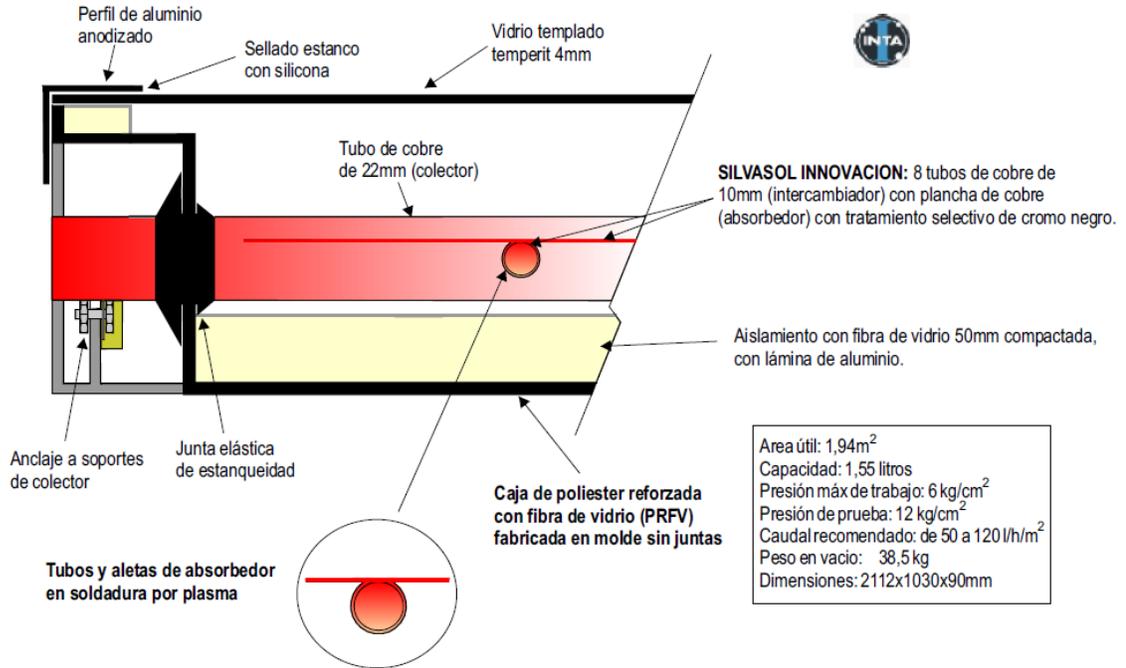


Figura 7 “Estructura de los colectores de cobre”

Fuente: Imagen obtenida del catálogo de colectores [22]

6.3.3.1 Cálculo de calor en colectores de cobre

En el presente análisis se calculó la opción de colectores de cobre y el procedimiento para calcular el calor aportado por este tipo de colector es el mismo que el anterior, y al igual que en el caso anterior se utiliza la curva de eficiencia dada por el fabricante, la Figura 8 es la curva de eficiencia del colector propuesto además se muestra el modelo matemático para obtener la eficiencia.



Figura 8 “Curva de eficiencia”

Fuente: Imagen obtenida del catálogo de colectores [22]

Con la Ecuación 4 dada por el fabricante para este tipo de colector se determinó la eficiencia, en la imagen de la curva se puede apreciar que es diferente a la curva de los colectores anteriores, esta curva tiene una máxima eficiencia del 70%, mientras que la anterior tenía poco más del 80% de eficiencia, como se mencionó, cada fabricante es diferente por ello es indispensable contar con esta curva ya que es de mucha importancia para dimensionar el sistema de colectores solares para calentamiento de agua.

$$\eta = 0.68 - 4.5 \left(\frac{T_i - T_a}{I} \right) \quad (4)$$

Dónde:

- η es la eficiencia del colector [%]
- T_i es la temperatura objetivo [28°C]
- T_a es la temperatura del ambiente [°C]
- I es la irradiancia solar $\left[\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \right]$

Con este modelo se obtuvieron los siguientes resultados de eficiencia usando la misma metodología que antes, los resultados se presentan en la Tabla 7

Mes	Delta T Min	Delta T Med	Delta T Max	Eff % min	Eff % media	Eff %max
Enero	20.5	13.9	7.3	59.03%	61.92%	64.80%
Febrero	19.9	12.2	4.5	60.73%	63.54%	66.36%
Marzo	17.2	10.6	3.9	62.51%	64.61%	66.75%
Abril	15.1	7.9	0.8	63.14%	65.46%	67.74%
Mayo	13.9	7.1	0.2	63.34%	65.62%	67.93%
Junio	14.7	9.1	3.6	62.51%	64.60%	66.65%
Julio	14.9	9.2	3.5	62.34%	64.51%	66.67%
Agosto	14.4	8.8	3.2	62.44%	64.60%	66.76%
Septiembre	14.3	9.1	3.9	61.96%	64.15%	66.35%
Octubre	15.8	10.1	4.5	61.28%	63.70%	66.09%
Noviembre	18	12.3	6.7	60.17%	62.65%	65.09%
Diciembre	18.1	11.4	4.7	59.56%	62.69%	65.81%

Tabla 7 “Eficiencia de los colectores solares”

Fuente: Elaboración propia resultado de los cálculos

Con los resultados obtenidos se observa que estos colectores son más efectivos con las temperaturas mínimas a comparación de los anteriores, la eficiencia más baja de los colectores anteriores fue apenas del 45% y con esta tecnología se observa que la eficiencia más baja es de casi el 60%, con lo que tienen un mejor rendimiento en los climas más fríos.

Revisando el comportamiento de aportación de estos colectores en los diferentes meses del año, se obtuvo la Tabla 8, la cual indica este porcentaje de aportación para los colectores de cobre

Mes	Min	Med	Max
Enero	25.3%	26.5%	27.7%
Febrero	26.0%	27.2%	28.4%
Marzo	26.8%	27.7%	28.6%
Abril	27.0%	28.0%	29.0%
Mayo	27.1%	28.1%	29.1%
Junio	26.8%	27.6%	28.5%
Julio	26.7%	27.6%	28.5%
Agosto	26.7%	27.6%	28.6%
Septiembre	26.5%	27.5%	28.4%
Octubre	26.2%	27.3%	28.3%
Noviembre	25.8%	26.8%	27.9%
Diciembre	25.5%	26.8%	28.2%

Tabla 8 "Porcentaje de aportación colectores de cobre"

Fuente: Elaboración propia resultado de los cálculos

Realizando la comparativa de aportación energética anual, este tipo de colector tiene en promedio el 27.4% de aportación anual con 40 colectores instalados en la misma área disponible y para lograr la aportación anual del 30% se necesitan por lo menos 46 colectores instalados.

Con estos colectores no se logra el objetivo de cumplir con la norma NADF-008-AMBT-2005 en el espacio disponible para su instalación.

6.3.4 Configuraciones hidráulicas para colectores

Otra de las variantes a considerar en el diseño del sistema es el tipo de arreglo. La manera de instalar los colectores solares hace referencia a los circuitos eléctricos con modos de conexión en paralelo, serie o mixto entre elementos, cada una de las configuraciones tiene sus propias ventajas y desventajas entre sí. En las siguientes secciones se explica como la conexión influye en el resultado en cuanto a la temperatura que se alcanza.

6.3.4.1 Conexión en paralelo

En la configuración en paralelo [23] la temperatura del fluido a la entrada del arreglo es la misma en todos los puntos de conexión entre paneles, también ocurre lo mismo con la temperatura de salida, como si el trabajo de calentamiento sólo lo hiciera un solo colector

solar, en la Figura 9 se muestra como los puntos de entrada y salida coinciden. Este tipo de configuración comúnmente es usada en sistemas de calentamiento de baja temperatura. El caudal se subdivide en cada colector conectado, pero la suma de todos los caudales es igual al caudal original cuando terminan en el mismo punto.

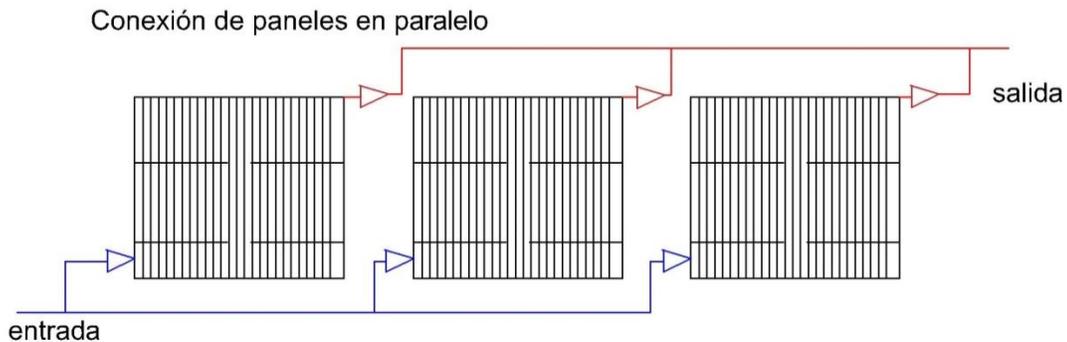


Figura 9 “Configuración en paralelo de los colectores solares”

Fuente: Elaboración propia

6.3.4.2 Conexión en serie

En la conexión en serie [23], la salida de un colector es la entrada del siguiente, esto se repite dependiendo del número de colectores conectados entre sí. En esta conexión la temperatura de salida de un colector es la temperatura de entrada al siguiente, por lo que se pueden obtener temperaturas más altas.

Se presenta un inconveniente en el rendimiento de los colectores, el cual va disminuyendo entre más colectores se conecten en serie, por lo tanto esta tipología de conexión se recomienda de 6 a 10 m² de colectores conectados en serie dependiendo de la zona climática.

El comportamiento del caudal no disminuye en este tipo de conexión, el caudal es el mismo a la entrada y salida de cada colector, y este caudal es igual al del sistema principal de la alberca. En la Figura 10 se muestra este tipo de conexión en serie de los colectores solares, se eligió un color neutral para la salida de cada colector, pero indica que la temperatura que ya ganó el colector anterior es la que entra al siguiente.

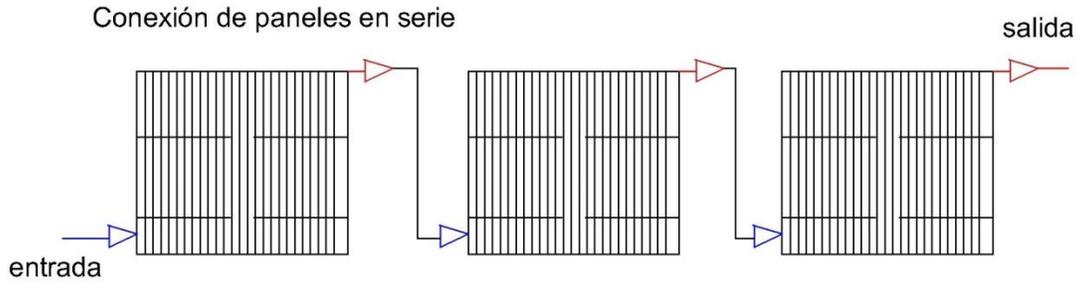


Figura 10 “Configuración en serie de los colectores solares”

Fuente: Elaboración propia

6.3.4.3 Conexión mixta

Este tipo de conexión mixta [23] combina las propiedades de las anteriores, es la más utilizada ya que da más equilibrio entre temperatura y caudal, las propiedades de la conexión en paralelo al subdividir el flujo pueden hacer que se tenga el flujo nominal en cada colector y al combinarlo con la configuración en serie se puede elevar la temperatura en la Figura 11 se muestra un ejemplo de este tipo de conexión.

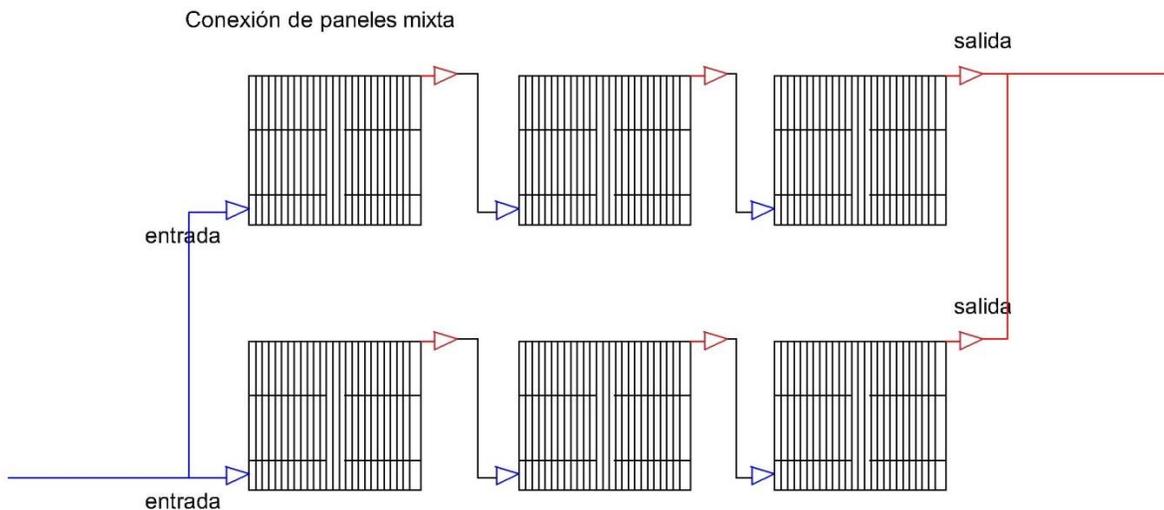


Figura 11 “Configuración mixta de los colectores solares”

Fuente: Elaboración propia

Por esta razón la configuración mixta es la que se recomienda para este proyecto por lo mencionado anteriormente, se harán arreglos de no más de 4 colectores en serie, esto es debido a la pérdida de presión en esta configuración, y las subdivisiones necesarias en

paralelo para operar con el caudal nominal de cada colector. De esta manera se asegura el máximo aprovechamiento del colector referente a su captación de energía.

Los colectores utilizados para el diseño son los de polietileno en una configuración mixta, ya que estos logran cumplir el objetivo de la norma NADF-008-AMBT-2005, con 32.2% de aportación de la energía anual requerida.

6.4 Generadores de agua caliente

De las tecnologías analizadas se revisó el principio de funcionamiento de los generadores. Un generador de agua caliente es muy similar a un generador de vapor (caldera) sólo que el agua no cambia de fase a diferencia de la caldera donde el agua se transforma en vapor y por lo tanto se requiere más energía y más cuidados para el buen funcionamiento del sistema.

La bomba que alimentará al generador de agua caliente puede ser una bomba centrífuga ya que el agua no requiere de tratamiento previo para ser introducida al sistema, el tratamiento de agua es para eliminar las sales que pueda tener así como otro tipo de residuos sólidos, pero esto es importante solamente para la caldera, ya que el agua sufre un cambio de fase, y por tanto, si no se realiza el tratamiento previo se generan los residuos del vapor que son las sales minerales que pueden incrustarse en el sistema interno de la caldera haciendo que la transferencia de calor sea menos eficiente y como consecuencia invertir más energía para su calentamiento.

La presión del sistema de calentamiento de agua será la misma que pueda suministrar la bomba, cómo el agua recorre toda la red hidráulica es posible que contenga residuos sólidos, es importante poner un filtro de limpieza antes de introducirla al generador de agua caliente y de preferencia que la bomba centrífuga tenga una canastilla para atrapar estos residuos sólidos además de tener un válvula para drenar el sistema. Con los residuos sólidos puede ocurrir un caso similar en la caldera con las sales minerales.

6.4.1 Funcionamiento general de los generadores de agua caliente

El agua fría es introducida al interior del generador con la misma presión suministrada por la bomba, el agua fluye por una sección espiral monotubular como se muestra en la Figura 12 circulando en sentido contrario a los gases de combustión, el agua es mandada a un tanque de almacenamiento para después ser distribuida al sistema para los servicios requeridos.

Para una correcta operación la unidad de calentamiento debe estar completamente llena, esto puede lograrse con la bomba centrífuga la cual debe mantener un flujo y presión constante.

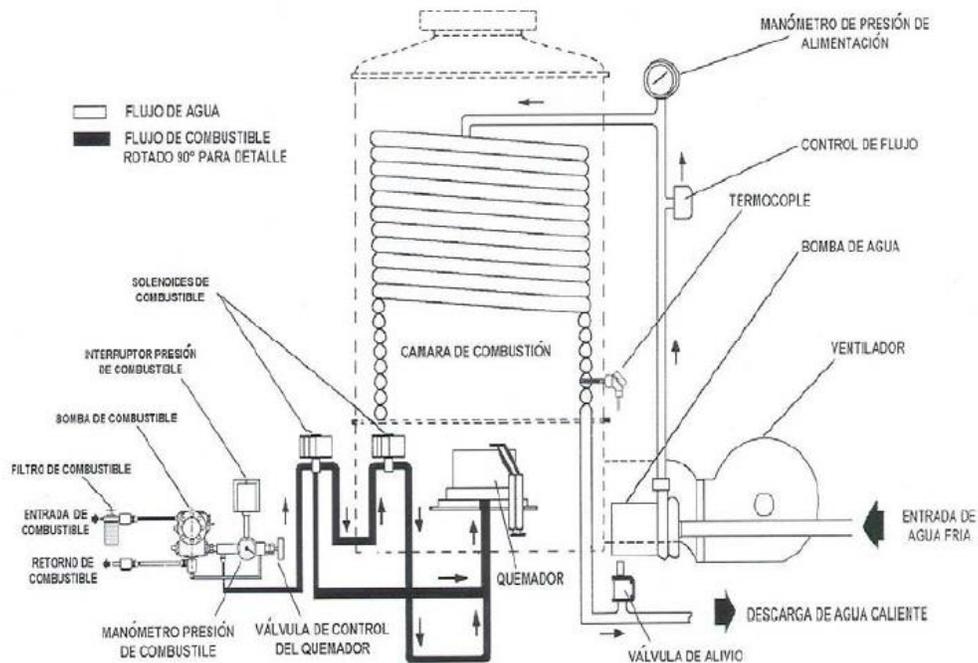


Figura 12 “Partes de un generador de agua caliente”

Fuente: Obtenida del catálogo del proveedor Clayton [7]

El calor que se aporta al fluido de trabajo es directamente el calor de la combustión y los gases de escape, la combustión es un proceso químico donde un combustible libera energía en forma de calor, un combustible se define como todo aquel elemento que pueda quemarse, los combustibles que mejor calidad son los que se encuentran en esta gaseoso, la calidad va desde los residuos que dejan al quemarse y el nivel de energía que puedan liberar [7].

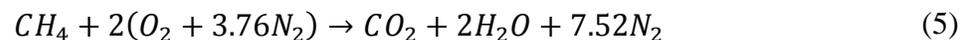
El proceso de combustión [1] es una reacción química en la cual se oxida el combustible y libera energía como producto de esta oxidación, el agente oxidante utilizado para este proceso es el aire porque es gratuito y puede obtenerse fácilmente, el aire principalmente está compuesto por nitrógeno y oxígeno, con un contenido de 78.1% y 20.9% respectivamente, el nitrógeno en el proceso de combustión actúa como un gas inerte, mientras que el oxígeno es el verdadero agente oxidante, la presencia del nitrógeno influye en el proceso de combustión, esto se debe a que entra a la cámara de combustión a temperaturas bajas y sale con un incremento en su temperatura, absorbiendo una gran porción del calor liberado por la combustión.

Sin embargo a temperaturas muy altas como las que se alcanzan en el proceso de combustión una pequeña porción de nitrógeno puede reaccionar con el oxígeno formando gases peligrosos como el óxido nítrico y sus variantes conocidas como NO_x [1].

Un proceso de combustión se considera completo cuando todo el carbón contenido en el combustible se quema convirtiéndose en CO_2 y todo el hidrogeno se transforma en H_2O (agua), si existe la presencia de azufre este se transformará en SO_2 (dióxido de azufre), es difícil tener las condiciones para que se lleve a cabo una combustión completa. Cuando la combustión es incompleta se generan subproductos como partículas del combustible que no se quemaron, así como partículas tales como son: C (carbono), H_2 (Di hidrógeno), CO (monóxido de carbono), que son sustancias tóxicas para el ser humano [1].

Una de las causas que provocan una combustión incompleta es el manejo de la cantidad de oxígeno, este juega un papel muy importante, tener un exceso o una falta de este elemento es la causa de que la combustión no se lleve correctamente, la cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa recibe el nombre de aire estequiométrico para calcular la cantidad de aire necesaria debe usarse la ecuación química que involucre al combustible y al aire como reactivos y los productos de una combustión completa, se balancea la ecuación y así se determinan la cantidad de aire mínima para una combustión completa [1].

La Ecuación 5 es un ejemplo de una ecuación química balanceada que involucra la metano (CH_4) como combustible y al aire ($\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$) como agente oxidante por su contenido de oxígeno, existe la relación entre el oxígeno y el nitrógeno en el aire que dice que por cada molécula de oxígeno se tienen 3.76 moléculas de nitrógeno [1], esto es el resultado del cociente de los porcentajes de cada elemento en el aire.



La ecuación muestra un resultado que por cada molécula de combustible utilizado se deben de emplear 2 moléculas de aire, así no se tendrán gases tóxicos como producto de combustión incompleta. La relación aire-combustible (AC) indica cuantos kilogramos de aire se deben utilizar por cada kilogramo, se obtiene una vez balanceada la ecuación con el número molar del combustible y el aire relacionándose como se muestra en la ecuación 6 se determina la cantidad estequiométrica de aire mínimo para la combustión [1].

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (6)$$

Para este ejemplo la cantidad de aire requerida es la siguiente, el O_2 tiene una masa molar de 16 kg/kmol, el N_2 es 14 kg/kmol, el combustible tiene carbono e hidrogeno con una

masa molecular de 16 kg/kmol y 1 kg/kmol respectivamente se sustituye en el modelo matemático x quedando como resultado:

$$AC = \frac{(NM)_{aire}}{(NM)_C + (NM)_H} = \frac{(2 \times 4.76 \text{ kmol}) \left(30 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)}{\left(1 \text{ kmol} \times \frac{12 \text{ kg}}{\text{kmol}} \right) + \left(4 \text{ kmol} \times \frac{1 \text{ kg}}{\text{kmol}} \right)} = 17.85 \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kg}_{combustible}}$$

En el modelo matemático se utiliza el balance antes realizado, el primer 2 en la masa de aire son las moléculas obtenidas, el 4.76 es la suma molar de 1 kmol de O₂ y 3.76 kmol de N₂. El resultado es que por cada kilogramo quemado de combustible se necesitan 17.85 kilogramos de aire. Cualquier cantidad que exceda este número se conoce como exceso de aire.

Se puede monitorear el proceso de combustión con equipos destinados a este propósito, en el mercado existen analizadores de combustión los cuales pueden brindar información del exceso de aire, la eficiencia de combustión, el porcentaje de oxígeno presente en la combustión entre otros parámetros.

Los combustibles que pueden ocuparse para un mejor aprovechamiento de la energía en el generador de agua caliente son: el gas natural, el gas licuado de petróleo (L.P.) y el diésel.

El gas natural es producido en pozos de gas o pozos petroleros, principalmente está compuesto por metano pero también contiene pequeñas cantidades de etano, propano, hidrogeno, helio, dióxido de carbono, nitrógeno, sulfato de hidrogeno y vapor de agua. Por cada metro cúbico quemado de gas natural 2.86 kg de CO₂ [24] (dióxido de carbono) como emisiones al medio ambiente.

El Gas L.P. es un subproducto del procesamiento de refinación del petróleo crudo, principalmente consiste en propano con pequeñas cantidades de butano, propileno, y butileno. El poder calorífico del gas L.P. es en promedio 46.15 MJ por cada kilogramo, al quemar esta cantidad se obtiene una emisión de 3.00 kg de CO₂ [24].

El diésel por su parte es uno de los productos de refinar el petróleo, este tiene un poder calorífico de 42.83 MJ/kg, con emisiones de 3.143 kg de CO₂ [24].

Para efectos de climatización de una alberca es suficiente con un generador de agua caliente, ya que no es de interés el cambio de fase del agua, por lo que una caldera está muy por encima de las necesidades de este caso de estudio de sistema híbrido.

Para el diseño se eligió un generador de agua caliente con potencia de 30 cc (caballos caldera), aportando 253,071 kcal/h, lo que equivale a 1,059,355 kJ/h, compensando la pérdida de 2.5°C diarios en 3 horas, un calentador de menor potencia no satisface las

necesidades en meses fríos, tardando hasta 7 horas en compensar la misma cantidad de energía, y uno de mayor capacidad sería sobredimensionar el equipo. [28]

6.5 Bombas de calor

En el presente caso también se analizó la tecnología llamada bomba de calor, la cual tiene particularidades en cuanto a su principio de operación, esto es, el calor fluye de una fuente de alta temperatura a una fuente de baja temperatura, para esto no se necesita ningún tipo tecnología o proceso, un ejemplo de esto se observa en una taza con café caliente a una temperatura aproximada de 40°C, mientras que el medio ambiente está a una temperatura de 25°C, el calor que tiene el café se transferirá al medio ambiente, bajando la temperatura inicial que tenía, hasta el punto de tener la misma temperatura del medio. Pensar en un proceso inverso es posible, volver a calentar el café, pero esto no sucede de manera natural, hay que invertir energía ya sea poniendo el café en un horno o calentando directo en la estufa hasta alcanzar su temperatura inicial de 40°C.[1]

Esto es un ejemplo de que el proceso inverso de transferencia de calor se puede realizar utilizando algún equipo o método auxiliar para lograrlo, un ejemplo de los equipos que tienen la capacidad de realizar este proceso inverso son los refrigeradores o las bombas de calor. Un refrigerador es aquel que absorbe el calor de su interior para mandarlo al medio ambiente, el interior del refrigerador se encuentra a una temperatura de 3 o 4°C y el medio ambiente a 25°C, se percibe claramente que el proceso de transferencia de calor es de manera inversa. [1]

Las bombas de calor son un tipo de tecnología que opera de manera similar a la de un refrigerador, pero con un objetivo inverso. El objetivo de un refrigerador es mantener un ambiente con baja temperatura, mientras que el objetivo de una bomba de calor es mantener un ambiente con alta temperatura, el calor es absorbido de una fuente de baja temperatura y enviado por ejemplo al interior de una casa para mantenerla con una temperatura mayor a la del ambiente [9].

6.5.1 Funcionamiento de una bomba de calor

La manera en que funciona una bomba de calor o un refrigerador es por medio de un ciclo termodinámico llamado ciclo invertido de Carnot o ciclo de refrigeración, en este proceso se utiliza un fluido de trabajo llamado refrigerante que pasará por varias etapas y cambios de fase durante el ciclo. Las etapas van de la siguiente manera, compresión (1), condensación (2), expansión (3) y evaporación (4).

En el estado 1 el vapor entra al compresor donde se aumenta la presión y la temperatura, la presión debe de ser la necesaria para entrar al condensador.

En el estado 2 el refrigerante entra como vapor sobrecalentado al condensador, el condensador retira el calor excedente del refrigerante para que al final de esta etapa el refrigerante salga como líquido.

En el estado 3 el líquido que sale del condensador pasa por una válvula de expansión o un tubo capilar, el objetivo de esta etapa es disminuir la presión y la temperatura del refrigerante, la presión debe ser baja para entrar a la siguiente etapa que es la etapa de evaporación.

En el estado 4 el evaporador absorbe el calor del espacio de baja temperatura para evaporar al refrigerante y este salga como vapor saturado entrando nuevamente al compresor y repitiendo el ciclo.

La Figura 12 ilustra los pasos descritos en un diagrama T-s (temperatura entropía)

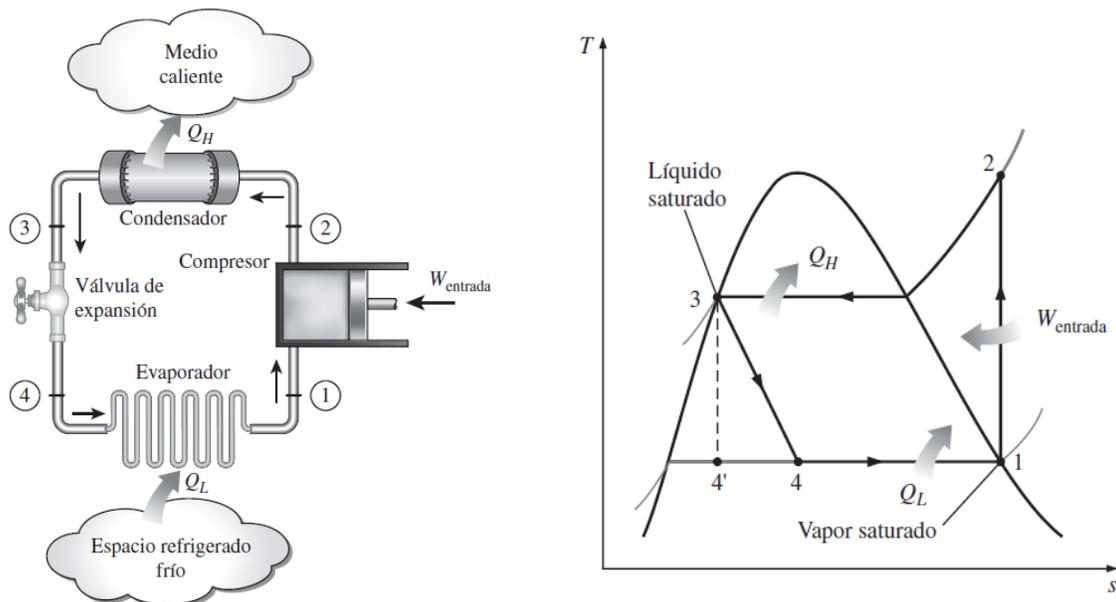


Figura 12 “Ciclo de Carnot invertido”

Fuente: Obtenida del libro de termodinámica, Yunus A. Cengel [1]

El desempeño de los refrigeradores y bombas de calor se mide con el coeficiente de operación (COP) el cuál relaciona el efecto de enfriamiento o de calentamiento entre el trabajo de entrada al compresor, para la bombas de calor el COP es mayor a 1 puede caer por debajo de 1 si la temperatura del medio ambiente es muy baja, si llega a ser menor a 1 la bomba de calor funcionará como un sistema de calentamiento directo, como una resistencia eléctrica que suministra la misma cantidad de calor que consume.

6.6 Sistema hidráulico

Un elemento clave que influye directamente en cualquier sistema de calentamiento es el sistema hidráulico, el cual es el más importante dentro de todo este conjunto de sistemas, por el circula el agua fría y caliente, se asimila como el sistema cardiovascular del cuerpo humano, que utiliza una bomba (corazón) para suministrar energía al fluido y este pueda recorrer toda la red de tuberías (venas y arterias) para llegar a todos los sub sistemas que conforman el sistema principal además de tener una presión adecuada.

Para un sistema hidráulico de agua sanitaria por lo general se usa una bomba centrífuga y una red de tuberías de PVC (policloruro de vinilo), aunque también pueden ser otros materiales de acuerdo con la norma NOM-230-SSA1-2002, “Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. [29]

Otro factor a cuidar es la calidad de agua para actividad humana en albercas, los niveles de químicos y materia orgánica permisibles en el agua usada para actividades de natación se encuentran en la norma NOM-245-SSA1-2010, “Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas.” [30]

La Tabla 9 muestra los niveles permisibles de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en el agua usada para albercas. Algunas de las nomenclaturas usadas en la tabla son las siguientes: [30]

- **DPD.-** N,N-dietil-p-difenildiamina.
- **mg/L.-** Miligramos por litro.
- **mL.-** Mililitros.
- **mm.-** Milímetro.
- **NMP.-** Número más probable.
- **ORP.-** Potencial de óxido-reducción.
- **pH.-** Potencial de hidrógeno.
- **ppm.-** Partes por millón.
- **UTN.-** Unidad de turbidez nefelométrica.
- 1 No aplica para aguas termales que por su naturaleza sean opacas.
- 2 Aplica sólo para albercas en que se utilicen compuestos de cloro como desinfectante.
- 3 Aplica sólo para albercas en que se utilice bromo como desinfectante.
- 4 Aplica para albercas con temperatura de agua mayor a 30°C.
- 5 El método de prueba para el análisis de estos microorganismos, se incluye en los apéndices.

Mantener estos niveles es importante para el diseño del sistema hidráulico, ya que se deben de usar filtros y otros aditamentos para el agua, los filtros representan caídas de presión, por esta razón es importante elegir la bomba hidráulica adecuada.

Parámetro	Límite permisible	Método de detección	Frecuencia de medición
pH			
	6.5 a 8.5	Potenciométrico o colorimétrico	Cada 4 horas durante el periodo de operación, iniciando con la apertura de servicio público.
Turbidez (1)			
	5 UTN o penetración de luz mayor a 2 m con disco Secchi	Nefelométrico o visual	Una vez al día a mitad del periodo de operación
Cloro residual libre (2)			
	1.0 a 5.0 mg/L	Colorimétrico con reactivo DPD 1 amperométrico	Cada 4 horas durante el periodo de operación, iniciando con la apertura de servicio al público, para los métodos amperométrico y ORP incluir una medición con DPD al inicio.
	>650 milivolts	ORP	
Cloraminas (2)			
	0.0 a 0.5 mg/L	Colorimétrico con reactivo DPD 3	Semanal
Bromo residual libre (3)			
	2.0 a 6.0 mg/L	Colorimétrico con reactivo DPD 1 o amperométrico	Cada 4 horas durante el periodo de operación, iniciando con la apertura de servicio al público, para los métodos amperométrico y ORP incluir una medición con DPD al inicio.
	>650 milivolts	ORP	
Bromaminas (3)			
	0.0 a 0.5 mg/L	Colorimétrico con reactivo DPD 3	Semanal
Ácido cianúrico o isocianuratos clorados (2)			
Alberca no techada	100.0 mg/L	Turbidimétrico con reactivo para ácido cianúrico o colorimétrico	Semanal
Alberca techada	0.0 mg/L		
Coliformes fecales (5)			
	< 40 NMP/100 mL	Ver, Apéndice Normativo B.	Bimensual, durante la temporada de uso.
Amebas de vida libre (Naegleria spp, Acanthamoeba spp) (4, 5)			
	Ausente	Ver, Apéndice Normativo A	Bimensual, durante la temporada de uso.

Tabla 9 “Parámetros permisibles fisicoquímicos y microbiológicos”

Fuente: Elaboración propia con los datos de la NOM-245-SSA1-2010” [30]

Toda la red hidráulica para el diseño propuesto considera como material idóneo el PVC, además de todos los accesorios a usar como son; codos, coples, T's, difusores, toberas. Se usará una bomba centrífuga además de filtros para limpiar el agua.

6.6.1 Bomba centrífuga

Las bombas hidráulicas son turbomáquinas que suministran energía a un fluido, llamadas así porque están unidas a un eje rotatorio para su funcionamiento. El uso de bombas data de la época antes de cristo en Asia y África (1000 a.c.), Grecia (250 a.c.) por lo que se considera una de las máquinas más antiguas que existen. [2]

Debido que se requiere una fuente para hacer girar el eje rotatorio, generalmente se usa algún tipo de motor, para el caso más práctico se usa el motor eléctrico. Esta combinación se conoce como motobomba. Existen diversas clasificaciones de bomba, como son: bombas de desplazamiento positivo, tienen un contorno móvil que mueve al fluido mediante cambios de volumen. También están las bombas dinámicas las cuales proporcionan cantidad de movimiento al fluido mediante alabes o paletas que giran alrededor de un eje, la bomba centrífuga queda clasificada dentro de las bombas dinámicas. [2]

La bomba centrífuga está constituida por un rotor dentro de una carcasa, donde el fluido entra axialmente a través del ojo en el eje de la carcasa como se muestra en la Figura 13.

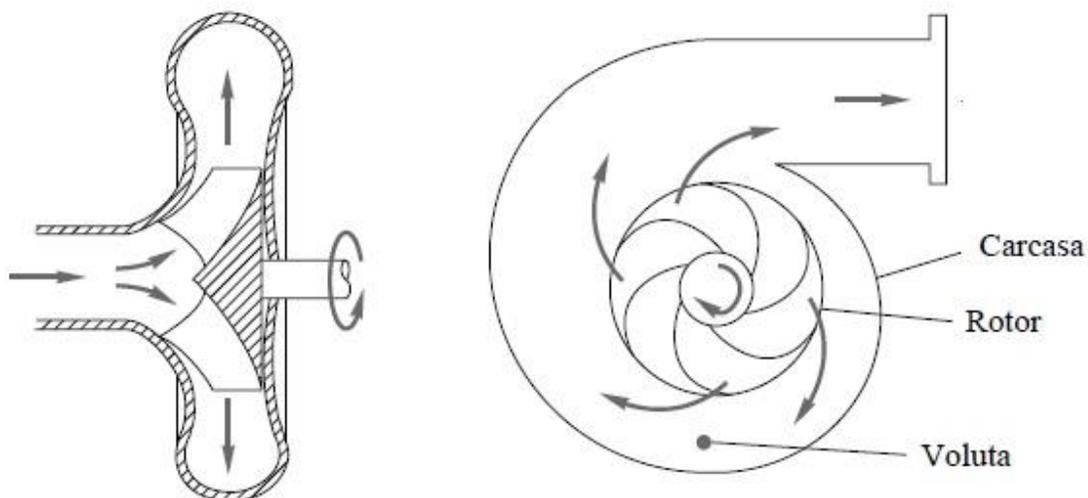


Figura 13 “Bomba centrífuga”

Fuente: Obtenida del libro de Mecánica de Fluidos [2]

6.6.1.1 Elección de la bomba centrífuga

Para la correcta selección de la bomba en el conjunto del diseño se toma en cuenta una condición la cual significa que todo el volumen de agua debe recircular por todo el sistema por lo menos 3 veces al día [11], con esto se asegura que el 95% del agua pasa por el sistema de filtración y cloración para mantener los niveles permisibles de calidad descritos en la NOM-245-SSA1-2010.

Tomando la consideración de la recirculación se calcula el caudal que debe de tener la bomba, el volumen de la piscina es de 300 m^3 lo que significan 300,000 litros de agua, el volumen debe de dividirse entre el tiempo de un ciclo en este caso son 8 horas por lo que da un caudal de 37,500 l/h, la Ecuación 7 [2] es la que se utilizó para el cálculo del caudal.

$$\text{caudal} \left[\frac{l}{h} \right] = \frac{\text{volumen} [l]}{\text{tiempo} [h]} \quad (7)$$

Por factores de diseño no se recomienda que la bomba quede justa para satisfacer la necesidad de la recirculación, de esta forma la bomba trabajaría 24 horas al día, lo que implica una reducción de su vida útil, además de tener altos consumos de energía eléctrica, por estas razones se debe de seleccionar una bomba con mayor capacidad de caudal, para darle un tiempo de descanso durante el día, para esto se seleccionará una bomba que pueda hacer el trabajo de recirculación en 5 horas, lo que da como resultado un caudal de 60,000 l/h, con este caudal el agua total de la piscina puede circular 4.8 veces al día, dejando casi dos recirculaciones libres para que descansa la bomba durante el día.

Con el dato de caudal se busca un catálogo de bombas centrífugas que puedan suministrar dicho caudal, el catálogo consultado dio una bomba que puede manejar un caudal de 72,000 l/h, a una presión de salida 0.8 kg/cm^2 . Con este nuevo caudal el agua puede recircular 6 veces por día que es el doble de la recirculación propuesta por motivos de sanidad.

El siguiente paso es la correcta selección del filtro, en el mercado hay diferentes tipos de filtros, como lo son: filtros de arena, filtros de cartucho, filtros de diatomeas, filtro de nano fibras, entre otros, en la Tabla 10 se muestra una breve descripción del funcionamiento de los diferentes tipos de filtros.

Filtros	Descripción
Arena	Se usan arenas finas para simular una filtración natural
Cartucho	Se utilizan cartuchos de tela, la cual sirve para filtrar los residuos sólidos
Diatomeas	Las diatomeas absorben suciedad, su capacidad de filtración es alrededor de 10 micras.
Nano fibras	Está equipado con una red de nano fibras, puede filtrar partículas entre 5 y 8 micras

Tabla 10 “Diferentes tipos de filtros para piscinas”

Fuente: Elaboración propia con los datos de los diferentes filtros [6]

Los filtros de arena son los más usados, debido a su bajo costo de operación y mantenimiento, los mejores filtros son los de Diatomeas y los de Nano-fibras, por su capacidad de filtración, pero a diferencia de los filtros de arena estos tienen costos muy elevados.

Para calcular el filtro correcto de arena se debe de tomar en cuenta el área de filtración, la cual dependerá del diámetro del filtro, con al área calculada se analizará la velocidad de filtración, ésta velocidad depende del caudal y del área del filtro, la Ecuación 8 [6] muestra cómo se relacionan estas dos variables para determinar el área de filtración.

$$A_{filtración} \left[\frac{m^3}{m^2 h} \right] = \frac{Caudal \left[\frac{m^3}{h} \right]}{\text{Área}_{filtro} [m^2]} \quad (8)$$

Es recomendable manejar una velocidad de filtración por debajo de 50 [m³/m²h] [6] para que se haga una correcta filtración, si se excede esta velocidad podría disminuir la calidad del agua. Existe tamaños definidos para los filtros de arena, la Tabla 11 muestra algunos de los diferentes tamaños, además de realizar el cálculo para determinar el tamaño correcto del filtro usando el caudal nominal de la bomba ya elegida.

Diámetro de filtros [m]	Área de filtrado [m ²]	Velocidad de filtrado [m ³ /m ² h]
0.50	0.39	183.35
0.60	0.47	152.79
0.75	0.59	122.23
0.90	0.71	101.86
1.05	0.82	87.31
1.20	0.94	76.39
1.40	1.10	65.48
1.60	1.26	57.30
1.80	1.41	50.93
2.00	1.57	45.84
2.35	1.85	39.01

Tabla 11 “Selección de tamaño de filtro”

Fuente: Elaboración propia con los datos de los diferentes filtros [6]

Cómo puede observarse, el filtro de 2 metros cumple con el requisito del límite de velocidad de filtración, sin embargo es muy apegado al valor límite de la velocidad, el filtro con un diámetro de 2.35 m es mejor opción, dando una diferencia casi de 10 [m³/m²h], por lo que se elegirá éste tamaño de filtro.

Sistema de cloración

Una vez limpia el agua de materia sólida se realiza el último tratamiento que es la desinfección y el control del pH en la alberca, existen diferentes técnicas para realizar esta labor, las cuales van desde la dosificación manual hasta un control de la dosis totalmente automatizado. Actualmente está dejando de usarse la técnica manual, ya que es muy difícil mantener los parámetros de calidad, aunque inicialmente este método es más económico por representar una inversión casi nula en tecnologías de apoyo, con el tiempo se vuelve costoso ya que las revisiones tienen que ser periódicas durante el día y agregar químicos para mantener la calidad del agua. [6]

La dosificación automática fue la solución en algún tiempo por sus dosis iguales en intervalos de tiempo definidos, sin embargo las variaciones del entorno dentro de la alberca están ligadas con el número de nadadores que usan la alberca, para una piscina de entrenamiento profesional el número de personas que entrenan durante el día es variable haciendo que esté método no sea un opción viable para mantener la condiciones de calidad. [6]

Añadir un control automático mediante sondas para medir la cantidad de cloro y pH para determinar el nivel de dosis, es el sistema ideal para cualquier alberca por su precisión en tiempo real, cambia la dosis dependiendo del comportamiento del entorno dentro de la alberca, es una excelente solución para mantener una alta calidad del agua, sin embargo este tipo de tecnología es muy costosa. [6]

Por esta razón se elige el método por cloración salina, el cual consiste en ionizar partículas de sal común para obtener el cloro, la molécula de la sal común es NaCl (cloruro de sodio), al ionizar las partículas de sal estas se separan en cloro y sodio, la ionización se hace mediante electrodos de cobre y plata, estos metales tienen función anti-algas y desinfectante, además de tener una función floculante aumentando el rendimiento del filtro dando mayor claridad al agua. Este método disminuye la inversión en químicos para el tratamiento del agua [6]. En la Figura 14 se muestra un esquema del funcionamiento de este sistema de cloración.



Figura 14 "Sistema de cloración"

Fuente: Imagen obtenida del proveedor AstralPool [6]

Selección del tamaño de la tubería

Para este punto, ya se cuenta con un caudal definido y debe considerarse la velocidad que el fluido tendrá dentro de la tubería, la Ecuación 9 [6] muestra la forma de calcular el caudal teniendo en consideración el área transversal de la tubería, si es una tubería circular, dicha

área se calcula con el diámetro de la tubería, la velocidad dentro de la tubería no debe ser superior al rango mostrado en la Tabla 12.

$$Caudal \left[\frac{m^3}{s} \right] = Velocidad \left[\frac{m}{s} \right] * Área[m^2] \quad (9)$$

Este rango es recomendado para disminuir los efectos mecánicos dentro de la tubería, al tener una velocidad excesiva se genera fricción con las paredes internas desgastando el material con la probabilidad de tener desprendimientos y comprometiendo la calidad del agua, la velocidad recomendada en la línea de conducción es de 1.2 a 2.4 [m/s], el diámetro de la tubería a elegir deberá estar en este rango de velocidad para no generar efectos mecánicos.

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos viscosos poco	Flujo por gravedad	0.5-1	0.15-0-30
	Entrada de bomba	1-3	0.3-0.9
	Salida de bomba	4-10	1-2.3
	Línea de conducción	4-8	1.2-2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2-0-5	0.06-0.015
	Salida de bomba	0.5-2	0.5-0.6
Vapor de Agua		30-50	9-15
Aire o Gas		30-100	9-30

Tabla 12 “Velocidades en tuberías”

Fuente: Elaboración propia con los datos de mecánica de fluidos [2]

El tamaño de las tuberías está normalizado, los diámetros de una tubería de acero van desde 1/8 de pulgada hasta las 30 pulgadas, las tuberías de PVC tienen diámetros similares a los del acero, esto se debe a que en sistemas de transporte de agua las partes están siendo reemplazadas por PVC al tener un menor costo. Despejando la velocidad de la Ecuación 9 y con el caudal de 72 m³/h, se obtienen los resultados de la Tabla 13 que muestra la velocidad dependiendo del diámetro de la tubería, la tubería de 4 o 5 pulgadas ya entran en el rango de velocidad permisibles.

Diámetro de tubería [Pulgada]	Velocidad [m/s]
1	32.89
1.5	14.62
2	8.22
2.5	5.26
3	3.65
4	2.06
5	1.32

Tabla 13 “Velocidad en la tubería”

Fuente: Elaboración propia con datos de diámetros comerciales

Adicionalmente se debe agregar las pérdidas por accesorios en la red de tubería, cada accesorio representa una pequeña disminución en la presión dentro de la tubería, esta disminución puede ser imperceptible si se trata de pocos accesorios, dependiendo de la complejidad de la red o del mismo espacio para colocar la tubería, la cantidad de accesorios puede variar, los accesorios son, a saber, válvulas, codos, bridas, coladeras, efecto de salida entre otros, la Tabla 14 muestra el factor K adimensional por cada accesorio, estas pérdidas se deben de considerar dentro del cálculo de la carga que tendrá el sistema de bombeo.

Accesorios	K
codos 90°	0.2
Válvulas	0.14
Válvulas Check	0.16
Coladera	1
efecto de salida	0.5
Difusor	0.04
Bridas	0.003
Manómetro	0.001

Tabla 14 “Factor K para accesorios hidráulicos”

Fuente: Elaboración propia con los datos del factor K [2]

Para el cálculo de la carga del sistema se usa una ecuación simplificada para las turbomáquinas que es la Ecuación (10) [2]

$$H_B = A + BQ^2 \quad (10)$$

Cómo se mencionó la ecuación (10) es una ecuación simplificada, las Ecuaciones (11) y (12) muestran como están definidas A y B respectivamente.

$$A = \text{altura de bombeo vertical [m]} \quad (11)$$

$$B = h + h_s + h_m \quad (12)$$

Dónde

- h son las pérdidas generales del sistema
- h_s son las pérdidas por flujo
- h_m son las pérdidas por accesorios

Las ecuaciones para las pérdidas generales, por flujo y accesorios están definidas como las Ecuaciones (13), (14) y (15) respectivamente.

$$h = \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} \quad (13)$$

$$h_s = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5} \quad (14)$$

$$h_m = \sum \frac{8K_{acc}Q^2}{\pi^2 g D^4} \quad (15)$$

La sumatoria de la ecuación 15 es con respecto a cuantos accesorios se tengan con sus correspondientes coeficientes de pérdidas, sustituyendo las ecuaciones (11), (13), (14) y (15) en la ecuación (10) y factorizando el gasto queda como

$$H_B = A + \left[\frac{8}{\pi^2 g D^4} + \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} + \sum \frac{8K_{acc}}{\pi^2 g D^4} \right] Q^2 \quad (16)$$

La carga final es la altura que debe de vencer la bomba, la bomba seleccionada tiene una presión de 8 m.c.a. esto quiere decir que puede soportar una carga de 8 metros de altura vertical. En este diseño la altura no supera los 4 metros, dejando un rango de 4 m.c.a. para compensar las pérdidas.

7. Evaluación energética del proyecto

Una vez realizados los análisis previos sobre los aportes energéticos de cada una de las tecnologías que conforman el sistema híbrido se determinó que, para un generador de agua caliente de 30 cc de capacidad puede aportar 1,059,355 kJ/h [28] teniendo un consumo de gas natural de 32 m³/h [28], además el generador puede operar con otros combustibles como es gas L.P. y diésel con un consumo de 26.3 kg/h [28] para el gas L.P. y 33 l/h [28] de diésel. En promedio el generador de agua caliente trabajaría 24.25 horas (1 día 6 horas) en un principio para elevar la temperatura del agua en su primera aplicación, se tomó en

consideración la temperatura más fría del año (7.5 °C) para llegar a la temperatura objetivo (28°C).

Sin embargo, considerando una pérdida de 2.5°C diariamente, este generador trabaja 3 horas al día para compensar esa pérdida en temperatura y estar nuevamente a 28°C.

Las bombas de calor tienen diferentes capacidades térmicas, la máxima aportación térmica es de 141,000 BTU [9] (148,769 kJ/h) por bomba de calor, si se utiliza una sola bomba de calor se tardaría 172 horas (7 días 4 horas) en llegar a la temperatura objetivo. Realizando la evaluación de la aplicación de esta tecnología se determinó que son 3 las bombas de calor a utilizar trabajando con un arreglo en serie para elevar la temperatura y mantenerla, teniendo un consumo eléctrico promedio de 13 kWh [9] por cada bomba de calor, con las 3 bombas operando el tiempo se reduce a 57.6 horas (2 días 10 horas).

Una vez alcanzado el punto de operación del sistema y considerando la pérdida de temperatura diaria, las bombas de calor deben de trabajar 7 horas al día para compensar la pérdida en temperatura.

El sistema de captación de energía solar por su parte depende del área disponible en el lugar para así obtener un mejor rendimiento en la captación de la energía solar. Con el análisis previo de colectores solares, cada tipo analizado tiene sus características, los colectores de polietileno tienen una mayor área de captación por panel, mientras que los colectores de cobre tienen aproximadamente la mitad del área con respecto a los otros, se observó que los colectores de cobre tienen una mejor respuesta cuando las condiciones ambientales son frías o de baja temperatura, mientras que los colectores de polietileno pueden alcanzar una mayor eficiencia de captación de energía solar.

Por lo visto en los análisis se llegó a determinar el uso de los colectores de polietileno, por el cumplimiento de la norma NADF-008-AMBT-2005 aportando 32.2% del consumo de energía térmica anual.

El diseño que favorece un mejor uso de la energía es la combinación del generador de agua caliente junto con los colectores solares de polietileno, esto se debe a que el generador de agua caliente ocupa un menor tiempo para alcanzar los objetivos y con la combinación de los colectores solares se ocupa menor cantidad de combustible.

Para todo tipo de albercas, interiores y exteriores, es muy recomendable colocar una manta térmica durante las noches, para disminuir las pérdidas de energía.

8. Evaluación económica del proyecto

Implementar un proyecto tiene un costo, además de considerar los gastos de operación para mantenerlo, por estas razones es importante realizar un análisis económico sobre estos costos, primero hay que considerar la inversión inicial, es decir, cuánto se va a gastar en equipos, instalaciones y construcciones para que el proyecto pueda funcionar, aquí se analizarán sólo los costos de las tecnologías que se van a implementar, ya que el objetivo de la tesis es comparar cuál tecnología es la mejor y más rentable para la implementación del proyecto de la alberca.

Los costos de equipos están listados en la Tabla 15, estos costos pueden variar por las fluctuaciones del mercado.

Equipo	Costo
Panel Solar de tubos de cobre	\$3,500.00
Panel Solar de Polietileno	\$3,200.00
Bomba Hidráulica	\$14,300.00
Filtro de arena	\$38,500.00
Sistema de cloración	\$20,000.00
Bomba de Calor	\$85,000.00
Generador de agua caliente	\$150,000.00

Tabla 15 “Costos por equipo”

Fuente: Elaboración propia con los precios de cada proveedor

Se tienen 4 diferentes opciones económicas para implementar este proyecto

- Paneles de cobre y generador de agua caliente
- Paneles de cobre y bombas de calor
- Paneles de Polietileno y generador de agua caliente
- Paneles de Polietileno y bombas de calor

Como se analizó anteriormente, se necesitan 3 bombas de calor, 23 paneles de polietileno o 46 paneles de cobre, esta cantidad de paneles es por el espacio disponible dentro de las instalaciones para poner dicha tecnología. Los costos de inicio de cada combinación se muestran en la Tabla 16.

Combinación	Costo inicial
Paneles de cobre y generador de agua caliente	\$383,800.00
Paneles de cobre y bombas de calor	\$488,800.00
Paneles de Polietileno y generador de agua caliente	\$296,400.00
Paneles de Polietileno y bombas de calor	\$401,400.00

Tabla 16 “Costos de inversión”

Fuente: Elaboración propia con los cálculos

De la Tabla 16 se puede observar que la mejor combinación en cuando a inversión es la de los paneles de polietileno y el generador de agua caliente.

8.1 Tarifas eléctricas

Para la tarifa eléctrica se debe de hacer un conteo aproximado de la carga instalada y la potencia que puede demandar, dependiendo se eso se contrata una tarifa eléctrica específica y son diferentes dependiendo de la demanda instalada las cuales son las siguientes:

- Tarifa 2, hasta una demanda de 25 kW [5]
- Tarifa 3, una demanda para más de 25 kW [5]

Estas dos son para baja tensión, las cuales no requieren de un transformador propio para la contratación, se utiliza el transformador del servicio público de la zona

Las siguientes son tarifas de media tensión las cuales si requieren un transformador, estás tarifas se contratan cuando el transformador del servicio público no tiene la capacidad de soportar la demanda instalada, las tarifas en media tensión son las siguientes:

- Tarifa O-M, con demanda menor a 100 kW [5]
- Tarifa H-M, con demanda mayor a 100 kW [5]

Para esta caso específico se tienen dos opciones para poder contratar, debido a que las bombas de calor utilizan energía eléctrica, estás tienen una demanda de 13.2 kW si se instalan las 3 más los servicios adicionales como luces y bombas hidráulicas, la demanda instalada debe estar alrededor de 50 kW. Por lo que se recomienda la tarifa O-M ya que los transformadores del lugar no tienen la capacidad para suministrar esta demanda de potencia y dar servicio a los lugares vecinos.

Caso contrario si se elige la opción del generador de agua caliente está demanda instalada puede bajar hasta un aproximado de 10 kW instalados por lo que se puede considerar la Tarifa 2.

La distribución de cargas sin considerar las bombas de calor están contenidas en la tabla 17, con base a la tarifa 2 septiembre del 2017 se calculó un gasto aproximado de \$10,938.45 pesos/mes.

Cargas	kW	horas de uso	kWh/día
Bomba Hidráulica	4	13	52
Lámparas	0.06	4	2.88
Focos	0.023	10	3.45
Otras cargas	2	24	48

Tabla 17 “distribución de cargas”

Fuente: Elaboración propia con los cálculos

Se consideraron 10 lámparas de 60 W para la iluminación nocturna y 15 lámparas de 23 W para iluminación de los demás espacios de uso común.

Considerando la Tarifa O-M ya con las 3 bombas de calor y las demás cargas se obtiene la Tabla 18, la cual distribuye el costo si se utiliza uno, dos o tres bombas de calor.

Cargos		1 Bomba de calor kW	2 Bombas de calor kW	3 Bombas de Calor	Usos Variados aprox kW
Cargo por demanda Máxima por cada kW	\$201.68	13.2	26.4	39.6	10
Cargo Adicional por la energía consumida	\$1.43	2772	5544	8316	2100
Horas de trabajo Mes	210	2436	3822	5208	
Consumo total [mes]					
Costo por kW		\$3,481.04	\$5,461.64	\$7,442.23	
Cargo por demanda [mes]		\$4,678.98	\$7,341.15	\$10,003.33	
Costo Total		\$8,160.02	\$12,802.79	\$17,445.56	
Costo + iva		\$9,465.62	\$14,851.24	\$20,236.85	

Tabla 18 “Calculo de la tarifa O-M”

Fuente: Elaboración propia con la metodología de CFE

Seguendo la metodología de la página de CFE para la tarifa O-M se pagará por las 3 bombas de calor un costo total de \$20,236.85 pesos/mes, por uso de la energía eléctrica.

8.2 Tarifas de combustibles

Para el generador de agua caliente se optó por usar gas natural, ya que no requiere de un tanque de almacenamiento a comparación del Gas L.P. y los costos del diésel están alrededor de 17 pesos por litro, esto hace que no sea rentable este combustible.

La tarifa a pagar de Gas natural se determinó con la publicación de tarifas en el Diario Oficial para la Ciudad de México, observando el documento se terminó que se aplicará la tarifa Pequeña Industrial (1), la Tabla 19 muestra esta tarifa que es la indicada por consumir menos de 41,868 GJ/año, se aplica el bloque II de dicha tarifa por consumir 94.2 GJ/mes aproximadamente [14].

Cargos	Unidades	Distribución con comercialización	Distribución simple	
			Cargo por capacidad	Cargo por uso
Mercado Gran Comercial-Pequeño Industrial (1)				
Cargo por servicio	Pesos/mes		1121.24	
Bloque I - De 0 a 84 GJ/mes	Pesos/GJ	58.9234	46.5272	12.3962
Bloque II - Más de 84 a 628 GJ/mes	Pesos/GJ	50.7195	40.0492	10.6703
Bloque III - Más de 628 a 1,394 GJ/mes	Pesos/GJ	33.2159	26.228	6.9879
Bloque IV - Más de 1,394 a 2,093 GJ/mes	Pesos/GJ	11.2391	8.8746	2.3645

Tabla 19 “Tarifas del Gas natural”

Fuente: Elaboración propia con datos de las tarifas de gas natural [14]

Como se determinó en el capítulo 6 apartado 6.4, el generador de agua caliente trabaja 3 horas aportando un calor de 3.14 GJ, esto al mes se traduce en 94.2 GJ/mes, que al multiplicar esta cantidad con el precio del bloque II de la tabla y sumarle el cargo por servicio en total se gasta \$5,899 pesos/mes de gas natural.

Resumiendo este análisis económico se pagarían \$20,236.85 al mes con las bombas de calor, y con el generador de agua caliente se pagarían \$16,837.45, incluidos costo d gas y de electricidad, por lo que es una mejor opción.

8.3 Cobro por servicios y rentabilidad del proyecto

Como todo proyecto se deben de recuperar los gastos de inversión y poder sustentar los gastos mensuales de operación y mantenimiento para brindar el servicio, en este caso tener

el agua caliente para poder practicar el deporte de natación. Revisando la información de la tabla de inversiones se opta por la opción de menor costo, la cual es el generador de agua caliente con los paneles de polietileno. Por esta razón se descarta el cálculo de las demás combinaciones, ya que el costo de inversión es más grande, y por lo tanto la tasa de recuperación se hace más pequeña.

Revisando en algunos lugares que ofrecen este mismo servicio se llegó a un precio estándar de cobro para los usuarios, la Tabla 20 muestra estos precios por los servicios.

Clases 1 Hora Niños Y/O Adultos	Pago Mensual
1 vez por semana	\$1,100
2 veces por semana	\$1,500
3 veces por semana	\$1,800
Día Visita (pago único)	\$250
Alto Rendimiento 2 Hrs 10 A 20 Años Y/O Elites	Pago Mensual
3 veces natación por semana	\$2,000
4 veces natación + carrera y bicicleta por semana	\$2,300
5 O 6 Veces Natación + carrera y bicicleta por semana	\$2,500
Nado Libre (1 Hra) Sin Clase	Pago Mensual
1 vez por semana	\$800
2 veces por semana	\$1,000
3 Veces por semana	\$1,200
Diario (5 días)	\$1,500

Tabla 20 “Precios del servicio a usuarios”

Fuente: Elaboración propia con datos recolectados

Dado estos precios se aprecia que en el peor de los casos es que asistan 60 personas a tomar clase una vez a la semana, con esto se pagan los gastos fijos de operación, se supondrá que, el reglamento de natación marca que no puede haber más de 4 personas en un mismo carril durante una sesión de entrenamiento, entonces teniendo 4 carriles, por hora podrán estar 16 personas.

Se considerarán pagos fijos del proyecto de \$43,163 por mes, como tasa de rendimiento mínima atractiva (TREMA) se elegirá un valor del 12% de acuerdo a los lineamientos de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) para evaluar proyectos de inversión expresados en moneda constante. Al realizar el cálculo con el Valor Presente Neto (VPN) con los parámetros antes mencionados usando la función de Excel, se determinó que el proyecto se paga en 16 meses, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 21, el VPN representa el dinero que se tiene actualmente después de haber pagado el proyecto, este

debe ser positivo con los periodos propuestos, si llega a ser negativo, se deben de incrementar los periodos de pago.

VPN	\$4,615.03
TIR	13%
RBC	\$1.02
TREMA	12%

Tabla 21 “Parámetros resultantes del proyecto de inversión”

Fuente: Elaboración propia con los resultados obtenidos

La Tasa de Retorno Interna (TIR) es mayor a la TREMA, por lo que se puede concluir que el proyecto es rentable, y en este periodo la Relación Beneficio Costo (RBC) ya es positiva.

Este es el escenario menos favorable para el pago del proyecto, si comienzan a hacerse combinaciones con gente que tome más de una clase a la semana, o aquellos que se inscriban para entrenamiento de alto rendimiento, puede bajar el número de periodos para que el proyecto sea rentable ya que estos precios son más elevados por lo que se obtendrá un mejor rendimiento de ganancias.

La vida útil de los equipos es de 10 años aproximadamente, por lo que el proyecto se alcanza a pagar mucho antes de alcanzar esta vida útil.

9. Conclusiones

Con los resultados obtenidos con la evaluación energética y económica del proyecto se determinó que la mejor combinación de tecnologías para la operación, se da por la combinación de los paneles solares de polietileno junto con el generador de agua caliente, los paneles deben de estar en un arreglo mixto para que el incremento de temperatura sea mayor y mantener el flujo de agua constante en estos.

Sin embargo la bomba de calor es una tecnología en desarrollo para esta aplicación, en un futuro si esta tiene la capacidad de brindar más calor puede ser una opción para el remplazo a la quema de combustibles y disminuir la generación de GEI, por ahora la bomba de calor no proporciona un calor suficiente para cumplir las demandas de energía, se consideraría más como una tecnología de apoyo.

Se logra cumplir con la norma ambiental NADF-008-AMBT-2005 con el uso de los colectores de polietileno con una eficiencia promedio del 66.3% en la recolección de energía solar. La implementación de los paneles logra reducir el consumo de gas natural, aportando 32.2% de la energía promedio anual.

Para mantener la energía en la alberca, se necesita de una manta térmica, con esto la pérdida de temperatura se mantiene en promedio de 2 a 3 °C por día, dependiendo de la época, caso contrario, si no se tuviera la manta se perderían entre 5 y 10°C, demandando más energía para calentar el agua.

El proyecto es rentable pagándose en 16 meses, y la vida útil de los equipos es de 10 años aproximadamente. Por lo que la TIR y la vida útil son buenos indicadores de que el proyecto no tendrá dificultades al pagarse.

10. Bibliografía

- [1] Yunus A. Cengel, Termodinámica, McGrawHill, 2012.
- [2] Frank M. White, Mecánica de Fluidos, McGrawHill, 2008.
- [3] Catálogo general 2015-2016 bombas hasa disponible en <https://www.bombashasa.com/imag/cat-tarifa/catalogo.pdf>
- [4] Heliocol, Especificaciones técnicas, disponible en <http://www.asi.co.za/heliocol.html>
- [5] Tarifas eléctricas obtenidas de la página oficial de la CFE, http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_industria.asp
- [6] AstralPool, vendedores de accesorios para piscinas, <http://www.astralpool.com/>
- [7] Proveedor de calentadores de agua, Clayton, <http://www.clayton.com.mx/>
- [8] Pedro Rufes Martínez, Energía Solar Térmica, Marcombo S.A., 2010.
- [9] Bombas de calor para calefacción de agua, <https://www.bombasdecalormexico.com/>
- [10] Conuee, Eficiencia en caderas y combustión, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/93854/Calderas_02.pdf
- [11] Periodo de recirculación del agua, http://www.filtragua.com/html/periodo_de_recirculacion.htm
- [12] Tratamientos de depuración del agua, <http://www.hidritec.com/hidritec/comparativa-de-tratamientos-de-depuracion-de-piscinas>
- [13] Radiación Solar, Instituto de geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en http://www.geofisica.unam.mx/radiacion_solar/archivos/energia_solar1.pdf

- [14] Tarifas Gas Natural Fenosa, disponible en http://www.gasnaturalfenosa.com.mx/servlet/ficheros/1297155219070/Tarifas_cdmx_feb2017.pdf
- [15] El Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM disponible en: <http://www.geofisica.unam.mx/ors/ors-red.html>
- [16] PROCALSOL Programa de Calentamiento Solar de Agua México <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/antecedentes-calentamiento-solar-de-agua>
- [17] Objetivos de desarrollo sostenible <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [18] FINA, Facilities Rules disponible en https://www.fina.org/sites/default/files/finafacilities_rules.pdf
- [19] Normatividad de la Federación Mexicana de Natación disponible en <http://fmn.org.mx/page/normatividad>
- [20] Meteorológico Nacional, resumen de temperaturas disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- [21] NASA Meteorología superficial y energía Solar disponible en: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=19.3098088&lon=-99.21226760000002&submit=Submit>
- [22] Catalogo Heliocomfort para colectores de cobre disponible en <http://www.heliocomfort.com/catalogos/CATALOGO%20TERMICO.pdf>
- [23] Conexiones para los colectores solares disponible en <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/captadores-solares-termicos>
- [24] “Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México” https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf
- [25] “2010 Reservas de Hidrocarburos de México” 2010 Pemex Exploración y Producción http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Reservas%20de%20hidrocarburos%20evaluaciones/100101_rh_00_vc_e.pdf
- [26] Yunus A. Cengel, Transferencia de Calor y Masa, Cuarta Edición, McGrawHill, 2011.

[27] John A. Duffie, Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition, WILEY, 2013.

[28] Calentadores de agua Clayton, Tabla de especificaciones de productos”
<http://www.claytonmexico.com.mx/Libros/2%20Agua%20Caliente.pdf>

[29] NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/230ssa102.html>

[30] NOM-245-SSA1-2010, Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5256066&fecha=25/06/2012

[31] NADF-008-AMBT-2005, “Energía Solar-Rendimiento térmico y Funcionalidad de colectores solares para el calentamiento de agua-Métodos de prueba y Etiquetado”
<http://www.paot.org.mx/centro/normas/NADF-008-AMBT-2005.pdf>

[32] NMX-ES-001-NORMEX-2005 “Energía Solar-Rendimiento térmico y Funcionalidad de colectores solares para el calentamiento de agua-Métodos de prueba y Etiquetado”
<http://www.sitiosolar.com/NMX-ES-001-NORMEX%20-%202005.pdf>

[33] Salvador Rodríguez “Tesis, Análisis Energético De Un Sistema Tipo Híbrido En La Alberca Olímpica De Ciudad Universitaria”
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4890/Trabajo%20Final%20revisado1.pdf?sequence=1>

[34] Ubicación del lugar de implementación de la alberca disponible en:
<https://www.google.com.mx/maps/place/Pedernal+372,+Jardines+del+Pedregal,+01900+Ciudad+de+M%C3%A9xico,+CDMX/@19.3099948,-99.2121996,106m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x85cdfbf8bbadda1:0x64ca32847c671628!8m2!3d19.3098088!4d-99.2122676>