



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**ANÁLISIS EXERGO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE COLECTORES SOLARES
PARA UNA PISCINA MUNICIPAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL MECANICO

ALEJANDRO IGNACIO CUEVAS STREETER

PROFESOR GUIA:

ALEJANDRO FONT FILAX

MIEMBROS DE LA COMISION:

ROBERTO ROMAN LATORRE

CARLOS CORDOVA RIQUELME

SANTIAGO DE CHILE

OCTUBRE 2009

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: ALEJANDRO CUEVAS S.
FECHA: 26/10/2009
PROF. GUÍA: Sr. ALEJANDRO FONT F.

"ANÁLISIS EXERGO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE COLECTORES SOLARES PARA UNA
PISCINA MUNICIPAL"

El objetivo general del presente trabajo, es generar una metodología de evaluación del uso de colectores solares para una piscina municipal temperada en base a factores en base a un análisis exergético y económico; se espera ver tanto el impacto que podrían tener los colectores en el sistema como la magnitud del ahorro económico asociado a su uso.

Se utilizó como caso particular para este trabajo, la piscina temperada de uso público que tiene la municipalidad de Vitacura en la misma comuna. Esta piscina funciona todo el año, siempre temperada, y cuenta además con servicio de camarines con duchas, de manera que se tiene tanto una carga por la calefacción de la piscina como en la generación de agua caliente sanitaria (ACS). Actualmente se utilizan equipos eléctricos para calentar el agua necesaria, lo que genera altos gastos asociados al consumo eléctrico de estos equipos. Por otra parte, está el creciente interés en utilizar energías renovables tanto por el beneficio económico que suponen como el beneficio medioambiental que conlleva su uso.

Se determinaron, para el sistema actual, las pérdidas de calor asociadas a la piscina y la energía necesaria para producir ACS. Se calcularon los flujos de exergía del sistema y se identificaron puntos donde existe destrucción o pérdida de exergía. Se identificó la producción de agua caliente sanitaria como una importante carga energética y exergética del sistema, principalmente por la alta temperatura que se debe alcanzar. Se calcularon los requerimientos que se quiere suplir con los colectores y se utilizó el criterio de inversión del valor actual neto para encontrar la cantidad de colectores que entregue un mayor retorno económico. Posteriormente se vio el impacto en el balance exergético del sistema al incluir los colectores solares.

Se concluye que hay tanto una mejora exergética como un importante beneficio económico al incorporar al sistema la tecnología de colectores solares para el calentamiento del agua. La mejora exergética está dada por la intervención en algunos puntos del sistema donde se pierde exergía y el menor uso de los equipos actuales. Se puede suponer, que a mayor escala, el ahorro energético acarrearía además una disminución en las pérdidas de exergía aguas arriba del sistema, hacia las fuentes de producción de energía eléctrica, lo que puede significar un beneficio mayor.

ÍNDICE

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	viii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Alcances	3
2. Metodología Específica	4
3. Antecedentes	5
3.1. Introducción	5
3.2. Piscinas	5
3.2.1. Calefacción y climatización de piscinas techadas	6
3.2.2. Requerimientos Térmicos	7
3.2.3. Equipos de calefacción	8

3.2.4. Sistemas Solares	10
3.3. Energía Solar	11
3.3.1. Modelos de radiación solar	12
3.4. Sistemas de Captación: Colectores Solares	14
3.4.1. Colectores sin concentración	15
3.4.2. Características técnicas de colectores	16
3.5. Exergía	18
3.5.1. Primera ley de la termodinámica	18
3.5.2. Segunda ley de la termodinámica	18
3.5.3. Exergía	19
3.6. Balances de energía térmica de la piscina	25
3.6.1. Pérdidas por evaporación	26
3.6.2. Pérdidas por conducción	26
3.6.3. Pérdidas por purga de agua	27
3.6.4. Transferencia de calor por radiación	27
3.6.5. Transferencia de calor por convección	27
3.7. Condiciones ambientales	28
4. Caso Particular: Piscina Acuavita	29
4.1. Piscina Municipal de Vitacura	29
4.2. Sistema actual de calefacción y climatización	30
4.2.1. Potencia de equipos térmicos	32
4.2.2. Sistema de calefacción de la piscina	32

<i>ÍNDICE</i>	III
4.2.3. Circuito de calefacción del aire	33
4.2.4. Circuito de agua caliente sanitaria para duchas	34
5. Balances	35
5.1. Condiciones de operación	35
5.2. Balances Sistema Piscina	36
5.2.1. Balance de masa	36
5.2.2. Evaporación	36
5.2.3. Conducción	37
5.2.4. Purgas	37
5.2.5. Convección y Radiación	38
5.3. Balance del espacio cubierto	39
5.3.1. Sistema Agua Caliente Sanitaria	43
6. Análisis Exergético	45
6.1. Sistema de calefacción Piscina	46
6.2. Sistema Agua Caliente Sanitaria	47
6.3. Sistema completo	49
7. Aporte de Energía Solar	51
7.1. Impacto de los colectores en el sistema	56
7.2. Sistema de colectores solares	57
7.3. Impacto de los colectores en la exergía del sistema	60
7.3.1. Piscina	60

<i>ÍNDICE</i>	IV
7.3.2. Agua caliente sanitaria	61
7.3.3. Sistema completo	61
8. Discusiones	63
9. Metodología Propuesta	65
10. Conclusiones	66
Bibliografía	68
A. Características técnicas de los colectores	70
B. Medidas realizadas en la piscina	83
C. Temperatura del agua al interior de las cañerías	84
D. Formulario de adquisición de datos	86
E. Módulo Macro Excel	88

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Mecanismos de pérdida de calor en una piscina techada.	8
3.2. Estado de la bacteria Legionella en función de la temperatura del agua.	8
3.3. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor.	9
3.4. Esquema de funcionamiento de un sistema solar para piscinas.	10
3.5. Radiación solar a nivel de la Tierra	12
3.6. Esquema de funcionamiento de colectores solares	16
3.7. Sistema cerrado dentro de un ambiente.	20
3.8. La figura grafica el comportamiento de una transferencia de calor desde el punto de vista energético y exergético. Se puede ver que para una transferencia de calor la energía transferida se mantiene, sin embargo el proceso lleva asociada una generación de entropía (irreversibilidad) y por consiguiente una destrucción de exergía. Claramente la transferencia de calor no se puede efectuar en sentido inverso al mostrado en la figura, sin mediar un trabajo externo.	23
4.1. Ubicación piscina Acuavita	29
4.2. Vista aérea del recinto.	30
4.3. Diagrama del sistema actual	31
4.4. Sistema de calefacción de la piscina.	32
4.5. Sistema de calefacción del aire.	33
4.6. Sistema de agua caliente sanitaria.	34

5.1. Balance de masa y energía para la piscina.	36
5.2. Pérdidas de calor por agua de reposición	38
5.3. Total de pérdidas de la piscina.	39
5.4. Balance de masa y energía para el espacio cubierto.	40
5.5. Humedad necesaria (curva azul) para mantener las condiciones dentro del recinto. La línea roja representa la humedad que aporta la evaporación de agua desde la piscina. . .	40
5.6. Flujo de calor en el espacio cubierto en régimen diurno.	42
5.7. Flujo de calor en el espacio cubierto en régimen nocturno.	42
5.8. Energía para generar el ACS necesaria al día.	44
6.1. Balance de exergía para la piscina. Valores en [kW].	46
6.2. Balance exergético ACS. Valores en [kW].	48
6.3. Flujos de exergía del sistema.	49
6.4. Flujo de exergía por agua de la red[kW].	49
7.1. Requerimientos de energía ($Q_{ACS,PISCINA}$) y exergía ($\Delta E_{x ACS, PISCINA}$) para calentar el agua de la red a $60^{\circ}C$. Valores en [kJ/día].	52
7.2. Tabla para estimar los requerimientos de energía, exergía y el número de colectores. . . .	53
7.3. Cantidad de colectores necesaria para cumplir la demanda de agua caliente.	53
7.4. VAN según número de colectores para el sistema COL1.	56
7.5. Demanda de colectores contra colectores instalados (línea roja).	56
7.6. Diagrama de sistema de colectores solares.	58
7.7. Diagrama con la inclusión de los colectores solares.	59
7.8. Balance exergético piscina con aporte solar. Valores en [kW].	60
7.9. Flujos de exergía del sistema.	61

B.1. Temperaturas medidas en los equipos térmicos. [°C]	83
C.1. Balance de energía en la pared de una tubería.	84

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Condiciones típicas de piscinas cubiertas según su uso [5].	7
3.2. Valores para modelo de Perrin de Brichambaut	13
3.3. Parámetros de curva de eficiencia.	17
3.4. Condiciones del ambiente y temperatura del agua de la red.	28
4.1. Potencias de los equipos térmicos.	32
5.1. Balance de masa para la piscina	36
5.2. Valores de los parámetros para evaluar la evaporación de agua.	37
5.3. Pérdidas de calor por agua de reposición en [kW]	38
5.4. Total de pérdidas de la piscina [kW]	38
5.5. Agua caliente sanitaria necesaria al día, en litros.	43
7.1. Agua caliente sanitaria (60°C) necesaria al día en litros.	51
7.2. Planilla N° Colectores vs Ahorro.	54
7.3. Planilla resumen anual.	54
7.4. Resumen cálculo de colectores.	55
7.5. Aporte porcentual del sistema de colectores a los consumos requeridos.	57

1.1 Antecedentes Generales

En el último tiempo hemos visto como junto con un marcado aumento en las necesidades de consumo energético, los costos asociados a este han sufrido grandes alzas. En particular, las alzas en los precios de los combustibles y las tarifas eléctricas por una parte, y por otra la grave situación de contaminación generada por las fuentes energéticas tradicionales, han dado paso a un interés mayor en energías renovables y tecnologías limpias que entreguen tanto beneficios económicos como medioambientales. En este ámbito, los colectores solares se muestran como una real alternativa para disminuir los costos asociados al calentamiento del agua al utilizar directamente la energía solar para este efecto. Históricamente se ha visto que la generación intermedia de energía eléctrica para llegar al proceso final ha cedido el paso al aprovechamiento directo de la energía solar.

En este contexto, las piscinas temperadas constituyen un elevado consumo de energía durante el año, tanto para el calentamiento del agua propia de la piscina como de los servicios anexos que ésta pueda tener, como servicio de camarines, por lo que es interesante plantear un estudio que integre el uso de energía renovable, en particular energía solar térmica.

La comuna de Vitacura cuenta con una piscina municipal que funciona todo el año, manteniendo siempre una temperatura del agua de aproximadamente 28°C. Tanto la piscina como el requerimiento de agua caliente sanitaria en los camarines, son causales de un alto gasto energético, que se traduce en elevados costos monetarios. En el caso de esta piscina, se utilizan calefactores eléctricos para el calentamiento del agua, generando no sólo una abultada cuenta de electricidad a fin de mes sino que también una carga al sistema eléctrico del sector.

En Vitacura se ha puesto énfasis en proyectos amigables con el medio ambiente, como por ejemplo el centro de reciclaje "Punto Limpio" [1], que permite centralizar el reciclaje de diversos tipos de residuos.

1.2 Motivación

Si bien existe un conocimiento general de la existencia y el funcionamiento básico de los colectores solares, el impacto del uso de esta tecnología en situaciones reales no es manejada por los actores sociales que toman decisiones para elegir estos sistemas.

Además, podemos considerar que la energía solar es gratuita; sin embargo, la tecnología necesaria para captar y utilizar esta energía de forma óptima no lo es, por lo que es necesario maximizar su aprovechamiento. Un análisis exergo-económico permite esta utilización óptima de la energía disponible, considerando además un modelo económico para los costos del proyecto, entregando así una razón *costo/beneficio* del sistema a analizar.

En general, se plantean los sistemas de colectores solares como soluciones para disminuir o eliminar los costos asociados al calentamiento del agua. Si bien existen aplicaciones de colectores solares en escenarios tales como edificios, viñas y otros, estas aplicaciones son desarrolladas como sistemas que permiten disminuir los costos energéticos, pero no se asocian a temas de eficiencia energética en los diferentes procesos en los que se incluyen.

En la misma línea, para tomar una decisión correctamente informada, es necesario contar con un modelo objetivo, tanto energética como económicamente, del sistema a analizar, que comprenda todas las variables del problema, así como elementos de optimización del sistema, para generar una solución crítica y efectiva bajo un punto de vista profesional.

Una investigación acabada sobre la aplicación de esta tecnología para este caso particular, para generar una metodología de comparación, permitirá a partir de esto último cuantificar su impacto en los niveles de energía, temperatura y los beneficios económicos y ambientales que se obtienen de su uso. Esto se traduce en una gran herramienta a la hora de tomar decisiones.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo General

El objetivo general del trabajo es generar una metodología en base a un análisis exergético y económico que permita determinar donde y cuantos colectores solares utilizar.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis exergético de la situación actual del recinto, permitiendo conocer la eficiencia del sistema y los posibles puntos de mejora.
- Establecer los parámetros de diseño necesarios para seleccionar y evaluar la tecnología de colectores solares apropiada.
- Diagramar un nuevo sistema que incluya la tecnología solar.
- Realizar un análisis exergético de la nueva situación.
- Evaluar económicamente el nuevo diseño.
- Definir criterio de decisión, exergético o económico.

1.4 Alcances

- La evaluación y selección de los colectores se realizará en base a la documentación entregada por los distribuidores de estos.
- Se llegará a desarrollar un diagrama de procesos del sistema.
- No se diseñará la red de piping y no se generarán planos de construcción del sistema.
- Se utilizarán valores referenciales de proyecto para algunos de los elementos constructivos del sistema.

METODOLOGÍA ESPECÍFICA

La metodología utilizada en el presente trabajo de título es la siguiente.

- Recopilación de antecedentes: seleccionar material bibliográfico acorde a la investigación, necesario para la realización del trabajo.
- Levantamiento de la instalación actual de la piscina.
- Recopilación de información: recopilar datos sobre consumo energético de los recintos y sus niveles energéticos, a partir de registros y mediciones en el lugar.
- Evaluación exergetica de la situación actual.
- Elaboración de un modelo de diseño: a partir de la información recopilada se establecerán los parámetros y características necesarias de los colectores solares, atendiendo a los criterios exergeticos.
- Análisis de tecnologías: se analizarán las opciones de colectores solares que se adecuen a las necesidades.
- Evaluación Exergo-Económica: Se propondrá un diseño de procesos a partir de un análisis exergetico a partir del cual se estimarán costos de implementación y la evaluación económica del proyecto. Se utilizarán valores referenciales de proyecto para algunos de los elementos constructivos del sistema.

3.1 Introducción

Como se mencionó anteriormente, la gratuidad y disponibilidad de la energía solar contrastan con elevados costos de inversión inicial para la adquisición de la tecnología de captación de energía necesaria. Los colectores solares tienen valores que pueden sobrepasar \$1.000.000 por equipo [3].

Esto da paso a la necesidad de desarrollar un uso eficiente de la energía. Utilizar la energía térmica disponible a la salida del colector de la mejor forma posible, requiere de un análisis energético y exergético para establecer las prioridades de consumo en el sistema. Este análisis exergético permitirá además evitar la destrucción de exergía en diferentes puntos del proceso, permitiendo elaborar diagrama de procesos eficiente.

Existe además una relación entre la tecnología de captación y la temperatura que genera en el fluido de trabajo, su tamaño y la eficiencia de los colectores. Estos factores deben tomarse en cuenta a la hora de diseñar un sistema solar térmico. En particular, cada colector tiene una curva de eficiencia que permite conocer ésta en función de las condiciones atmosféricas, en particular la en función de la temperatura y la radiación solar. Además la información técnica de los colectores indica rangos de los caudales, presiones y temperaturas, entre otros, que definen el funcionamiento del equipo.

Las siguientes secciones de este capítulo presentan una descripción de los principales conceptos y elementos involucrados en este trabajo. Una adecuada comprensión de estos permitirá al alumno tener una visión crítica de los sistemas, entregando no sólo las herramientas necesarias para llevar a cabo el trabajo, sino también la posibilidad de proponer mejoras tecnológicas hacia éste.

3.2 Piscinas

Podemos definir una piscina como una construcción cuya función es almacenar o retener agua permitiendo la práctica deportiva o la recreación de sus ocupantes. Podemos encontrar una gran variedad de tipos, formas y usos para las piscinas, siendo variable también las condiciones de ésta, en particular

la temperatura del agua, acorde a sus requerimientos.

Podemos clasificar las piscinas en dos grupos principales:

Piscinas Abiertas: La piscina está en contacto directo con el medio ambiente, viéndose afectada por vientos, precipitaciones, temperatura y humedad ambiental. Presentan también un aporte directo de calor por radiación solar.

Piscinas Cubiertas o Techadas: La piscina está protegida del medio ambiente gracias a una estructura que cubre su entorno. Se limita así el efecto del ambiente sobre la piscina y se permite generar condiciones del recinto adecuadas.

En ambos casos, la calefacción de las piscinas es una práctica común que permite no sólo extender su temporada de uso, sino que además, y quizás con mayor importancia, permite adecuar sus condiciones a distintas aplicaciones, ya sea recreacional, deportiva o terapéutica. Esta práctica trae consigo una serie de necesidades energéticas, que permiten mantener el recinto en las condiciones requeridas.

Los requerimientos energéticos están sujetos a diversas pérdidas de calor que deben contrarrestarse. Éstas pérdidas son principalmente por evaporación del agua en la superficie, existiendo además otras pérdidas a considerar como la conducción de calor a través de las paredes de la piscina, o el agua de reposición, pero éstas son menores en relación a las pérdidas por evaporación [5], [13].

A continuación se ahondará en la calefacción y climatización de piscinas techadas.

3.2.1. Calefacción y climatización de piscinas techadas

Como ya se mencionó anteriormente, el objetivo de climatizar una piscina es que ésta se encuentre en condiciones óptimas para el uso que se pretenda darle, ya sea deportivo, recreacional, terapéutico, etc. y que pueda ser utilizada todo o la mayor parte del año.

Las piscinas deben cumplir además con una serie de requisitos que aseguren la calidad del agua y del aire, para evitar problemas de salud en los usuarios. Es así como el ministerio de salud en el *Decreto Oficial 08.11.03* [6] trata elementos como la cantidad de bañistas permitidos en relación al tamaño de la piscina, tasa de recirculación del agua y la cantidad de agua fresca diaria que debe ser suministrada a la piscina, así como la temperatura que debe tener ésta para operar durante todo el año. En la edición 2007 del *ASHRAE Handbook* se tabulan condiciones típicas de diseño para piscinas techadas, ver tabla 3.1, donde se incluye la temperatura del aire (T_{air}), del agua (T_p) y la humedad relativa (HR_{int}) del recinto. Asimismo, el *Standard 62.1-2004* sobre ventilación para la calidad del aire indica los requerimientos de

aire fresco y condiciones de ventilación. Entre otros factores, las condiciones del aire deben ser tales que se eviten situaciones molestas como condensación en las paredes y goteo. Estos elementos serán relevantes al momento de calcular las cargas térmicas del proyecto.

Uso de la Piscina	T_{air} [°C]	T_p [°C]	HR [%]
Recreacional	24 a 29	24 a 29	50 a 60
Terapéutico	27 a 29	29 a 35	50 a 60
Competición	26 a 29	24 a 28	50 a 60
Tercera Edad	29 a 32	29 a 32	50 a 60
Hotel	28 a 29	28 a 30	50 a 60
Hidromasaje/spa	27 a 29	36 a 40	50 a 60

Tabla 3.1: Condiciones típicas de piscinas cubiertas según su uso [5].

Independiente del tipo de construcción que proteja a la piscina del medio ambiente, se tienen al menos dos cargas térmicas principales: calefaccionar el agua de la piscina y acondicionar el espacio techado. Además es común encontrar servicios anexos, tales como camarines, que requieren de agua caliente sanitaria (ACS) para su funcionamiento, siendo ésta una tercera carga al sistema. La existencia de duchas en estos recintos es incluso un requerimiento del ministerio de salud [6] en piscinas temperadas de uso público.

Así, al momento de evaluar las opciones de calefacción de una piscina es necesario considerar todos los elementos que se verán involucrados en los circuitos de calefacción, de manera de buscar una solución adecuada.

3.2.2. Requerimientos Térmicos

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas de calor en la piscina son principalmente por la evaporación del agua de la superficie. Ésta y otras pérdidas se ilustran en la figura 3.1.

El aire al interior del recinto también debe ser tratado, y en este caso se tendrán que satisfacer requerimientos de temperatura y humedad.

En cuanto al agua caliente sanitaria, existe una fuerte carga al requerir aumentar la temperatura de ésta desde la temperatura del agua de la red, que puede llegar a ser menor a 10°C, hasta al menos 60°C para prevenir la *Legionella*, figura 3.2. El agua caliente sanitaria se almacena en un estanque previo a su uso, el cual debe mantener la temperatura del agua hasta su consumo.

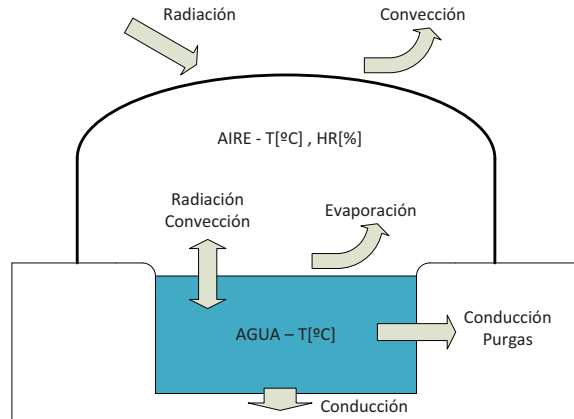


Figura 3.1: Mecanismos de pérdida de calor en una piscina techada.

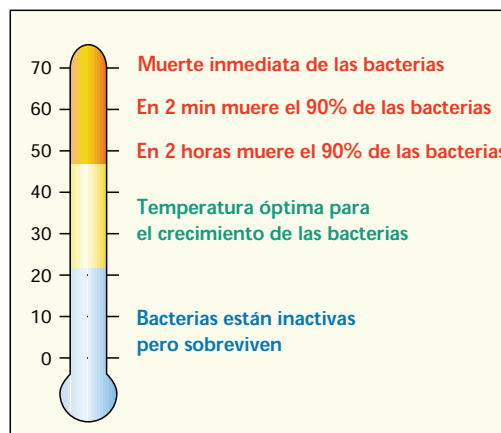


Figura 3.2: Estado de la bacteria Legionella en función de la temperatura del agua.

3.2.3. Equipos de calefacción

Para temperar la piscina, se requiere de máquinas que entreguen energía térmica al agua, permitiendo así mantener, a lo largo del tiempo de uso de la piscina, una temperatura adecuada.

Calentador a combustión

Generalmente se utilizan calentadores a gas (u otro combustible), que operan de forma similar a los calefont o calderas de calefacción en el hogar. A medida que el agua es bombeada desde la piscina, esta pasa por los filtros y luego por el calentador. La combustión del gas en el equipo genera calor que se transfiere al agua que luego es devuelta a la piscina. Estos equipos permiten regular y mantener la temperatura del agua independiente del tiempo o clima en que se utilice.

Hoy en día la eficiencia de los equipos a combustión puede estar entre 85% y 95%

Equipos eléctricos

Operan con el mismo principio que los calentadores a combustión, salvo que en este caso el calor proviene no de la combustión sino de la electricidad, generalmente a través de una resistencia eléctrica. Estos equipos son más eficientes que aquellos a combustión, sin embargo el valor del combustible versus electricidad es un factor a considerar entre ambos sistemas. La eficiencia de estos equipos en general es superior al 90%.

Bombas de Calor

Las bombas de calor utilizan electricidad para capturar y mover calor de un lugar a otro, no generan calor directamente de ésta.

Un ventilador impulsa aire a través del evaporador, dentro del cual un líquido refrigerante absorbe el calor del aire exterior y cambia a un estado gaseoso a T_1 . Luego el gas que pasa es comprimido, lo que resulta en un gran aumento de temperatura del gas a T_2 , el cual circula hacia el condensador. En el condensador, el calor es transferido desde el gas hacia el agua circulante a T_{p1} . El agua retorna a la piscina con una temperatura $T_{p1} + \Delta T$. El gas caliente, a medida que se enfría en su paso por el condensador, regresa en estado líquido al evaporador, reiniciando así el ciclo. Ver figura 3.3

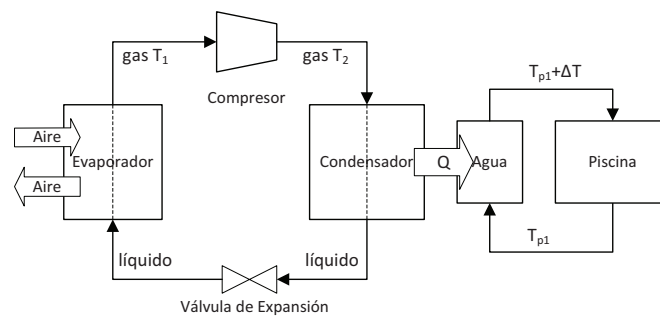


Figura 3.3: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor.

La eficiencia de las bombas de calor se mide por el *Coeficiente de Rendimiento* o *COP* por sus siglas en inglés ¹. El *COP* es una razón entre el calor útil generado \dot{Q}_{util} versus el trabajo o energía eléctrica consumida \dot{W}_{in} .

$$COP = \frac{\dot{Q}_{util}}{\dot{W}_{in}} \quad (3.1)$$

¹ COP: Coefficient Of Performance

El COP generalmente se encuentra entre 3 y 7, lo que equivale a eficiencias de un 300% a 700%, es decir, por cada unidad de electricidad (ej. $[kW]$), se entrega al fluido (agua) de 3 a 7 veces unidades de calor.

En general las bombas de calor tienen un alto costo de inversión, sin embargo, su menor costo de operación durante el año por su alta eficiencia energética los hace muy atractivos comercialmente frente a otros equipos eléctricos o equipos a combustión.

3.2.4. Sistemas Solares

La energía solar en piscinas descubiertas, sin equipos de calefacción, es una fuente directa de calor. En general para piscinas, residenciales o públicas, la energía solar es el único aporte térmico, lo que limita el uso de la piscina a los meses de verano.

En el último tiempo han salido al mercado una mayor cantidad de sistemas solares a base de colectores de *polipropileno*, que gracias a su menor costo en relación a otros tipos de colectores y su flexibilidad en la instalación, además de su neutralidad frente a los químicos utilizados en el tratamiento del agua en piscinas, han tenido un impulso en la demanda. Estos sistemas en general están destinados a ampliar la temporada de uso de piscinas y no a generar condiciones específicas de temperatura.

El esquema general de funcionamiento de estos sistemas se muestra en la figura 3.4. Su forma de operar es igual a la de los equipos nombrados anteriormente, el agua es bombeada para pasar por el sistema de filtrado, y luego es dirigida a los colectores, siempre que esto suponga una ganancia térmica, para luego regresar a la piscina.

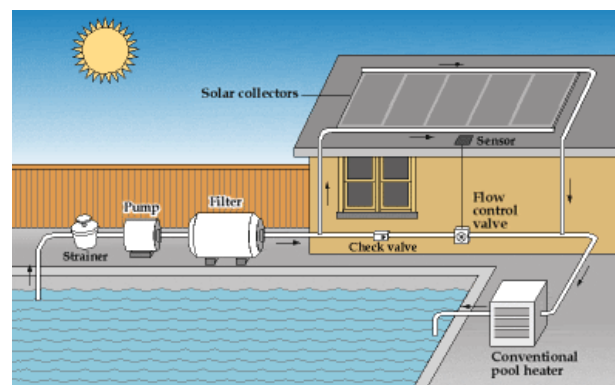


Figura 3.4: Esquema de funcionamiento de un sistema solar para piscinas.

Existen diferencias en la aplicación de colectores solares para el sector residencial con respecto a una piscina de uso público. Estas últimas están sujetas a una serie de requerimientos de circulación, temperatura, etc. que necesitan mantener a lo largo de sus horas de operación, por lo que en general un

aporte solar a una piscina es un sistema de apoyo a los sistemas convencionales de calefacción.

3.3 Energía Solar

La energía solar es una de las energías renovables más seguras con las que contamos. Si bien su uso se restringe a las horas de Sol durante el día, existen diversas formas de aprovecharla o almacenarla, lo que la convierte en una fuente prácticamente inagotable de energía. En el caso del calentamiento de agua esto es factible utilizando elementos de acopio con aislación apropiada.

La energía solar proviene de los fotones emitidos por el Sol y que llegan a la superficie terrestre. Es en la proximidad de esta que se ha desarrollado la tecnología de colectores solares para capturar esta energía y entregarla al agua.

Para comprender el funcionamiento de esta tecnología, se repasarán conceptos referentes a la energía solar disponible.

Se define la *Constante Solar*, I_0 como la energía que intercepta un plano unitario perpendicular a los rayos del sol y a la distancia media Tierra-Sol [7]

$$I_0 = 1367 \pm 53 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.2)$$

La variación que se observa se debe esencialmente a la excentricidad de la órbita terrestre, sin embargo, para efectos prácticos esta constante se considera igual a $1353 [W/m^2]$.

A nivel de la Tierra, se define la radiación solar global, G , como el total de radiación solar que se capta en un punto. Esta radiación se compone principalmente de los siguientes elementos.

- Radiación directa I_b : Es aquella que proviene directamente del sol y proyecta sombra, figura 3.5.
- Radiación difusa D : proviene de todas las direcciones de la bóveda celeste, incluso en presencia de nubes.

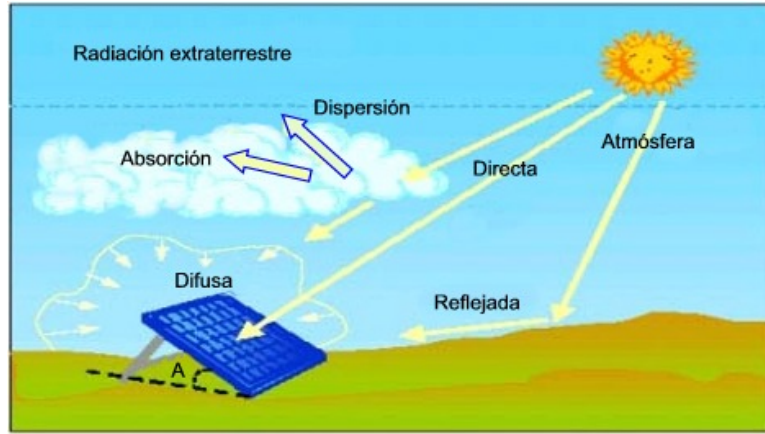


Figura 3.5: Radiación solar a nivel de la Tierra

La intensidad de la radiación directa se atenúa al atravesar la atmósfera. De esta forma, a nivel del suelo, la radiación directa es del orden de los 800 a 1000[W/m²].

En efecto, la radiación global será $G = I_b + D$.

3.3.1. Modelos de radiación solar

Los valores de la radiación solar varían durante el año, incluso día a día; sin embargo, existen modelos que entregan una buena aproximación a la radiación, ya sea instantánea o media. Existen además equipos que permiten medir la radiación a nivel terrestre, lo que ha permitido generar tablas de radiación en distintos territorios.

Modelo de Perrin de Brichambaut

La intensidad de la radiación solar se puede estimar bastante bien para un día sin nubes. El modelo de *Perrin de Brichambaut* permite estimar la radiación para diferentes condiciones de cielo, tanto radiación directa como difusa [7]:

$$I_b = A \cdot \exp\left(\frac{-1}{B \cdot \text{sen}(h + C)}\right) \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (3.3)$$

$$D = 125 * K * (\text{sen}(h))^4 \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (3.4)$$

$$G = I_b \cdot \text{sen}(h) + D \quad (3.5)$$

Donde la altura solar h está expresada en grados y los valores de A, B, C y K corresponden a los datos empíricos de la siguiente tabla:

	Cielo Claro	Cielo Normal	Cielo Contaminado
A	1210	1230	1260
B	6	3,8	2,3
C	1	1,6	3
K	0,75	1	1,33

Tabla 3.2: Valores para modelo de Perrin de Brichambaut

Recordar que para cielo despejado prevalece la radiación directa, en cambio, para cielo nublado o contaminado aumenta la radiación difusa en desmedro de la directa.

Ecuación de Angström

La máxima cantidad de radiación solar que puede llegar a un plano horizontal está dada por [7]:

$$H_0 = \frac{T}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{365,24} \right) \right] \cdot (\cos \delta \cdot \cos \phi) (\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s) \quad (3.6)$$

Donde T es la duración del día, 86400[s], ω_s es el ángulo horario de salida y puesta de sol (en radianes).

Para un lugar dado se puede definir el índice de transparencia atmosférica en función de H_0 y la radiación real medida H_H .

$$K_T = \frac{H_H}{H_0} \quad (3.7)$$

Luego, podemos establecer la duración teórica del día como:

$$S_0 = \frac{2 \cdot \arccos[-\tan \phi \cdot \tan \delta]}{15} \quad (3.8)$$

Y la fracción de asolamiento en función de S_0 y las horas de sol reales S será

$$K_s = \frac{S}{S_0} \quad (3.9)$$

A partir de estas relaciones y diferentes experimentos, Angström demostró que para valores medios mensuales existe una buena correlación lineal entre la fracción de horas de sol y la radiación solar sobre el plano horizontal, dada por:

$$\bar{K}_T = a + b \cdot \bar{K}_S \quad (3.10)$$

$$\bar{H}_H = \bar{H}_0(a + b \cdot \bar{K}_S) \quad (3.11)$$

$$(3.12)$$

Trabajos posteriores de Angström establecieron que $a + b \approx 0,75$, y existen datos tabulados para a y b .

Estas relaciones permiten estimar la radiación solar sobre un plano horizontal a partir de la fracción de horas de sol en un lugar.

Radiación Solar en Chile

Dadas las características geográficas del territorio chileno, la radiación a lo largo del país varía considerablemente. Desde excelentes condiciones tanto por latitud como por claridad del cielo en el norte de Chile, a sectores donde el factor climático es menos favorable como sucede en el extremo austral. Dadas estas características, claramente no será lo mismo realizar un proyecto en Iquique que en Santiago o Puerto Montt, por lo que es importante conocer como se comporta la radiación en el lugar donde se emplaza el proyecto.

Existen diversas fuentes o bases de datos de radiación solar en Chile. Una fuente aceptable de datos son aquellos presentes en el programa computacional *RETScreen*, programa gratuito de origen canadiense que puede descargarse en la página www.etscreen.net, y permiten un diseño global de sistemas solares.

3.4 Sistemas de Captación: Colectores Solares

Los colectores solares son equipos que captan la radiación solar y transmiten su energía a un fluido, el cual puede ser directamente el agua a utilizar, u otro fluido de trabajo. Estos equipos permiten utilizar directamente la energía térmica disponible por la radiación, y se dividen estos colectores en dos grandes grupos:

- **Colectores Solares sin concentración:** No superan la temperatura de ebullición del agua y son utilizados en aplicaciones térmicas de baja temperatura, como la producción de agua caliente sanitaria.

- **Colectores Solares con concentración:** Haciendo uso de métodos de concentración mediante óptica, la radiación se concentra en un punto o línea. Son capaces de elevar la temperatura del fluido sobre los 100°C . Estos se utilizan en aplicaciones de media y alta temperatura, como por ejemplo, en centrales solares de generación de energía eléctrica.

De acuerdo a las características de este trabajo, en particular los niveles de temperatura deseados, los colectores **sin concentración** son los apropiados para el proyecto. Sin dejar de considerar aspectos favorables que pudiesen tener los colectores con concentración.

3.4.1. Colectores sin concentración

Estos colectores son comúnmente utilizados para la producción de agua caliente sanitaria en espacios industriales o residenciales. En algunos países, como Brasil o España, existen un fuerte subsidio al uso de esta tecnología, en Chile en tanto, el año 2008 se impulsó un subsidio de hasta el 100% del valor de los colectores para viviendas [9].

Los colectores solares sin concentración más comunes son:

- **Colectores de placa plana:** Estos colectores actúan como receptores que almacenan la energía procedente del sol utilizando el efecto invernadero. El diseño de estos colectores se puede ver en la figura 3.6a. La placa selectiva en la parte posterior evita reflejar la radiación hacia el espacio, y la cubierta transparente (vidrio o plástico) genera el efecto invernadero dentro del colector. En este espacio interior se encuentra un sistema de tubos por los que circula el fluido, el cual aumenta su temperatura debido al gradiente entre el fluido y la temperatura dentro del colector.
- **Colectores Heat-Pipe:** Poseen una simetría cilíndrica, formados por dos tubos; uno exterior de vidrio y uno interior con una capa de pintura o material selectivo. El tubo interno contiene un fluido de trabajo que se evapora y genera la transferencia de calor por conducción en el extremo superior del tubo para luego condensar y descender por efecto de la gravedad hacia la parte inferior del tubo. Así, de forma natural, se genera el ciclo de funcionamiento de este sistema. Un esquema de su funcionamiento se ve en la figura 3.6b.

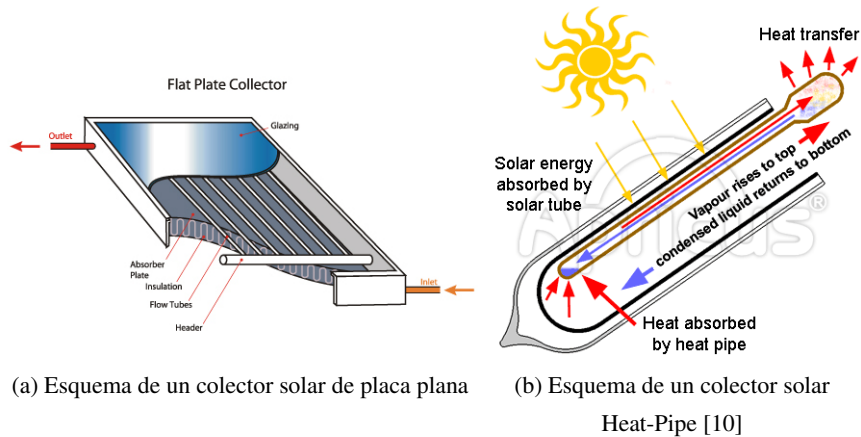


Figura 3.6: Esquema de funcionamiento de colectores solares

3.4.2. Características técnicas de colectores

Para llevar a cabo un proyecto de colectores solares es necesario conocer las características técnicas de estos. Se pueden encontrar en Internet informes técnicos, entre otros, del **Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar** (The Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems) [14], instituto Alemán que realiza pruebas normadas de colectores solares que entregan las especificaciones requeridas y además algunas pruebas de resistencia como pruebas de presión o pruebas de choque térmico.

En estos informes se especifica la marca y modelo del equipo evaluado, por lo que es posible encontrar aquel informe correspondiente a los equipos distribuidos en Chile.

A partir de esta información técnica, es posible construir diferentes modelos que cuantifiquen el aporte de los colectores a un sistema particular, dados los requerimientos de éste. Estos modelos pueden ser generados en una planilla de cálculo u otro software, para períodos mensuales o incluso día a día, incluyendo además otros parámetros de diseño, como el tipo de conexión entre colectores, ángulo de inclinación, etc., permitiendo estimar la cantidad de colectores necesaria y evaluar el comportamiento del sistema de colectores para el proyecto, o qué porcentaje de la energía total necesaria será aportada por los colectores.

Un parámetro importante que se presenta en los informes técnicos mencionados, es la curva de eficiencia de los colectores. Para estos equipos la eficiencia térmica depende de las temperaturas de entrada y salida del colector, así como la temperatura ambiente y la radiación, y se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$\eta(G, (t_m - t_a)) = \eta_0 - a_{1a} \frac{t_m - t_a}{G} - a_{2a} \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \quad (3.13)$$

donde $t_m = (t_e + t_{in})/2$, y

η_0 = rendimiento óptico del colector. Es el máximo rendimiento teórico que se puede obtener del equipo.

G = radiación global en el colector [W/m^2]

t_{in} = temperatura de entrada al colector ($^{\circ}C$)

t_e = temperatura de salida del colector ($^{\circ}C$)

t_a = temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

a_{1a} y a_{2a} = parámetros obtenidos experimentalmente a partir de las pruebas realizadas para la certificación.

En este trabajo se evaluarán tres opciones de colectores, los parámetros principales de éstos se pueden ver en la tabla 3.3. En el Anexo A se presenta un extracto de los informes técnicos de estos colectores. Estos tres equipos están disponibles en Chile.

COL1: Colector *Heat Pipe*, 30 tubos, de origen Chino.

COL2: Colector de placa plana, de origen Alemán.

COL3: Colector de placa plana, de origen Israelí.

	COL1	COL2	COL3
η_0	0,850	0,833	0,818
a_{1a}	1,771	4,670	4,208
a_{2a}	0,0192	0,004	0,014
$A_{abs}[m^2]$	2,411	2,504	2,650
$A_{tot}[m^2]$	4,9	2,7	2,95

Tabla 3.3: Parámetros de curva de eficiencia.

El área A_{abs} , área de absorción, de cada colector, es el área neta de trabajo del colector. El área bruta o área total, A_{tot} , del equipo es mayor y es la que se debe considerar para el área de instalación de los colectores.

3.5 Exergía

El aumento de consumo energético en el mundo en contraste con recursos energéticos limitados, ha derivado en un interés por mejorar la utilización de estos recursos, con nuevas tecnologías y re-diseñando procesos. La primera ley de la termodinámica trabaja con la *cantidad de energía*, e indica que ésta no puede crearse ni destruirse, pero puede desaprovecharse, desperdiciarse o perderse. Complementariamente, la segunda ley trabaja con la *calidad de la energía*, específicamente se preocupa de la degradación de la energía durante los procesos, la generación de entropía y la pérdida de oportunidades de generar trabajo. La segunda ley de la termodinámica ha probado ser una poderosa herramienta en la optimización de sistemas termodinámicos, ya que permite conocer como se está utilizando la energía en un determinado sistema, y como ésta energía puede aprovecharse mejor.

3.5.1. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica corresponde al principio de conservación de energía, el cual postula que en cualquier proceso, la energía no puede ser creada ni destruida, sino que se transforma.

Para un sistema cualquiera, podemos escribir:

$$\Delta U = Q - W \quad (3.14)$$

La variación de la energía interna del sistema, es la diferencia entre el calor aportado a éste y el trabajo que podemos obtener.

Podemos ver que siempre se conservará la cantidad total de energía del sistema, y ésta sólo se transformará.

3.5.2. Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica introduce el término de la entropía, "*S*". La entropía es una variable de estado que permite hablar de procesos reversibles e irreversibles. Un proceso reversible permite volver al estado original del sistema mediante una sucesión de cambios infinitesimales y cuasiestáticos, sin fenómenos disipativos; sin embargo, para muchos procesos, en particular la transferencia de calor, la reversibilidad no es factible.

Esta ley establece además que los procesos se efectúan naturalmente desde un sistema *ordenado*, menos probable, a uno *desordenado*, más probable, denotando nuevamente el concepto de entropía e

irreversibilidades.

Como lo formuló *Clausius* en 1850, "el calor fluye espontáneamente desde una fuente a alta temperatura hacia una fuente a baja temperatura".

Por otra parte está la formulación de *Kelvin-Planck*, durante el siglo 19, que establece que "es imposible convertir completamente calor en trabajo en un proceso cíclico". Así, una máquina que opera entre dos fuentes térmicas, una a mayor temperatura que la otra, no puede tener una eficiencia del 100%.

La variación en la entropía de un sistema aislado es siempre mayor o igual a cero, siendo igual a cero únicamente si el proceso al que está sometido el sistema es reversible.

$$\frac{dS}{dt} \geq 0 \quad (3.15)$$

Un ejemplo común del aumento de entropía es un vaso de agua con hielo, se puede "observar" el aumento de entropía a través de la desagregación de las moléculas del hielo, contribuyendo al desorden y a la irreversibilidad del proceso. Es impensable que los hielos vuelvan a generarse espontáneamente.

En resumen, la entropía de un sistema variará por:

1. La entropía asociada a los flujos de masa que entran y salen del sistema.
2. Por el flujo de calor a través de las paredes del sistema. El flujo de entropía dS^Q asociado al flujo de calor dQ está dado por

$$dS^Q = \frac{dQ}{T} \quad (3.16)$$

donde T es la temperatura termodinámica en el punto de la superficie donde se transfiere dQ , $T \geq 0$. dS^Q y dQ tienen siempre el mismo sentido. No existe un flujo de entropía asociado a la transferencia de energía por trabajo.

3. Se genera entropía por la existencia de irreversibilidades en el proceso.

El concepto de entropía y la generación de ésta en relación a las irreversibilidades, son la base para el desarrollo del concepto de exergía.

3.5.3. Exergía

El concepto de *Exergía* se obtiene al utilizar el primer y segundo principio de la termodinámica. Del primer principio sabemos que la energía se conserva en cualquier proceso, no puede ser destruida. Del

segundo principio se deduce que existe la oportunidad de generar trabajo siempre que dos sistemas en diferentes estados energéticos se comunican.

$$\text{Trabajo} = f(\text{estado inicial, camino recorrido, estado final}) \quad (3.17)$$

Un sistema entrega el máximo trabajo posible si realiza un proceso reversible desde un estado inicial específico al estado de su ambiente, es decir, estado pasivo. Esto representa el " potencial útil de trabajo" de un sistema en un estado específico, y se denomina *exergía*. Representa el límite superior de cantidad de trabajo que un equipo puede entregar. Siempre existirá una diferencia entre *exergía* y el trabajo realmente entregado. Esta diferencia representa el espacio que tienen los ingenieros para mejorar el proceso.

La *exergía* es una propiedad de la combinación sistema-ambiente, y no sólo del sistema.

$$E_x = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (3.18)$$

$$E_x = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (3.19)$$

Donde E, V y S denotan la energía, volumen y entropía del sistema respectivamente, y U_0 , V_0 y S_0 son los valores de esas propiedades en estado muerto². Esta ecuación se puede derivar de un balance de energía y entropía del sistema cerrado de la figura 3.7 [11].

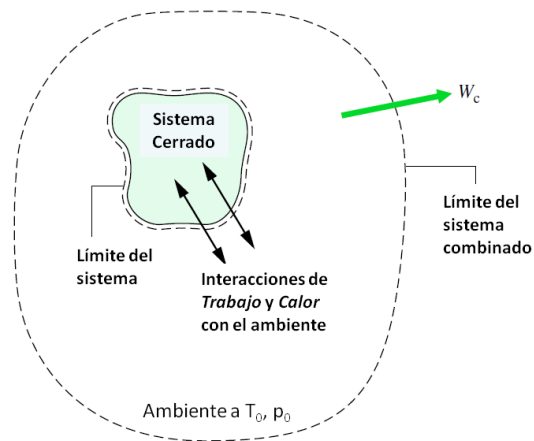


Figura 3.7: Sistema cerrado dentro de un ambiente.

²Estado Muerto: Estado de equilibrio entre el sistema y el ambiente. La posibilidad de generar trabajo es nula.

Eficiencia Exergética

La eficiencia exergética η_{II} es una medida de la aproximación a una operación reversible, ya que como se vió anteriormente, los procesos reales tienen asociado una pérdida en la capacidad para realizar trabajo (irreversibilidades). La eficiencia exergética de un sistema durante un proceso se puede definir como:

$$\eta_{II} = \frac{Ex \text{ util}}{Ex \text{ aportada}} = 1 - \frac{Ex \text{ destruida}}{Ex \text{ aportada}} \quad (3.20)$$

Esta eficiencia será siempre ≤ 1 . Siendo igual a 0 cuando hay una destrucción completa de exergía, e igual a uno para un proceso reversible (sin destrucción de exergía).

A diferencia de la eficiencia energética (primera ley), η_{II} es una representación del máximo trabajo posible que se puede obtener de un proceso. Para ciclos tales como el de refrigeración o las bombas de calor, la eficiencia exergética se puede definir también como:

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}} \quad (3.21)$$

Donde el COP es el coeficiente de rendimiento del equipo, y COP_{rev} es el coeficiente de rendimiento del equipo trabajando un ciclo reversible entre los mismos niveles de temperatura.

Dado que siempre $COP_{rev} \geq COP$, la eficiencia exergética será siempre menor o igual a 1, a diferencia de la eficiencia según la primera ley, donde se puede tener eficiencias mayores a 1, como sucede con las bombas de calor.

En resumen, la eficiencia exergética es la razón entre el uso que hacemos de los recursos, y el máximo uso que podemos darle a estos.

Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa

Al igual que la energía, la exergía puede ser transferida desde o hacia el sistema de tres formas, por calor, trabajo o flujo de masa. En un sistema cerrado, las únicas formas de exergía que pueden transferirse son trabajo y calor.

Transferencia de exergía por calor. Sabemos que el potencial de trabajo, de la energía transferida desde una fuente de calor a una temperatura $T[K]$, es el máximo trabajo que puede obtenerse de esa energía en un ambiente a temperatura $T_0[K]$, equivalente al trabajo producido por una máquina de

Carnot operando entre las temperaturas $T[K]$ y $T_0[K]$. Así, la eficiencia de Carnot, $\eta_C = 1 - T_0/T$, representa la fracción de energía que puede convertirse en trabajo, bajo las condiciones de temperatura establecidas.

La transferencia de calor va siempre acompañada por transferencia de exergía. Una transferencia de calor Q , en un sistema (T, T_0) es acompañada siempre por una transferencia de exergía $E_{x,Q}$, de la forma

$$E_{x,Q} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \text{ [kJ]} \quad (3.22)$$

Esta relación entrega la transferencia de exergía que acompaña a una transferencia de calor Q , para T mayor o menor a T_0 . Si $T > T_0$ (la fuente está a mayor temperatura que el ambiente), una transferencia de calor *hacia* el sistema (T, T_0) aumenta la exergía de éste, asimismo, una transferencia de calor *desde* el sistema, disminuye la exergía de éste. En el caso $T < T_0$, la transferencia de calor Q es el calor rechazado hacia el sistema frío, y no debe confundirse con el calor aportado por el ambiente a T_0 . La exergía transferida por calor es cero cuando $T = T_0$.

Cuando la temperatura T donde se está realizando la transferencia de calor no es constante, la exergía se determina por integración de la ecuación 3.22,

$$E_{x,Q} = \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q \quad (3.23)$$

La transferencia de calor, dada una diferencia finita de temperatura es irreversible, por lo que resulta una generación de entropía y por consiguiente una destrucción de exergía. Como se ve en la figura 3.8, una transferencia de calor Q va siempre acompañada de transferencia de entropía dada por Q/T y transferencia de exergía dada por $(1 - T_0/T)Q$.

Transferencia de Exergía por Trabajo, W . La transferencia de exergía por trabajo está dada por,

$$E_{x,W} = \begin{cases} W - W_{entorno} & \text{para trabajos en los bordes} \\ W & \text{otras formas de trabajo} \end{cases} \quad (3.24)$$

Así, la exergía transferida por trabajo en un eje, o eléctrico por ejemplo, es igual al trabajo W . Por otra parte, cuando el trabajo involucra trabajo en los bordes, como lo es en un sistema pistón-cilindro, el trabajo realizado para empujar el aire atmosférico debe restarse al trabajo total en un proceso de expansión; asimismo, en un proceso de compresión, el aire atmosférico realiza parte del trabajo por lo que se requiere suministrar menor cantidad de trabajo desde una fuente externa.

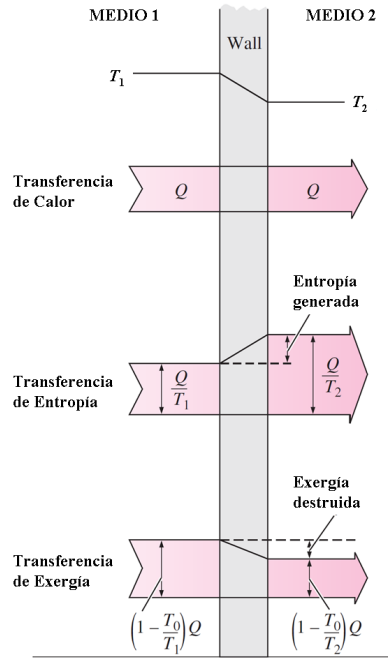


Figura 3.8: La figura grafica el comportamiento de una transferencia de calor desde el punto de vista energético y exergético. Se puede ver que para una transferencia de calor la energía transferida se mantiene, sin embargo el proceso lleva asociada una generación de entropía (irreversibilidad) y por consiguiente una destrucción de exergía. Claramente la transferencia de calor no se puede efectuar en sentido inverso al mostrado en la figura, sin mediar un trabajo externo.

Transferencia de Exergía por masa, m. Cuando una cantidad de masa m entra o sale de un sistema, va acompañada de una exergía:

$$E_{x,m} = m\psi \tag{3.25}$$

Donde $\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz$. Así, la exergía del sistema aumenta en $m\psi$ cuando una masa m entra, y disminuye en la misma cantidad cuando la masa m , en el mismo estado, sale.

El flujo de exergía asociado al flujo de un fluido, cuando las propiedades del fluido son variables, puede determinarse por integración,

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x,m} &= \int_{A_c} \psi \rho V_n dA_c \\ E_{x,m} &= \int \psi \delta m = \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}_{x,m} dt \end{aligned} \tag{3.26}$$

Podemos notar que la transferencia de exergía por calor, $E_{x,Q}$, es cero para sistemas adiabáticos, y que la transferencia de exergía por masa, $E_{x,m}$, es cero para sistemas cerrados. La transferencia de exergía total para sistemas aislados es cero dado que ellos no involucran transferencias de calor, trabajo o masa.

Principio de disminución de exergía y destrucción de exergía

A partir del *principio de conservación de la energía*, se sabe que la energía no puede crearse ni destruirse durante un proceso. De la segunda ley, se extrae el *principio de aumento de la entropía*, el cual dice que la entropía puede crearse, pero no destruirse. Es decir, la generación de entropía, S_{gen} , debe ser positiva (proceso real) o cero (proceso reversible), pero no puede ser negativa.

La contraparte al principio de la entropía es el *principio de disminución de la exergía*. Si se considera un proceso en un sistema aislado, no existirá transferencia de energía o entropía (cualquier sistema y su entorno pueden ser encerrados por un límite lo suficientemente grande para constituir un sistema aislado), por lo que podemos expresar los balances de energía y entropía como sigue:

Balance de Energía:

$$E_{in}^{\nearrow 0} - E_{out}^{\nearrow 0} = \Delta E_{sistema} \rightarrow 0 = E_2 - E_1 \quad (3.27)$$

Balance de Entropía

$$S_{in}^{\nearrow 0} - S_{out}^{\nearrow 0} + S_{gen} = \Delta S_{sistema} \rightarrow S_{gen} = S_2 - S_1 \quad (3.28)$$

Multiplicando 3.28 por T_0 y restándola a 3.27 se obtiene

$$-T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1) \quad (3.29)$$

Del balance de exergía de un sistema tenemos

$$\begin{aligned} (E_{x,2} - E_{x,1}) &= (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1)^{\nearrow 0} - T_0(S_2 - S_1) \\ &= (E_2 - E_1) + T_0(S_2 - S_1) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Combinando las ecuaciones 3.29 y 3.30 se tiene

$$-T_0 S_{gen} = E_{x,2} - E_{x,1} \leq 0 \quad (3.31)$$

Como T_0 es la temperatura termodinámica (en grados Kelvin), por lo tanto positiva, y $S_{gen} \geq 0$, entonces $T_0 S_{gen} \geq 0$. Se concluye entonces que

$$\Delta E_{x,aislado} = (E_{x,2} - E_{x,1})_{aislado} \leq 0 \quad (3.32)$$

Se observa de esta ecuación que la exergía de un sistema aislado siempre decrece durante un proceso, o en el caso límite de un proceso reversible, se mantiene constante. En otras palabras, la exergía nunca aumenta y es destruida durante un proceso real. Esto se conoce como el principio de disminución de exergía.

Destrucción de exergía, o pérdida de potencial exergético

Las irreversibilidades generan entropía, y lo que genera entropía siempre destruye exergía. La exergía destruida es proporcional a la entropía generada, como se aprecia en la ecuación 3.31, y se expresa como

$$E_{x,dest} = T_0 S_{gen} \geq 0 \quad (3.33)$$

La exergía destruida representa la pérdida de potencial para realizar trabajo, se conoce también como *trabajo perdido*.

Las ecuaciones 3.32 y 3.33 pueden aplicarse a cualquier tipo de sistema que realice cualquier proceso ya que cualquier sistema y su entorno puede ser encerrado por un límite lo suficientemente grande para constituir un sistema aislado.

Por último, para un sistema cualquiera podemos escribir la ecuación general del balance de exergía.

$$\sum E_{x,in} - \sum E_{x,out} - E_{x,destruida} = \Delta E_{x,sistema} \quad (3.34)$$

Este balance puede mejorar y hacer más completo el análisis de algunos procesos, y mejorar su comprensión desde el punto de vista del uso de la energía

3.6 Balances de energía térmica de la piscina

Es necesario conocer el balance de energía térmica y las pérdidas de calor presentes en la piscina. Las pérdidas de calor que deben ser consideradas para mantener las condiciones térmicas de la piscina se muestran a continuación.

3.6.1. Pérdidas por evaporación

La evaporación es una parte importante en la pérdida total de calor. Está además ligada directamente con la velocidad del viento en la superficie del agua. La evaporación queda definida por:

$$W_p \left[\frac{kg}{s} \right] = \frac{A}{Y} (p_w - p_a) (0,089 + 0,0782V) \quad (3.35)$$

Donde W_p es la tasa de evaporación, en función de:

- A : Área de la superficie de la piscina [m^2]
- Y : calor latente de evaporación a la temperatura del agua [kJ/kg].
- p_w : Presión de saturación de vapor a la temperatura en la superficie del agua en [kPa].
- p_a : Presión de vapor en el aire en [kPa].
- V : velocidad del aire en la superficie del agua en [m/s].

La pérdida de calor por evaporación $Q_{ev}[kW]$ se calcula entonces como sigue:

$$Q_{ev} = W_p \cdot Y \quad (3.36)$$

3.6.2. Pérdidas por conducción

La piscina perderá calor a través de sus paredes de contención del agua hacia el suelo. Esta pérdida puede verse aumentada en situaciones en que exista alguna corriente subterránea cercana a la piscina y un suelo muy húmedo.

En condiciones normales, podemos estimar las pérdidas por conducción utilizando la fórmula clásica para este tipo de transferencia de calor.

$$Q_c = UA\Delta T \quad (3.37)$$

Donde $U[kW/m^2K]$ es el coeficiente global de transferencia de calor de los muros, A el área total de las paredes y el fondo y ΔT la diferencia de temperatura entre la piscina, T_p , y el suelo, T_{suelo} .

3.6.3. Pérdidas por purga de agua

Se debe proveer agua fresca para mantener el volumen de agua y las condiciones higiénicas de la piscina. El calor necesario para el agua de reposición $Q_{rep}[kW]$ puede ser estimado con la siguiente fórmula.

$$Q_{rep} = \frac{c_p \cdot q_b \cdot (T_p - T_f)}{3600 \cdot t_{op}} \quad (3.38)$$

En esta ecuación, c_p corresponde al calor específico del agua ($4,187[kJ/kg^\circ C]$), q_b es el flujo de agua fresca diaria, T_f es la temperatura del agua fresca y t_{op} son las horas de operación de la piscina.

3.6.4. Transferencia de calor por radiación

Podemos estimar la transferencia de calor por radiación a partir de la ecuación

$$Q_{rad} = h_{rad} A (T_s - T_{sur}) \quad (3.39)$$

Donde A es el área de la superficie de la piscina, y h_{rad} es el coeficiente de transferencia de calor por radiación y se define como:

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (3.40)$$

T_s es la temperatura de la superficie que irradia y T_{sur} la temperatura del entorno [12].

3.6.5. Transferencia de calor por convección

La convección en la superficie del agua de la piscina, $Q_{conv}[kW]$ estará dada por [15]

$$Q_{conv} = (3,1 + 4,1v_a)(T_p - T_{aire}) \frac{A}{1000} \quad (3.41)$$

Donde v_a corresponde a la velocidad del viento en en la superficie de la piscina, T_p y T_{aire} las temperaturas de la superficie del agua y del aire respectivamente, y A el área de la superficie de la piscina.

De esta forma, la sumatoria de todas las pérdidas individuales nos entrega la pérdida total de calor desde la piscina.

3.7 Condiciones ambientales

Es necesario conocer las condiciones ambientales del lugar donde se evaluará el proyecto. La temperatura T_{amb} y la humedad relativa HR del ambiente se obtuvieron de la base de datos de *RETScreen International*, siendo estos datos apropiados para la evaluación de este tipo de proyectos. La temperatura del agua de la red se obtiene del promedio de temperatura ambiente de los tres meses anteriores [16]. Es necesario revisar esta información dependiendo del lugar donde se quiera evaluar un proyecto de estas características.

	$T_{red}[^{\circ}C]$	$T_{amb}[^{\circ}C]$	$HR[\%]$
ENERO	17,2	20,7	55,7
FEBRERO	19,4	20,1	58,7
MARZO	20,3	18,1	64
ABRIL	19,8	14,4	71,2
MAYO	17,7	10,7	79,8
JUNIO	14,7	8,7	83,7
JULIO	11,6	7,9	84,2
AGOSTO	9,5	9,4	81,1
SEPTIEMBRE	9,2	11,6	77,4
OCTUBRE	10	14,5	69,9
NOVIEMBRE	12	17,2	61,9
DICIEMBRE	14,6	19,8	57

Tabla 3.4: Condiciones del ambiente y temperatura del agua de la red.

CASO PARTICULAR: PISCINA ACUAVITA

4.1 Piscina Municipal de Vitacura

La piscina *Acuavita*, dependiente de la Municipalidad de Vitacura, se encuentra ubicada en la calle Cleveland #8612, comuna de Vitacura (ver figura 4.1).



Figura 4.1: Ubicación piscina Acuavita

Este recinto funciona durante todo el año, y siempre en condiciones de piscina templada. El agua de la piscina se encuentra a una temperatura de 28°C, para lo cual actualmente se utiliza un sistema de calefacción eléctrico, compuesto por bombas de calor y calefactores de inducción con el fin de temperar el agua a las condiciones requeridas. Además, la piscina se encuentra techada, lo que permite entregar al usuario un ambiente apto para la práctica deportiva, como también proteger el recinto de la intemperie. La piscina tiene 25 metros de largo por 18 metros de ancho, con una profundidad media de 1,4 metros. Por otra parte, el recinto cuenta con camarines que requieren de agua caliente sanitaria para su operación.

En la figura 4.2 se ve una vista aérea del recinto, demarcado por las líneas anaranjadas. Se puede ver la estructura que cubre la piscina, y en el cuadro rojo, se muestra el área sobre los camarines, oficinas y sala de máquinas donde sería factible la instalación de los colectores, sin interferir los sectores al aire libre ni la estructura que cubre la piscina.



Figura 4.2: Vista aérea del recinto.

4.2 Sistema actual de calefacción y climatización

En primer lugar es necesario identificar los equipos y como estos van interconectados en el sistema. En caso de tener acceso a los planos, *P&IDs* u otro documento, es conveniente revisarlos y chequear con el sistema instalado. En este caso particular no se tuvo acceso a estos planos, sin embargo, fue posible elaborar un diagrama a partir de visitas al recinto. Este diagrama se puede ver en la figura 4.3.

En el diagrama de la figura 4.3 se pueden distinguir tres sub-sistemas:

Piscina: La temperatura del agua se debe mantener alrededor de los 28°C, por lo tanto hay que suplir las diferentes pérdidas de calor que afectan este sub-sistema.

Aire: Además del agua, el ambiente inmediato de la piscina (sector techado) debe mantenerse con condiciones de temperatura y humedad que no afecten el bienestar de los usuarios, tanto en comodidad como en aspectos de salud.

ACS: El recinto cuenta con duchas en el sector de camarines, que deben ser abastecidas con agua caliente sanitaria.

Un cuarto sub-sistema, corresponde a los calefactores de inducción, estos proveen de energía térmica a los tres sistemas antes nombrados, ya sea directamente como en el caso del calentamiento del aire, como a través de intercambiadores de calor de placa plana para el agua de la piscina y el agua caliente sanitaria.

Para comprender de mejor manera los sub-sistemas, estos se explican individualmente a continuación.

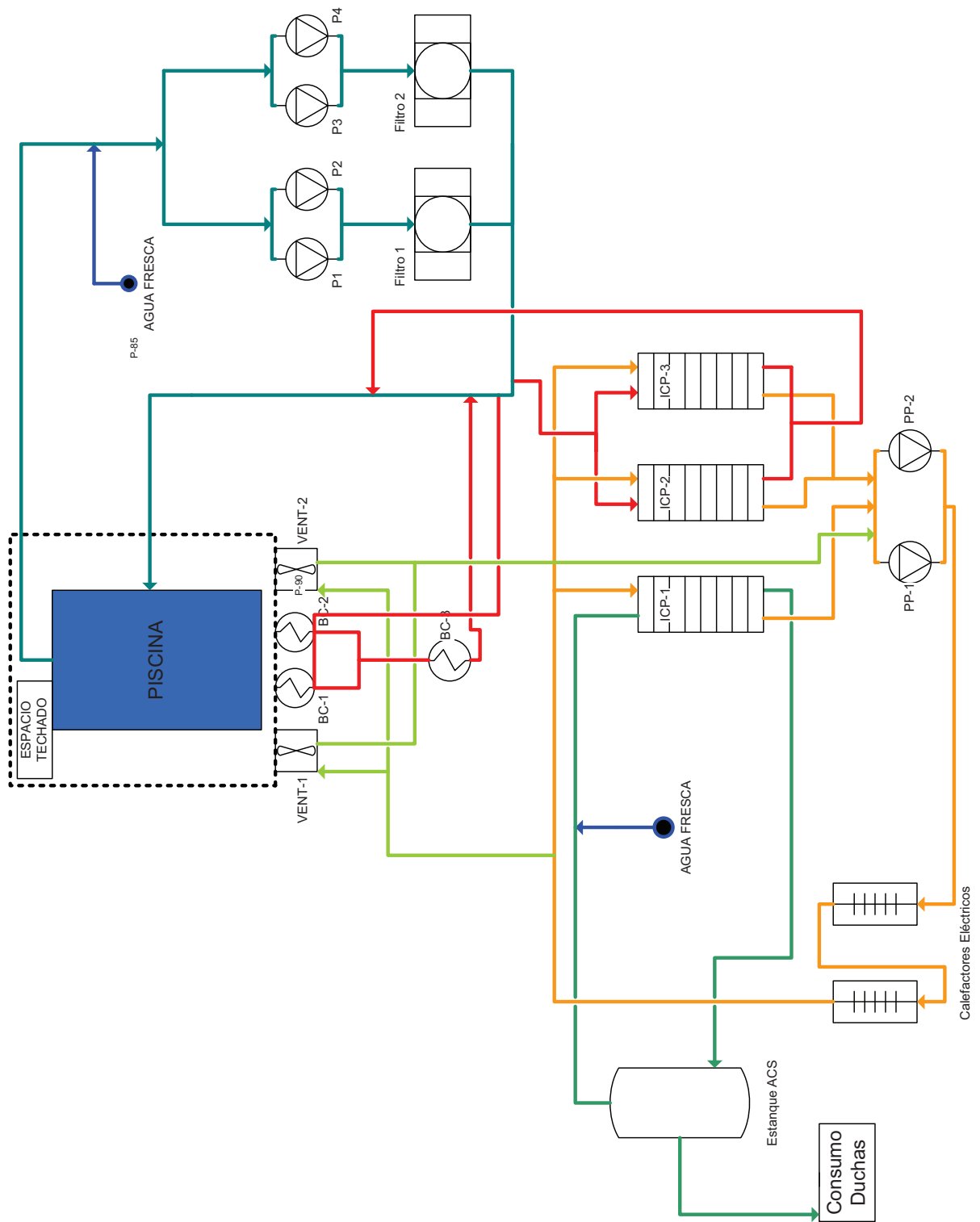


Figura 4.3: Diagrama del sistema actual

4.2.1. Potencia de equipos térmicos

En la tabla 4.1 se muestran las capacidades térmicas de los equipos del sistema. Se puede apreciar que el consumo eléctrico de los calefactores de inducción, *WIH-1* y *WIH-2*, es considerablemente alto en relación a las bombas de calor. Por otra parte, los intercambiadores de calor de placa, *ICP-1@3*, tienen una capacidad de transferencia enorme, sin embargo, actualmente estos equipos operan lejos de esa capacidad, transfiriendo del orden de $50[kW]$.

Equipo	Consumo Eléctrico [kW]	Potencia Térmica [kW]
BC-1	5,5	28
BC-2	7,3	33
BC-3	n/a	n/a
WIH-1	140	≈ 140
WIH-2	70	≈ 70
ICP-1	-	232
ICP-2	-	279
ICP-3	-	279

Tabla 4.1: Potencias de los equipos térmicos.

4.2.2. Sistema de calefacción de la piscina

El sistema de calefacción de la piscina incluye tanto el sistema de filtrado como el sistema de calentamiento del agua. Como se puede apreciar en la figura 4.4

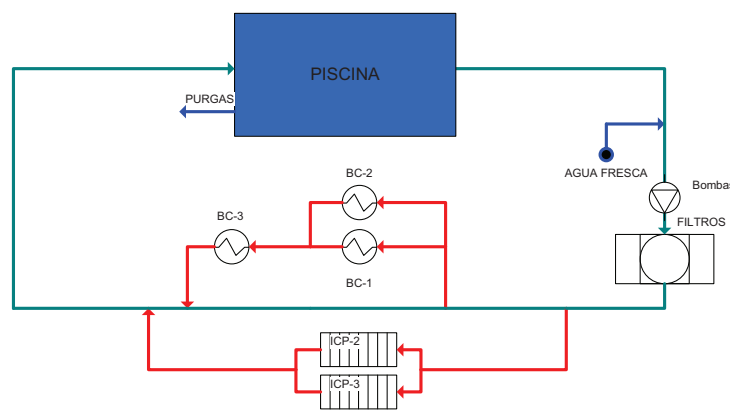


Figura 4.4: Sistema de calefacción de la piscina.

En este sistema, el agua que sale de la piscina pasa por el sistema de filtros, compuesto por cuatro bombas y dos filtros. Previo al sistema de filtrado se agrega agua fresca al circuito.

Luego de ser filtrada, el agua de la piscina se divide para pasar por un sistema de calefacción de ésta, compuesto por tres bombas de calor (*BC-1@3*) de diferentes capacidades, y por dos intercambiadores de calor de placa plana (*ICP-2@3*), estos últimos conectados a los calefactores por inducción. Luego, el agua es devuelta a la piscina a una temperatura adecuada que permita mantener la temperatura global de la piscina.

Las bombas de calor *BC-1* y *BC-2* extraen aire del espacio techado de la piscina, lo que sugiere a priori una recuperación del calor del recinto en el funcionamiento de estos equipos. Asimismo, asumiendo condiciones estables en este espacio techado se tiene que las bombas operan bajo condiciones constantes a lo largo del año. La bomba de calor *BC-3* se encuentra al aire libre, por lo que sus condiciones de operación están sujetas a las condiciones ambientales.

4.2.3. Circuito de calefacción del aire

La estructura que protege a la piscina permite generar un ambiente climatizado dentro de ésta, entregando bienestar a los usuarios y disminuyendo las pérdidas de calor de la piscina. El espacio cubierto cuenta con un sistema de ventilación que permite tanto recircular el aire como aportar aire fresco desde el exterior, y en caso de ser necesario aportar calor a éste para mantener las condiciones deseadas.

El serpentín de los ventiladores es alimentado con agua caliente proveniente de los calefactores de inducción en un circuito cerrado, es decir, la misma agua circula por el sistema.

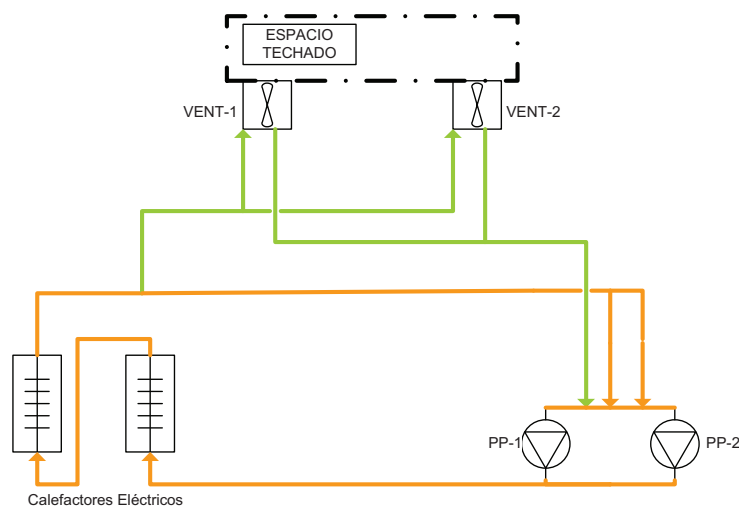


Figura 4.5: Sistema de calefacción del aire.

4.2.4. Circuito de agua caliente sanitaria para duchas

Este sistema permite acumular agua caliente para su posterior consumo en las duchas. Para esto, cuenta con un estanque aislado térmicamente con capacidad para 3500[l] de agua, que mantiene ésta a una temperatura entre 50 y 55[°C] (en las condiciones actuales). Como se ve en la figura 4.6, el agua del estanque recircula pasando por un intercambiador de calor *ICP-1*, cuya energía térmica es suministrada por los calefactores de inducción, previo aporte de agua fresca para rellenar el estanque. Al momento de evaluar el sistema modificado, se utilizará una temperatura del agua caliente sanitaria de 60[°C]

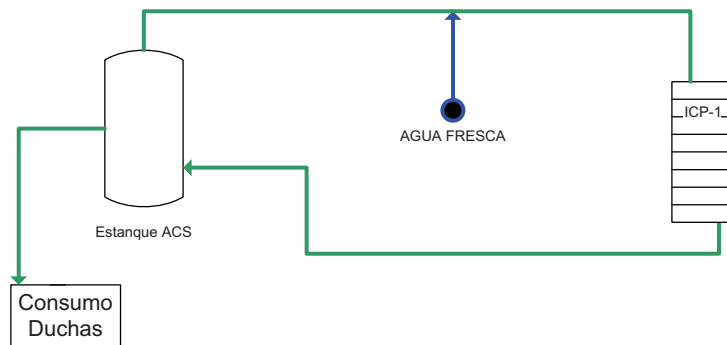


Figura 4.6: Sistema de agua caliente sanitaria.

Para conocer el comportamiento del sistema actual, es necesario realizar los balances de masa y energía correspondientes, los que servirán de base para luego realizar un análisis exerético.

En las distintas visitas a la piscina, se observó un funcionamiento poco regular de ésta, es decir, en cada visita se observaron variaciones en las aperturas de válvulas, en la temperatura del estanque de ACS, funcionamiento de las bombas de circulación, etc. Por este motivo, para elaborar los balances de masa y energía se recurrió tanto a información recopilada en el lugar, como a recomendaciones y normas en diferentes documentos [5] [6], que permitan establecer condiciones de operación acordes al sistema.

Los balances se realizaron en función de mantener las condiciones diarias requeridas para el funcionamiento de la piscina. Se utilizó para esto un promedio de operación para un día promedio de cada mes, según las condiciones ambientales vistas en el capítulo de antecedentes.

5.1 Condiciones de operación

La piscina opera con una temperatura del agua de 28°C . Además, se definieron los siguientes supuestos de operación:

1. Aporte diario de agua fresca (no recirculada) de $(1/30)$ del volumen total de la piscina [6]. Para esta piscina, la cantidad corresponde a $20[m^3]$, aportados durante las horas de operación. Este aporte no considera las pérdidas por evaporación.
2. Tasa de recirculación igual a 3, es decir, el total del volumen de la piscina debe recircular tres veces durante el día [6].

Además, se midieron las temperatura de entrada y salida del agua en los diferentes equipos, B.

En ausencia de elementos que permitiesen medir el flujo en las tuberías, se estimaron los caudales en base a las temperaturas medidas, las capacidades de los equipos, y las condiciones antes mencionadas.

5.2 Balances Sistema Piscina

5.2.1. Balance de masa

El balance de masa para la piscina incluye los flujos que se muestran en la figura 5.1a, se define el volumen de control como el volumen de agua de la piscina. En base a los supuestos antes nombrados, el balance de masa queda como se presenta en la siguiente tabla. El cálculo del flujo por evaporación se presenta más adelante.

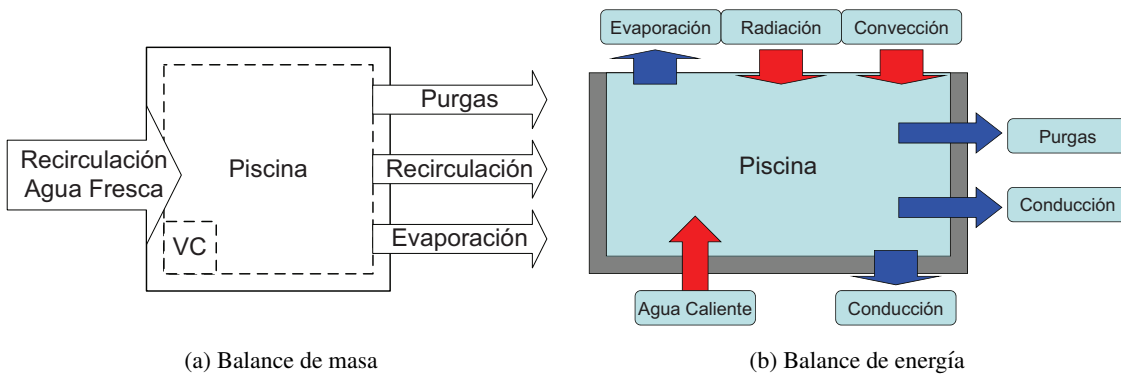


Figura 5.1: Balance de masa y energía para la piscina.

	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Evaporación		0,028
Purga		0,397
Agua Fresca	0,425	
Recirculación	20	20
Total	20,43	20,43

Tabla 5.1: Balance de masa para la piscina

Los flujos de calor correspondientes a la piscina ya han sido enumerados, en la figura 5.1b se pueden ver esquemáticamente estos flujos. A continuación se presentan los cálculos realizados para cuantificar estos flujos.

5.2.2. Evaporación

Para calcular la pérdida de calor por evaporación, es necesario en primer lugar calcular la tasa de evaporación de agua en la superficie de la piscina, según la ecuación 3.35.

Para evaluar esta ecuación, se asumieron condiciones ideales en el recinto que protege a la piscina, en base a los valores de la tabla 3.1 y la temperatura medida en la piscina, que corresponde a una temperatura del agua de 28[°C]. Así, los valores utilizados para estimar la evaporación se presentan en la siguiente tabla:

A	450	$[m^2]$
Y	2435	$[kJ/kg]$
p_w	3,78	$[kPa]$
p_a	2,133	$[kPa]$
V	0,05	$[m/s]$

Tabla 5.2: Valores de los parámetros para evaluar la evaporación de agua.

De esta forma, obtenemos que la tasa de evaporación es

$$w_p = 0,028[kg/s] \quad (5.1)$$

La pérdida de calor asociada a la evaporación corresponde a $Q = w_p \cdot Y$, luego

$$Q_{ev} = w_p Y = 0,028 \cdot 2435 = 68,98[kW] \quad (5.2)$$

5.2.3. Conducción

Las pérdidas por conducción corresponden al flujo de calor por las paredes y el fondo de la piscina hacia el suelo. A partir de la ecuación 3.37, asumiendo una temperatura de pared igual a la temperatura del agua, y una temperatura del suelo $T_s = 15[^\circ C]$, utilizamos un coeficiente de transferencia de calor $U = 0,567[W/m^2 K]$ y calculamos la transferencia de calor para el área total de las paredes y suelo de la piscina:

$$A = (Largo \cdot Ancho) + 2 \cdot Profundidad \cdot (Largo + Ancho)$$

$$A = 25 \cdot 18 + 2 \cdot 1,45 \cdot (25 + 18) A \approx 580[m^2] \quad (5.3)$$

Así, la pérdida de calor por conducción es:

$$Q_c = 4,28[kW] \quad (5.4)$$

5.2.4. Purgas

El agua de reposición corresponde al agua fresca que debe aportarse a la piscina para así mantener las condiciones de higiene. Como se vió en los supuestos, el Ministerio de Salud (MINSAL) establece que el agua de reposición debe ser al menos 1/30 del volumen total de agua que contiene la piscina diariamente, sin considerar las pérdidas por evaporación.

La energía asociada al calentamiento de este aporte de agua está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{rep} = \frac{c_p \cdot q_b \cdot (T_p - T_{red})}{3600 \cdot t} \quad (5.5)$$

El calor necesario para calentar el agua de reposición depende de la temperatura del agua de la red, por lo que varía a lo largo del año. Esta fluctuación se puede ver en la tabla 5.3 y gráficamente en la figura 5.2.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
17,9	14,3	12,8	13,6	17,1	22,1
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
27,2	30,7	31,2	29,9	26,5	22,2

Tabla 5.3: Pérdidas de calor por agua de reposición en [kW]

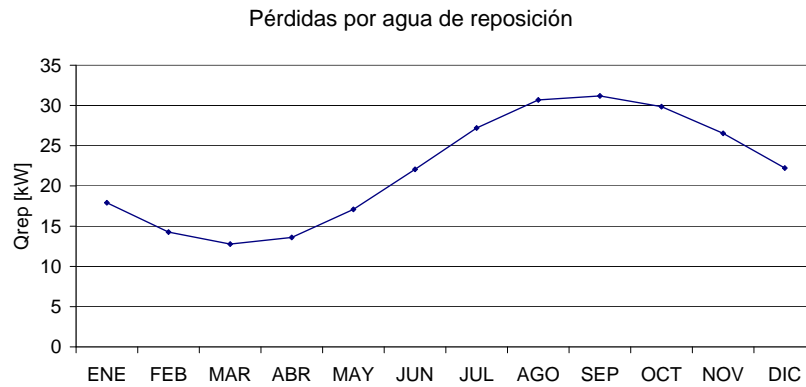


Figura 5.2: Pérdidas de calor por agua de reposición

5.2.5. Convección y Radiación

Dadas las condiciones de la piscina y del espacio cubierto, la convección y radiación son un aporte de energía a la piscina.

Entre estos dos ítems, la transferencia de calor hacia la piscina llega a 6,6[kW].

De esta manera, las pérdidas totales, dadas por la sumatoria de pérdidas individuales, se muestran en la siguiente tabla.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
84,6	80,9	79,4	80,3	83,7	88,7
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
93,9	97,3	97,8	96,5	93,2	88,9

Tabla 5.4: Total de pérdidas de la piscina [kW]

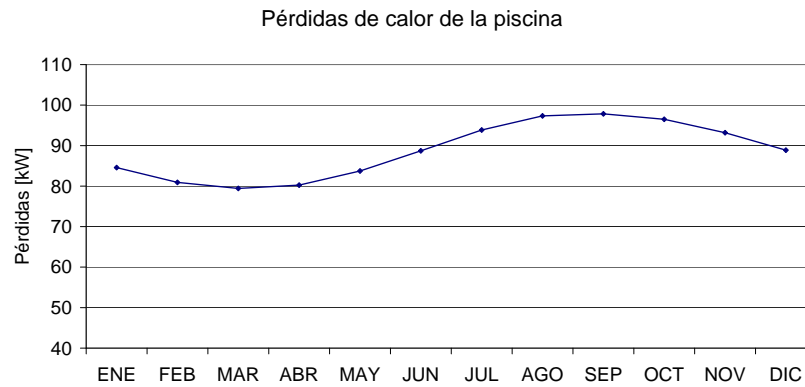


Figura 5.3: Total de pérdidas de la piscina.

Se puede apreciar que la evaporación corresponde a más del 70% del total de las pérdidas de calor de la piscina. Durante las horas del día, en que la piscina no está en operación, esta pérdida puede ser disminuida considerablemente mediante el uso de una cubierta. Esto permitiría que la carga térmica para calentar la piscina al día siguiente fuese considerablemente menor. Por ejemplo, considerando el volumen de agua de $600[m^3]$ y una pérdida de calor constante e igual a $90[kW]$, la piscina disminuiría su temperatura en $1[^\circ C]$ en un período de 8 horas. Si reducimos la pérdida en un 70%, la disminución de temperatura sería de sólo $0,3[^\circ C]$. Así, la energía necesaria para llevar la temperatura de la piscina a la temperatura de operación se reduce a un 30%.

Para aportar la energía necesaria a la piscina, se tiene el sistema presentado en la figura 4.4. Los aportes de energía al agua recirculante provienen de las bombas de calor *BC-1*, *BC-2* y *BC-3* y los intercambiadores de calor *ICP-2* e *ICP-3*. La energía aportada debe suplir tanto las pérdidas de la piscina como las pérdidas en el sistema de filtrado.

5.3 Balance del espacio cubierto

Como se ha mencionado anteriormente, el espacio techado debe cumplir con condiciones tanto de temperatura como de humedad. De acuerdo a lo medido en el lugar, y guiándose por las recomendaciones de la *ASHRAE*, se toma en cuenta una temperatura del aire interior $T_{aire} = 29^\circ C$ y una humedad relativa $HR = 55\%$.

Se consideraron los siguientes flujos para evaluar las pérdidas en el espacio techado, ver figura 5.4. El volumen de control corresponde al volumen cubierto, sin considerar el volumen de agua de la piscina.

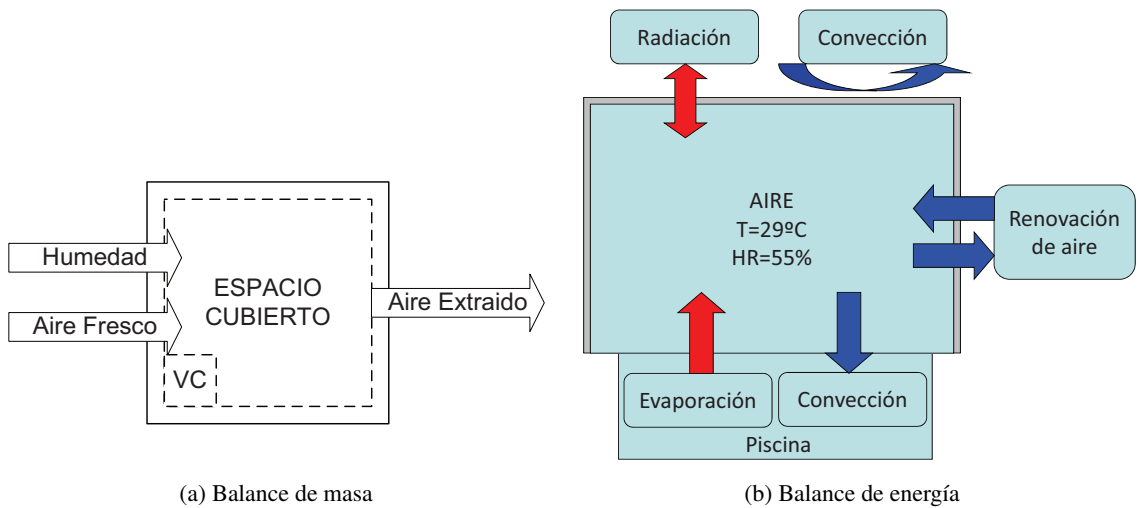


Figura 5.4: Balance de masa y energía para el espacio cubierto.

Se consideró como aire extraído al flujo que extraen las bombas de calor conectadas al espacio cubierto. Esta misma cantidad es el aire fresco que debe ingresar. En base a las características de las bombas de calor, esta cantidad de aire corresponde a $4,4[m^3/s]$. Esta cantidad además cumple con los cambios de aire recomendados, entre 4 y 6 cambios por hora.

Por otra parte, dadas las condiciones de aire dentro y fuera del recinto, se requiere de un aporte de humedad para mantener las condiciones en el espacio interior. Esta cantidad de humedad puede obtenerse de las tablas psicrométricas, sin embargo hay diversos programas computacionales que permiten realizar estos cálculos con mayor facilidad. Así, utilizando la versión de prueba del programa *EZAir Properties* se obtuvo la cantidad de humedad que se requiere a lo largo del año. En la figura 5.5 se puede observar la cantidad de humedad que se requiere a lo largo del año, y el aporte que significa la evaporación desde la superficie de la piscina.

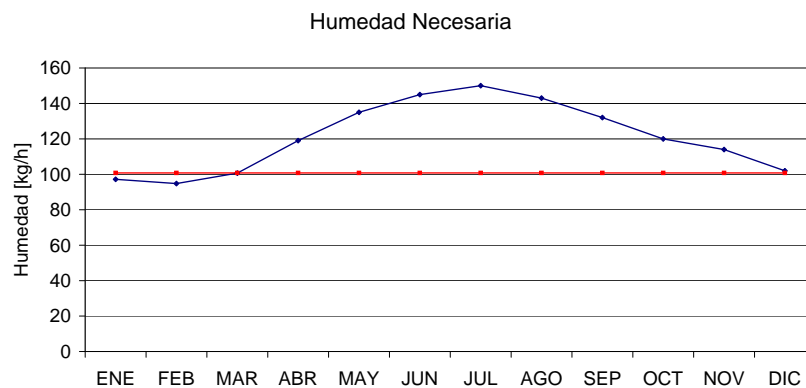


Figura 5.5: Humedad necesaria (curva azul) para mantener las condiciones dentro del recinto. La línea roja representa la humedad que aporta la evaporación de agua desde la piscina.

Luego, para calcular los flujos de energía en el espacio cubierto, como se observa en la figura 5.4b se tienen cinco componentes: radiación, convección externa, aire de reposición, convección interior y evaporación.

Radiación

La radiación puede ser una pérdida o una ganancia, dependiendo del momento del día. Durante las horas de Sol tendremos una ganancia por la radiación que llega al techo, esta ganancia fue calculada en base a la radiación solar media y al área de la cubierta.

Convección Externa

La infraestructura que cubre la piscina está sujeta a condiciones variables de viento, las cuales afectan directamente la transferencia de calor por convección hacia el ambiente.

Para calcular estas pérdidas, se utilizó la siguiente fórmula [17]

$$h_w = \frac{h_{w1} + h_{w2}}{2} [W/m^2K] \quad (5.6)$$

donde h_w es el coeficiente de convección para la estructura, h_{w1} corresponde al coeficiente de convección a barlovento ¹ y h_{w2} el coeficiente a sotavento ². Los coeficientes h_{w1} y h_{w2} se definen como.

$$h_{w1} = 7,4 + 4,0V_f \quad (5.7)$$

$$h_{w2} = 4,2 + 3,5V_f \quad (5.8)$$

donde V_f es la velocidad del viento, obtenida de la base de datos de *RETScreen*.

Aire de Reposición

Es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del aire fresco a la temperatura al interior. Nuevamente, esto se puede hacer en base a la diferencia de entalpía del aire, obtenida de una tabla psicrométrica, o se puede utilizar un programa ad-hoc. En este caso se utilizó nuevamente la versión de prueba del programa *EZAir Properties* para evaluar este requerimiento.

Evaporación y Convección Interior

Estos dos ítems fueron calculados en la sección anterior correspondiente al balance térmico de la piscina.

¹Barlovento: dirección desde donde viene el viento

²Sotavento: dirección hacia donde va el viento

Luego, partir de las ganancias y pérdidas expuestas, se calcula el balance energético total del recinto cubierto, el que se muestra en las figuras 5.6 y 5.7

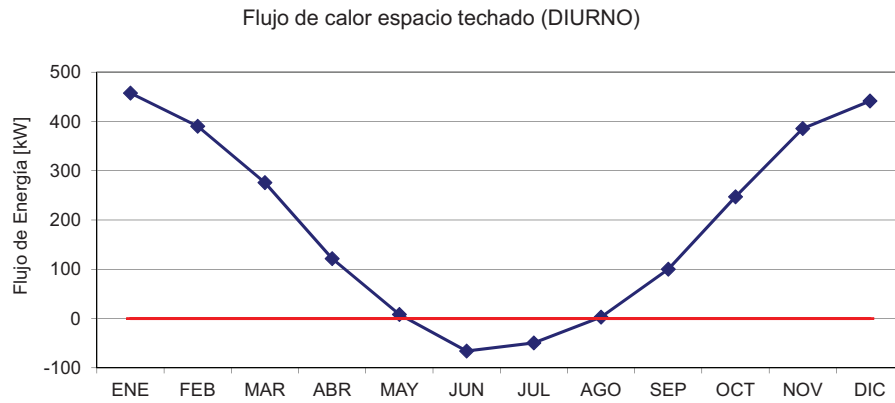


Figura 5.6: Flujo de calor en el espacio cubierto en régimen diurno.

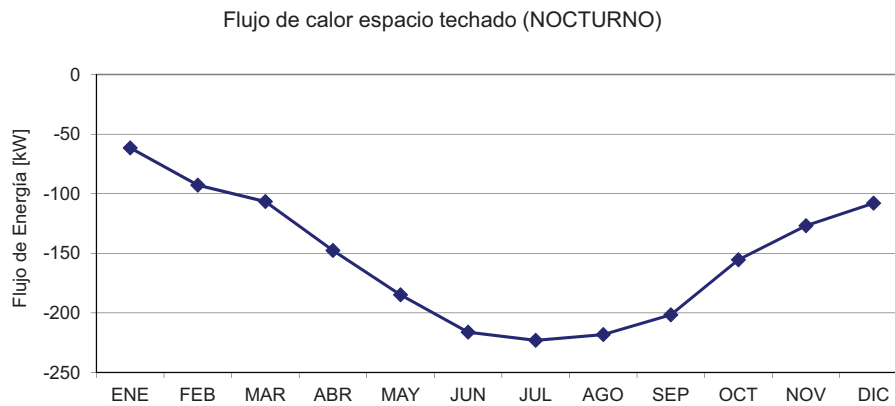


Figura 5.7: Flujo de calor en el espacio cubierto en régimen nocturno.

Podemos observar que en general durante el día existe una ganancia de calor, la cual puede ser regulada mediante una apropiada ventilación del recinto, incluso, durante los meses de verano es común ver los faldones laterales y ventanas abiertas, mientras que en los meses más fríos es necesario utilizar equipos para la calefacción. En los momentos del día en que no hay radiación (régimen nocturno), podemos ver una pérdida considerable de calor, sobretodo entre finales del otoño y comienzo de la primavera, sin embargo, la operación de la piscina se centra en horarios diurnos, lo que limita la carga térmica al sistema.

Las pérdidas de este sistema están por supuesto muy ligadas a lo que sucede en el exterior. Sin embargo, hay un potencial enorme de mejora ya que la aislación de la estructura es prácticamente nula, lo que hace fluctuar enormemente sus necesidades de acondicionamiento del aire, desde grandes ganancias de calor a grandes

requerimientos. Este aspecto no será tratado en este trabajo, ya que se centrará en la calefacción del agua mediante colectores solares.

5.3.1. Sistema Agua Caliente Sanitaria

El agua caliente sanitaria necesaria para cumplir los requisitos de uso se calculó en base a:

- Cantidad de usuarios por día. En base a la información recopilada en el lugar, se fijó en 400 personas.
- Cantidad de ACS necesaria por ducha. Dependiendo de las condiciones de agua de la red, se requerirá de una cierta cantidad de agua caliente para obtener la temperatura de agua deseada por el usuario. La temperatura de uso de la ducha se fijó en 40°C , a partir de mediciones realizadas.
- Tiempo de uso de las duchas. Se definió un tiempo $t_d = 4[\text{min}]$ por ducha, esto considerando que el objetivo de su uso es limpiarse del agua de la piscina, y no una ducha doméstica.

La cantidad de agua caliente necesaria durante el día se calcula realizando un balance de masa y energía para la mezcla de agua necesaria.

$$\dot{m}_f \cdot T_f + \dot{m}_c \cdot T_c = \dot{m}_T \cdot T_T \quad (5.9)$$

$$\dot{m}_f + \dot{m}_c = \dot{m}_T \quad (5.10)$$

Los subíndices f , c y T corresponden a los flujos de agua fría, caliente y total respectivamente. La cantidad total de agua caliente necesaria en un día es

$$M_c = \dot{m}_c \cdot t_d \cdot \text{Usuarios} \quad (5.11)$$

A lo largo del año la demanda de agua caliente varía como se observa en la tabla 5.5.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
8523	8118	7940	8040	8435	8936
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9388	9663	9701	9600	9333	8952

Tabla 5.5: Agua caliente sanitaria necesaria al día, en litros.

Para llevar esa cantidad de agua desde la temperatura del agua de la red a los 60°C requeridos, la energía necesaria se aprecia en la figura 5.8

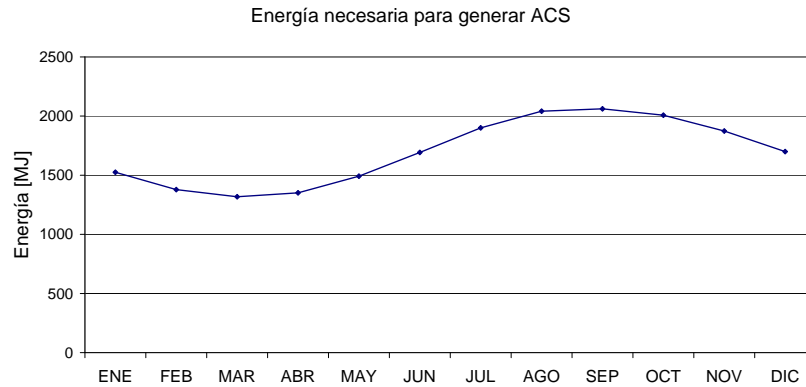


Figura 5.8: Energía para generar el ACS necesaria al día.

En las condiciones actuales, se observó que el sistema opera de la siguiente manera. Dado que el agua fresca que ingresa al sistema lo hace a una tasa menor que la salida de agua hacia las duchas, en los instantes en que estas son utilizadas, necesario contar con un estanque de acumulación. De acuerdo al flujo máximo de las bombas de recirculación del acumulador de ACS, y las temperaturas del intercambiador de calor correspondiente a este sistema, el flujo de agua fresca no supera los $0,2 - 0,3 [l/s]$ mientras que la salida hacia las duchas puede llegar a $1 [l/s]$. En la actualidad, la temperatura que alcanza el agua en el estanque no supera los $55^{\circ}C$, lo que, según lo visto en los antecedentes, no asegura la eliminación de la legionella.

Para la recirculación y aporte de agua fresca, el balance de masa es

$$\dot{m}_{rec} + \dot{m}_f = \dot{m}_{retorno} \tag{5.12}$$

En promedio, estos flujos serán

- $\dot{m}_{rec} = 0,8 [l/s]$
- $\dot{m}_f = 0,2 [l/s]$

A lo largo del año, estos flujos variarán en función de la temperatura del agua de la red y la energía necesaria para la generación de ACS. En consecuencia, el flujo medio que entra al estanque es $\dot{m}_{retorno} = 1 [l/s]$.

En base a esto, el requerimiento instantáneo de energía varía durante el año, pero en promedio este requerimiento es de $32,6 [kW]$.

El requerimiento de calor está dado por la cantidad de agua de la red que se requiere calentar, dado por la fórmula $Q = \dot{m}C_p\Delta T$. Al igual que en el caso del agua fresca para la piscina, el calor necesario para generar el agua caliente sanitaria variará durante el año.

ANÁLISIS EXERGÉTICO

Una vez realizados los balances de masa y energía en los diferentes circuitos del sistema, vemos los flujos de exergía asociados a éste. No se considera la energía mecánica necesaria para mover el fluido, luego, los flujos de exergía quedarán definidos por la ecuación 6.1 [18]. Para todos los cálculos de exergía, se utiliza la temperatura absoluta, es decir, en *Kelvin*.

$$\dot{E}_{x,in(out)} = \dot{m}c_p T_0 \left(\frac{T_{f,in(out)} - T_0}{T_0} - \ln \frac{T_{f,in(out)}}{T_0} \right) [kW] \quad (6.1)$$

La exergía ganada o perdida por un flujo queda dada por la diferencia $\dot{E}_{x,out} - \dot{E}_{x,in}$. La evaluación de esa ecuación resulta

$$\dot{E}_x = \dot{m}c_p T_0 \left(\frac{T_{f,out} - T_{f,in}}{T_0} - \ln \frac{T_{f,out}}{T_{f,in}} \right) \quad (6.2)$$

Esta ecuación es equivalente al cálculo de la exergía mediante la diferencia de entalpía y entropía.

Para la exergía correspondiente a los flujos de calor, se utiliza la ecuación

$$\dot{E}_x = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q [kW] \quad (6.3)$$

Donde T_0 es la temperatura de estado pasivo y T la temperatura a la cual se efectúa la transferencia de calor.

Para la electricidad, la exergía es igual a la energía eléctrica, dado que, en teoría, ésta energía se puede transformar totalmente en trabajo.

La temperatura T_0 será la menor entre la temperatura ambiente y temperatura del agua de la red en el año, de acuerdo a los datos presentados en el capítulo de antecedentes. En este caso, esta temperatura corresponderá a $T_0 = 7,9[^\circ C] \approx 281[K]$.

6.1 Sistema de calefacción Piscina

Se calcularon los flujos de exergía que entran y salen del sistema. Se consideraron los flujos que ingresan a través de los equipos térmicos (BC-1@3 e ICP-2@3) y las ganancias y pérdidas exergéticas de la piscina, se consideró además la exergía del flujo de agua fresca. En la figura 6.1 se resumen estos flujos. Los valores en azul corresponden a aportes de exergía, los rojos a pérdidas y los rojos subrayados a flujos de exergía que salen. La figura fig:exbal1 sigue el mismo esquema que la figura 4.4. En este caso, el bloque *Calefacción* comprende todos los equipos térmicos presentes en la figura 4.4, *BC-1@3 e ICP-2@3*, el bloque *Agua Fresca* corresponde a la inyección de agua fresca al circuito, y el bloque *Filtros* son las pérdidas térmicas por el paso del agua por el sistema de filtrado.

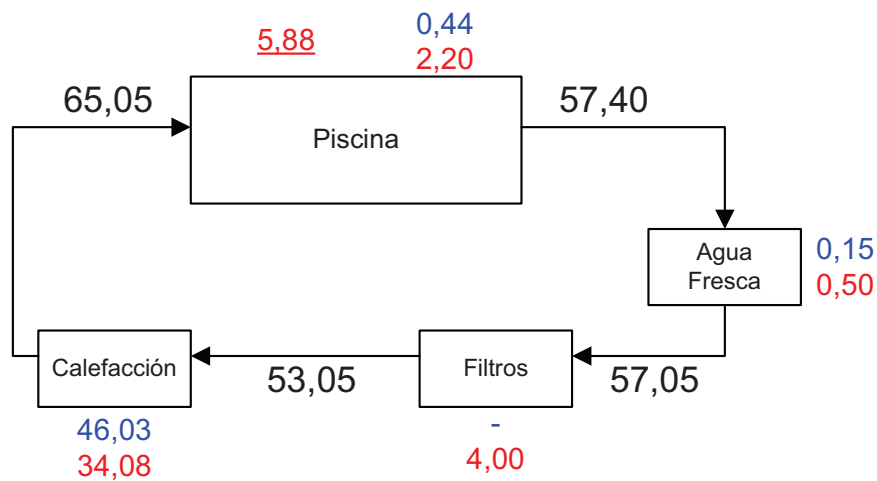


Figura 6.1: Balance de exergía para la piscina. Valores en [kW].

Los cálculos se realizaron en base a las condiciones utilizadas para los balances de energía térmica. Las pérdidas de exergía asociadas a la piscina son aquellas relacionadas a los flujos de calor de ésta. La exergía que sale del sistema, o exergía recuperable (valores subrayados), corresponde a los flujos de exergía por evaporación y purgas, que son los flujos de exergía que tienen opción de recuperarse en el proceso. Las pérdidas de exergía por la inyección de agua fresca son pérdidas por mezcla de flujos a diferentes temperaturas. En el caso del paso por el sistema de filtros, la pérdida de calor de ese paso tiene asociada una pérdida de exergía que es la que se muestra en el esquema.

Las pérdidas en el bloque de calefacción, corresponden tanto a pérdidas por mezclas de flujos a diferente temperatura como a pérdidas de exergía en los equipos térmicos utilizados.

La figura se basa en el balance exergético del sistema, dado por la ecuación:

$$\sum E_{x,in} - \sum E_{x,out} - E_{x,destruida} = \Delta E_{x,sistema} \tag{6.4}$$

Como el sistema opera en estado estacionario, la exergía del sistema no varía, así la ecuación se reduce a

$$\Sigma E_{x,in} - \Sigma E_{x,out} - E_{x,destruida} = 0 \quad (6.5)$$

Lo que se cumple para los valores de la figura. Luego, la eficiencia de este sistema está dada por

$$\eta_{II} = 1 - \frac{E_{x,destruida}}{E_{x,in}} \quad (6.6)$$

$$= 1 - \frac{40,78}{46,62} \quad (6.7)$$

$$= 12,5\% \quad (6.8)$$

Al incluir el rendimiento exergético de los calefactores de inducción en el balance anterior, se obtiene la eficiencia total de este sistema.

$$\eta_{II} = 2,93\% \quad (6.9)$$

Es decir, sólo podemos recuperar un 2,93 de la exergía que aportamos al sistema.

Cabe destacar que de las pérdidas exergéticas, más de un 10% está dado por la pérdida de exergía al mezclar flujos a alta y baja temperatura para obtener la temperatura deseada en el flujo final.

6.2 Sistema Agua Caliente Sanitaria

Como se vió en la figura 4.6, para producir ACS se ingresa agua fresca en la línea que recircula el agua del estanque hacia el intercambiador de calor. De esta manera, se utiliza energía y exergía del agua ya calentada para elevar la temperatura del agua proveniente de la red, más la energía que provee el ICP-1.

Para este análisis, tomaremos en cuenta que el agua caliente generada corresponde al aumento de exergía del sistema. No se considera el flujo de salida hacia los camarines, sino que el aumento de exergía corresponde al llenado del estanque. De esta forma, el balance queda como se ve en la figura 6.2. Los valores en azul corresponden a aportes de exergía, los rojos a pérdidas y los rojos subrayados a flujos de exergía que salen.

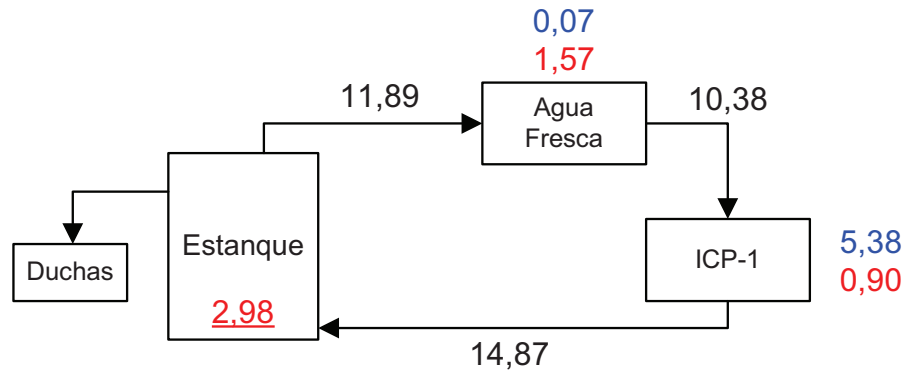


Figura 6.2: Balance exergético ACS. Valores en [kW].

Considerando la acumulación de exergía en el estanque, la ecuación de balance queda como:

$$\Sigma E_{x,in} - E_{x,destruida} = \Delta E_{x,sistema} \quad (6.10)$$

La eficiencia exergética se calcula como el aumento de exergía del sistema (exergía útil) versus el aporte de exergía:

$$\eta_{II} = \frac{\Delta E_{x,sistema}}{E_{x,in}} \quad (6.11)$$

$$= 1 - \frac{2,98}{5,45} \quad (6.12)$$

$$= 54,7\% \quad (6.13)$$

Nuevamente, esta eficiencia debe estar sujeta a la fuente de energía. Los calefactores de inducción tienen una eficiencia exergética del 16%. Dado que los calefactores y la producción de ACS están en línea, la eficiencia de este sistema queda

$$\eta_{II} = 0,547 \cdot 0,16 = 0,087 \quad (6.14)$$

Es decir, el sistema de producción de agua caliente sanitaria tiene una eficiencia exergética del 8,7%. En este caso, las pérdidas de exergía por mezcla de agua a diferente temperatura superan el 60% de las pérdidas.

6.3 Sistema completo

Podemos ejemplificar el sistema completo en base a los flujos de exergía que entran y salen de este, como se aprecia en la figura 6.3. Los flujos de entrada corresponden a los consumos que presenta el sistema, y que representan un gasto económico.



Figura 6.3: Flujos de exergía del sistema.

La exergía que entra como flujo de agua de la red se calcula como una exergía de flujo por el total de agua fresca que debe consumirse, es decir, el agua necesaria para producir ACS más el agua de reposición para la piscina. Con la ecuación 6.1, se calcula este flujo de exergía. En la figura 6.4 se puede ver este flujo a lo largo del año.

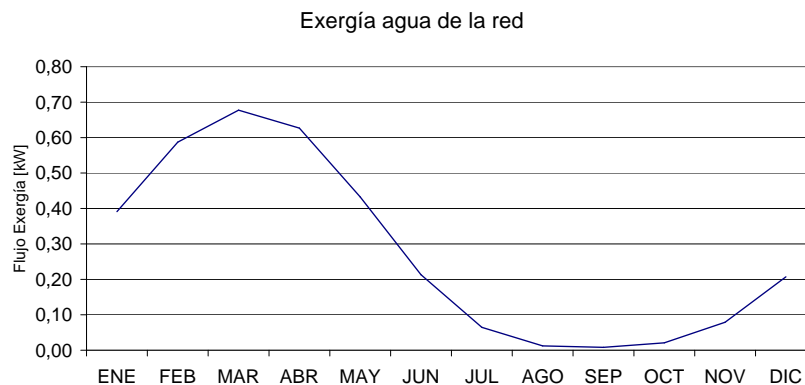


Figura 6.4: Flujo de exergía por agua de la red[kW].

El consumo eléctrico comprende las bombas de calor junto con los calefactores de inducción. El consumo de las bombas de calor será el mismo a lo largo del año, y será igual a $21[kW_{elect}]$. El consumo de los calefactores de inducción varía, pero es posible obtener un promedio de consumo eléctrico de $185[kW_{elect}]$, lo que se traduce en un consumo total de $206[kW_{elect}]$.

Se observa que el consumo de agua presenta un aporte de exergía marginal, por lo que la eficiencia se calculará en base al consumo eléctrico.

De los flujos salientes (productos) que se ven en la figura 6.3, la evaporación y las purgas son flujos de exergía recuperables en el proceso, y corresponden a $5,88[kW]$, de acuerdo a los flujos de la figura 6.1. El flujo de ACS son $2,98[kW]$, según los valores de la figura 6.2, totalizando $8,86[kW]$.

De esta manera, calculamos la eficiencia del sistema como

$$\eta_{II} = \frac{E_x \text{ productos}}{E_x \text{ aporte}} = \frac{8,86}{206} \approx 4,3\% \quad (6.15)$$

APORTE DE ENERGÍA SOLAR

Se observó que no sólo existe una pérdida exergética por la mezcla de un flujo frío y uno caliente, sino que el requerimiento exergético para elevar la temperatura de la mezcla es mayor que al elevar la temperatura del fluido frío por si solo. Luego de ver el origen de las pérdidas exergéticas en el sistema, se decidió atacar el problema eliminando aquellos puntos donde se pierde exergía por la mezcla de flujos a diferente temperatura.

Se estimaron las necesidades de agua caliente, tanto en cantidad como en temperatura.

Para el agua caliente sanitaria ya se han definido la temperatura requerida y la cantidad de agua que se necesita para cubrir la demanda diaria. Recordemos que se requiere una temperatura del agua de 60°C , la cantidad de agua caliente sanitaria se presenta nuevamente en la tabla 7.1.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
8523	8118	7940	8040	8435	8936
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
9388	9663	9701	9600	9333	8952

Tabla 7.1: Agua caliente sanitaria (60°C) necesaria al día en litros.

Por otra parte, sabemos que es necesario ingresar al menos $20000[l]$ de agua fresca a la piscina (AFP) diariamente, a esto hay que sumarle el agua que debe reponerse por la evaporación, $2500[l]$, en consecuencia, es necesario ingresar $22500[l]$ de agua fresca a la piscina. Si bien es una mayor cantidad de agua respecto al ACS, se requiere una menor temperatura.

En la figura 7.1 se aprecian las diferencias en los requerimientos de energía y exergía para generar tanto agua caliente sanitaria como para temperar el agua fresca de la piscina.

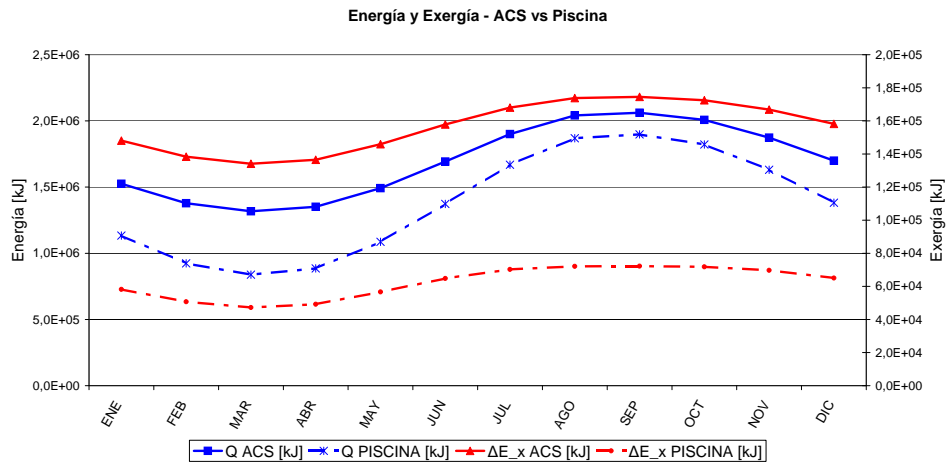


Figura 7.1: Requerimientos de energía ($Q_{ACS,PISCINA}$) y exergía ($\Delta E_x_{ACS,PISCINA}$) para calentar el agua de la red a $60^{\circ}C$. Valores en [kJ/día].

En la figura se puede ver que existe una gran diferencia en los requerimientos exergéticos. En promedio, el ACS requiere aproximadamente 1,2 veces la cantidad de energía que exige el agua fresca de la piscina, mientras que el aumento de exergía es 2,5 veces mayor para el ACS.

Se observó además que la eficiencia exergética de los colectores es mayor al calentar ACS que al calentar el agua fresca de la piscina. Esta eficiencia se calculó con la ecuación 7.1, [18].

$$\eta_{ex} = \frac{E_x}{A_c G_{x,t}} \quad (7.1)$$

Donde E_x es el aumento de exergía para el volumen total de agua, A_c es el área de colección, y $G_{x,t}$ es la exergía disponible de la radiación total diaria ¹. Se observó una eficiencia promedio del 7,5% para la generación de ACS versus un 4,1% para calentar el agua fresca de la piscina.

En base a esto, se priorizó el uso de los colectores en la generación de agua caliente sanitaria.

Así, se tabularon los requerimientos para ambos flujos desde Enero a Diciembre.

Se calculó en primer lugar la cantidad de colectores necesarios para cumplir individualmente las demandas de ACS y AFP, esto se realizó en base a las características de los colectores, la radiación y los requerimientos de agua y temperatura. Así, se generó una planilla (figura 7.2) que permite calcular la cantidad de colectores para cada mes.

¹ $G_{x,t}$: La razón entre la energía y la exergía de la radiación solar es $G_{x,t}/G_t = 0,933$, es decir, por cada unidad de energía se tienen 0,933 unidades de exergía

	ACS								
	T _{req} [°C]	60			T _m -T _{amb}	η _{col}	G disp	N° Colect	η _{II}
	ACS [l]	Q ACS [kJ]	ΔE x ACS [kJ]						
ENE	8.523	1.525.308	148.068	18	0,788	23.464	27	8,2%	
FEB	8.118	1.378.035	138.365	20	0,779	22.434	26	8,2%	
MAR	7.940	1.317.798	134.101	22	0,768	20.307	27	8,4%	
ABR	8.040	1.351.262	136.491	26	0,743	16.567	34	8,0%	
MAY	8.435	1.491.833	145.953	28	0,715	12.999	48	7,5%	
JUN	8.936	1.692.722	157.837	29	0,707	11.258	63	7,0%	
JUL	9.388	1.900.422	168.059	28	0,706	11.878	67	6,6%	
AGO	9.663	2.041.207	173.773	25	0,744	15.212	56	6,8%	
SEP	9.701	2.061.325	174.509	23	0,765	19.041	45	7,0%	
OCT	9.600	2.007.680	172.503	21	0,779	21.851	39	7,0%	
NOV	9.333	1.873.615	166.859	19	0,784	23.202	34	7,4%	
DIC	8.952	1.699.420	158.200	18	0,786	23.561	30	7,8%	

Figura 7.2: Tabla para estimar los requerimientos de energía, exergía y el número de colectores.

A partir de esta planilla y la correspondiente para el agua de la piscina, se obtiene la cantidad de colectores que se requerirían para cumplir con la demanda total. En la figura 7.3 se puede ver el número de colectores necesarios para cubrir las necesidades de ACS, AFP y total durante el año.

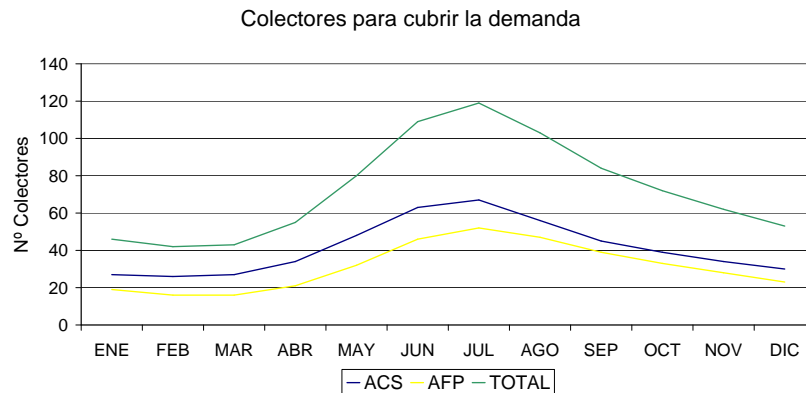


Figura 7.3: Cantidad de colectores necesaria para cumplir la demanda de agua caliente.

Podemos ver que si queremos cubrir la demanda completa del año, se necesitan 119 colectores, sin embargo, esta decisión recae en un claro sobredimensionamiento del sistema para el resto del año. Esto puede resultar en una solución poco rentable al tener una gran cantidad de colectores desocupados la mayor parte del tiempo.

Es necesario entonces buscar un criterio que nos permita estimar la cantidad de colectores bajo ciertos parámetros.

Dado que estamos frente a una decisión de inversión, se propone utilizar el método del valor actual neto, VAN,

comúnmente utilizado para evaluar proyectos y de gran utilidad en esta materia.

En base a esto, se generó una planilla de cálculo con la siguiente estructura.

	MES	
Nº Colectores	Ahorro ACS	Ahorro AFP
n_1	—	—
\vdots	—	—
n_2	—	—

Tabla 7.2: Planilla Nº Colectores vs Ahorro.

Esta planilla permite evaluar, mes a mes, el ahorro tanto en ACS como en AFP al utilizar un cierto número de colectores. Se completó la tabla para un año completo, desde Enero a Diciembre, para una cantidad de colectores entre $n_1 = 25$ y $n_2 = 70$ unidades. Este rango de evaluación puede ser modificado en esta planilla en función de los requerimientos del sistema y los resultados preliminares de cada caso.

Luego, se construye una tabla anual, que considera los ahorros como la suma de los ahorros mensuales, la inversión en función del número de colectores y el VAN para un período y una tasa a definir. La estructura de esta planilla se ve en la tabla 7.3.

El VAN se calculó como

$$VAN = -I_0 + VAN_{ahorros} \tag{7.2}$$

Donde I_0 corresponde a la inversión inicial en equipos y $VAN_{ahorros}$ el valor presente de los ahorros y se calcula como sigue, tomando como supuesto que los ahorros de un año se repiten el siguiente.

$$VAN_{ahorros} = f_p \cdot Ahorro_{year} \tag{7.3}$$

$$f_p = \left(\frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \right) \tag{7.4}$$

En esta ecuación, f_p es un factor que permite calcular el valor actual neto para flujos constantes, en función de la tasa de descuento r y el número de períodos n .

ANUAL			
#Colectores	Inversión (\$)	Ahorro (\$)	VAN (\$)
n_1	—	—	—
\vdots	—	—	—
n_2	—	—	—

Tabla 7.3: Planilla resumen anual.

Se consideraron los siguientes supuestos para elaborar la planilla

- 26 días de operación al mes.
- Una eficiencia $\eta = 98\%$ en la conversión de energía eléctrica a energía térmica, es decir, $W_{elect} = Q/\eta$.
- El precio del kWh_{elect} es constante e igual a \$90, según el contrato actual de la piscina con la empresa de distribución de electricidad.
- La tasa de descuento a utilizar es $r = 10\%$.
- Un horizonte de $n = 5$ años para la evaluación del proyecto.
- Los ahorros anuales son los mismos para cada año del proyecto.
- Se consideró un costo de \$800.000 por colector en base a la información obtenida de los distribuidores ².

Bajo estos supuestos, se completó la planilla y se resolvió para los tres colectores, *COL1*, *COL2* y *COL3*, nombrados al comienzo de este informe. La tabla 7.4 resume los resultados obtenidos. Se puede ver que el colector *COL1* presenta el mayor VAN, casi 7 millones mayor que el del colector *COL2*, sin embargo, este colector presenta un área de instalación (número de colectores por área total del colector) considerablemente mayor a los otros colectores. En la figura 7.4 se ve la curva del VAN que resulta para el colector *COL1* en función del número de colectores. No se consideró el costo de elementos tales como válvulas, estanques u otro elemento constructivo, esto ya que eso se asume como un costo aproximadamente fijo para todos los casos. Este costo no cambia el punto óptimo encontrado sino que desplaza la curva hacia abajo dependiendo del monto.

	# Colectores	Inversión [M\$]	VAN [M\$]	$A_{Total}[m^2]$
COL1	56	44.800	31.949	274,5
COL2	57	45.600	25.012	153,9
COL3	61	48.800	27.229	180,0

Tabla 7.4: Resumen cálculo de colectores.

²El costo incluye la instalación por colector. De acuerdo a la información recopilada, los costos de los diferentes colectores son del orden del costo considerado en la evaluación.

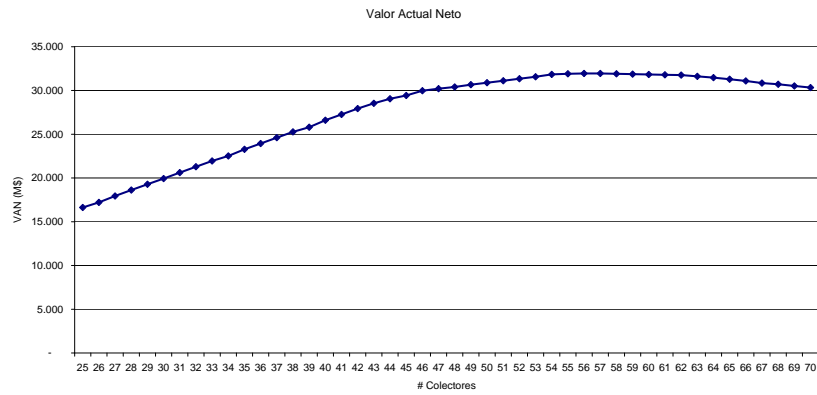


Figura 7.4: VAN según número de colectores para el sistema COL1.

7.1 Impacto de los colectores en el sistema

Dado que el área disponible para la instalación de colectores es suficiente para los tres resultados, seleccionamos el colector en base al VAN, de forma que se elige el sistema de colectores COL1, con 56 colectores. La figura 7.5 muestra el impacto de la cantidad de colectores seleccionados respecto a la demanda establecida anteriormente.

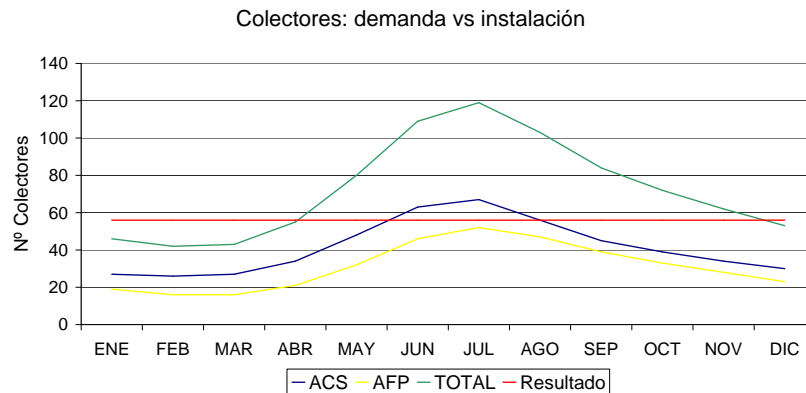


Figura 7.5: Demanda de colectores contra colectores instalados (línea roja).

De la figura 7.5 vemos que durante 5 meses el sistema de colectores aporta la totalidad de la energía necesaria para calentar el agua de la red demandada, y durante 10 meses es capaz de producir la totalidad del ACS. En terminos económicos, esto significa un ahorro aproximado de \$20.000.000 al año en la cuenta eléctrica, y una recuperación de la inversión en aproximadamente dos años y medio.

Este ahorro es el resultado de una menor utilización de los equipos térmicos, en particular de los calefactores por inducción que presentan el mayor consumo eléctrico. Como se ve en la figura 7.7, al utilizar el arreglo de colectores

para la producción de ACS, el ICP-1 sale de operación y por consiguiente se tiene un menor requerimiento de energía en los calefactores por inducción. El requerimiento baja además con el calentamiento en el sistema de colectores del agua de reposición para la piscina.

La tabla 7.5 muestra el porcentaje que es capaz de cubrir el sistema de colectores solares tanto para ACS como para AFP durante el año. Hay que recordar que se priorizó la generación de agua caliente sanitaria frente al agua fresca de la piscina debido a su mayor requerimiento tanto energético como exergético.

	ACS [%]	AFP [%]
ENE	100,0	100,0
FEB	100,0	100,0
MAR	100,0	100,0
ABR	100,0	100,0
MAY	100,0	24,2
JUN	89,8	0,0
JUL	84,4	0,0
AGO	100,0	0,0
SEP	100,0	26,8
OCT	100,0	51,7
NOV	100,0	77,2
DIC	100,0	100,0

Tabla 7.5: Aporte porcentual del sistema de colectores a los consumos requeridos.

7.2 Sistema de colectores solares

Atendiendo a las limitaciones técnicas de los sistemas de colectores solares, como el congelamiento del agua en las tuberías, se propone el esquema de la figura 7.6 para la instalación solar, donde el sistema de colectores funciona como un circuito cerrado utilizando un fluido de trabajo anti-congelante, que generalmente es una solución de agua con un fluido anticongelante (ej. Glycol).

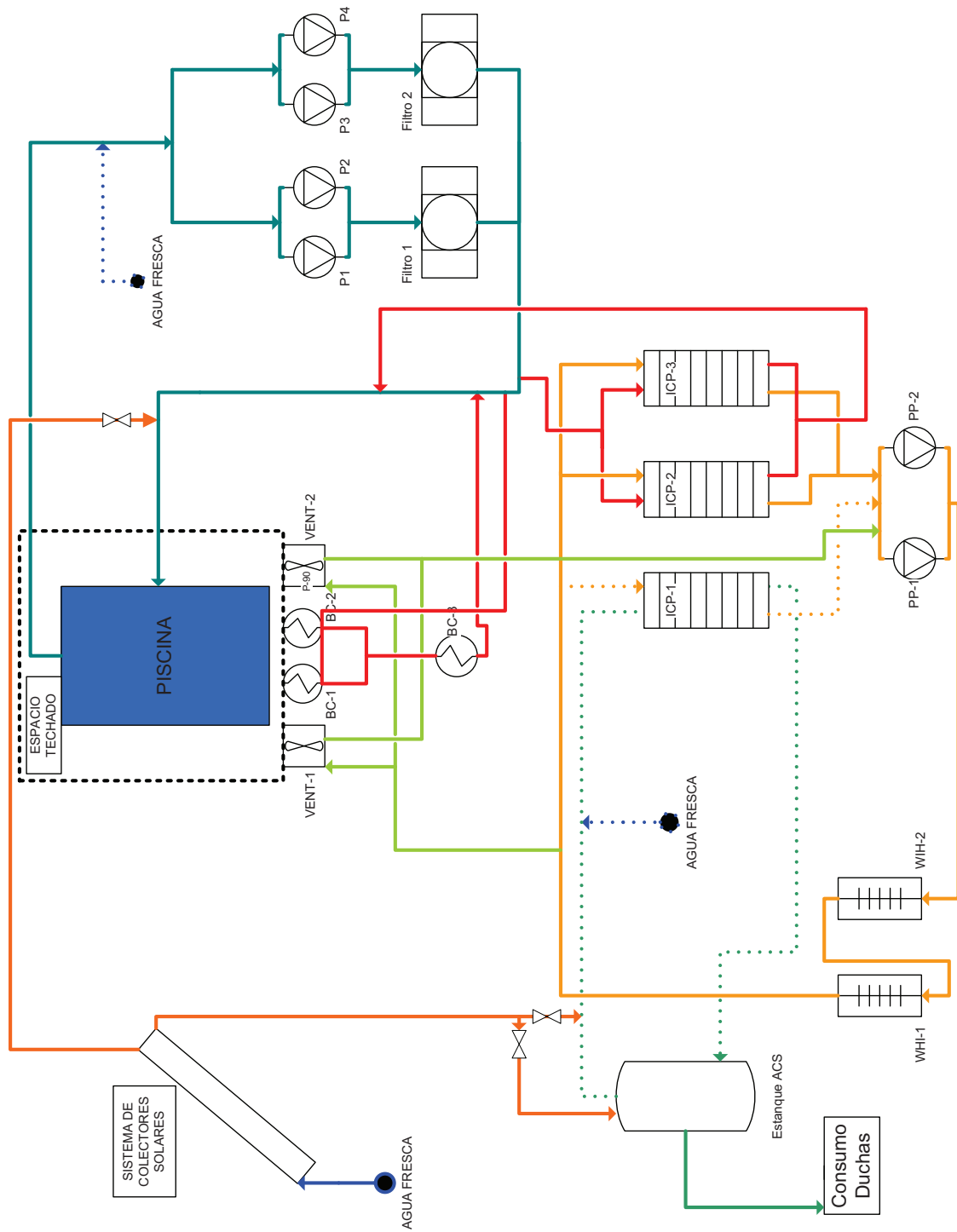


Figura 7.7: Diagrama con la inclusión de los colectores solares.

7.3 Impacto de los colectores en la exergía del sistema

Si bien se utilizó la eficiencia exergética de los colectores para priorizar su uso en el agua caliente sanitaria, no corresponde utilizar esta eficiencia para evaluar el impacto de los colectores en la piscina. Para evaluar este impacto, se considera que el agua caliente producida por los colectores es un suministro, por lo tanto no se analiza la eficiencia exergética de sus generación sino que se evalúa su uso directo (agua ya calentada) en el sistema.

7.3.1. Piscina

La nueva configuración contempla el aporte del agua fresca ya temperada mediante el sistema solar. Siguiendo la estructura del balance exergético anterior, vemos en la figura 7.8 el balance exergético para la nueva configuración.

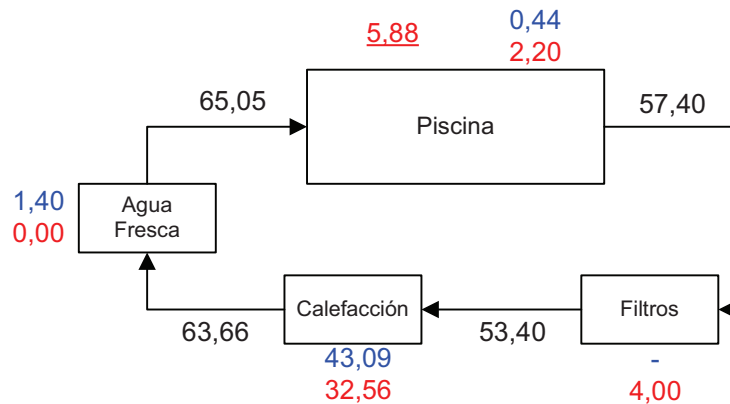


Figura 7.8: Balance exergético piscina con aporte solar. Valores en [kW].

De la figura se puede ver, en contraste con la situación anterior, figura 6.1, que en el punto de aporte de agua fresca ya no se observa una pérdida de exergía, ya que esta se inyecta aproximadamente a la misma temperatura que el flujo que va hacia la piscina. Además, el requerimiento exergético en el área de los calefactores es menor al ahorrarse las pérdidas de exergía por la diferencia de caudales en las configuraciones.

La eficiencia exergética se calcula como $1 - (\text{perdidas})/(\text{aporte})$. Luego,

$$\eta_{II} = 1 - \frac{38,66}{44,79} \approx 13,7\% \quad (7.5)$$

Si incluimos ahora el rendimiento de la calefacción eléctrica (calefactores inducción), tenemos que la eficiencia exergética total del sistema de la piscina es

$$\eta_{II} = 4,1\% \quad (7.6)$$

Podemos ver que tenemos un aumento en la eficiencia exergética desde un 2,93% a un 4,1%. Este aumento

en la eficiencia indica que estamos haciendo un mejor uso de los recursos, y que se han eliminado algunas de las irreversibilidades en el sistema, en particular, disminuyeron las pérdidas por mezcla de flujos de agua fría y caliente.

Para las ocasiones en que el sistema solar no sea capaz de aportar la totalidad del agua fresca a la piscina, la eficiencia exergética variará dependiendo del aporte solar realizado.

7.3.2. Agua caliente sanitaria

Dado que el agua caliente obtenida de los colectores se considera un suministro directo al sistema, no corresponde evaluar la eficiencia exergética de este sub-sistema, ya que, según lo evaluado anteriormente, podemos obtener casi la totalidad de este requerimiento a partir del sistema de colectores.

Sin embargo, al considerar la energía auxiliar que pudiese utilizarse para el ACS, vemos que en este caso esta energía se aplica directamente sobre el agua previamente calentada (hasta cierto nivel bajo los 60° cuando requiera energía auxiliar) y no contempla mezclas de flujos fríos y calientes. Así, la eficiencia exergética de esta energía auxiliar dependerá exclusivamente de su procedencia. Si utilizamos para este efecto los calefactores eléctricos por inducción, $\eta_{II} = 16\%$, a través de un intercambiador de calor, $\eta_{II} \approx 70 - 80\%$, la eficiencia exergética será del orden de un 12% , versus un $8,7\%$ del caso actual, supone claramente una mejora en el uso de la energía.

7.3.3. Sistema completo

Al igual que en el caso actual, calculamos la eficiencia exergética del sistema a partir de los flujos en la figura 7.9.



Figura 7.9: Flujos de exergía del sistema.

Incorporando el sistema de colectores solares, el consumo eléctrico disminuye a $145[kW_{elect}]$, mientras que el flujo exergético (ACS+AFP) es $4,6[kW]$, correspondiente a la totalidad del flujo diario dividido en las 14 horas de operación de la piscina. Los productos ACS, evaporación y purgas totalizan $9,05[kW]$. De esta forma, la eficiencia

exergética será:

$$\eta_{II} = \frac{Ex \text{ productos}}{Ex \text{ aporte}} = \frac{9,05}{149,6} \approx 6\% \quad (7.7)$$

Comparando con la eficiencia exergética del sistema actual de un 4,3% vemos un aumento de cerca de 2 puntos porcentuales. Este aumento en la eficiencia se da al disminuir el requerimiento exergético al sistema eléctrico y aportar directamente el agua caliente mediante el uso de colectores solares.

Como se vió en los balances de energía, la pérdida de calor por evaporación es la más importante dentro de las pérdidas de calor de la piscina, siendo sobre un 70% del total. Evitar o limitar esta pérdida supone un gran ahorro energético, pero como esto no es factible mientras la piscina está en uso, se recomienda utilizar una cubierta para la superficie del agua durante las horas en que la piscina no está abierta al público, algo que actualmente no es utilizado en este caso particular.

Por otra parte, se vió que por la estructura que cubre la piscina se tiene una no despreciable ganancia de calor durante los períodos con radiación solar (día), mientras que altas pérdidas en los períodos sin radiación (noche), mostrando la baja aislación térmica con el medio ambiente. La ganancia térmica durante el día no se consideró para este proyecto, sin embargo, sería interesante considerarla ya sea al renovar esta estructura o en algún proyecto de diseño de una nueva piscina techada.

Referente al análisis exergético. A diferencia de los sistemas de producción de energía, donde este análisis se realiza en base a un producto como la electricidad, el cual genera un retorno económico, analizar exergéticamente un sistema como el visto en este trabajo tiene como objetivo utilizar adecuadamente los recursos disponibles, sin significar necesariamente un beneficio económico directo ya que los productos en este caso no son comercializables. El costo de temperar la piscina y generar el ACS es en base a la energía eléctrica consumida, la cual no varía al disminuir pérdidas exergéticas, como por ejemplo la mezcla de flujos a diferente temperatura, que se vió generan una pérdida de potencial de trabajo (o destrucción de exergía).

Se observó que la pérdida de exergía por la mezcla de dos masas de agua a diferente temperatura es un factor que se repite a lo largo de la instalación y se generan pérdidas no despreciables, por lo que es conveniente evitar esas situaciones en las líneas de flujo. Se vió que para un equipo de calefacción eléctrica, con un rendimiento según la primera ley cercano al 100%, el rendimiento exergético es bajo, y que la misma potencia térmica se podría obtener con un equipo de menor consumo eléctrico (ciclo bomba de calor) o incluso con algún sistema de combustión exergéticamente más eficiente.

El beneficio económico que se obtiene, al incorporar los colectores solares, está ligado al ahorro energético por el menor uso de los equipos de calefacción del agua, tanto para el agua caliente sanitaria como para la piscina.

Al utilizar un criterio de inversión para calcular la cantidad de colectores necesarios, se pudo obtener una serie de datos (generando una curva) que permiten obtener un retorno económico máximo, sin embargo, dependiendo de la tecnología de colectores, *placa plana* o *heat-pipe*, el área de instalación puede variar considerablemente, por

lo que se debe considerar tanto el área disponible para la instalación como el beneficio económico.

El concepto de exergía en este tipo de sistemas puede aplicarse utilizando los distintos niveles de energía que se requieren a lo largo del sistema, y puede ser útil en un rediseño total o el diseño de una nueva piscina. Tomando en cuenta un sistema como el presentado en este trabajo, donde se utilizan intercambiadores de calor para entregar energía ya sea a la piscina, a la producción de agua caliente sanitaria o al acondicionamiento del aire, utilizando una misma fuente principal de energía; se puede analizar el uso secuencial o escalonado de la energía. Por ejemplo, dado que el ACS requiere de una temperatura de $60[^\circ\text{C}]$, y la piscina una temperatura inferior a $30[^\circ\text{C}]$, se puede diseñar el sistema de tal forma de utilizar la energía (exergía) disponible primero para producir ACS y luego para la piscina, de forma secuencial, como se hizo para el sistema de colectores solares, figura 7.6.

METODOLOGÍA PROPUESTA

A partir de lo realizado en este trabajo, se propone la siguiente metodología para replicar el estudio en otros casos, indicando algunos puntos que son importantes para considerar durante el proyecto.

1. **Levantamiento de la instalación de la piscina:** Identificar los equipos presentes en el sistema, así como la interacción de estos. Luego, generar un esquema que permita tener una visión global de lo que se quiere evaluar. Si se tiene acceso a los planos de construcción y diagramas de procesos de la piscina, revisar que estos concuerden con la instalación física.
2. **Recopilar información de operación del sistema:** Es importante conocer la temperatura de la piscina, las condiciones del aire interior en caso de ser una piscina techada, y las necesidades de agua caliente sanitaria del recinto. En el Anexo D se incluye un formulario con para guiar la información que debe ser recopilada.
3. **Operación de los equipos:** Ver las características técnicas de los equipos instalados. Medir temperaturas de entrada y salida en los equipos térmicos, medir o estimar los flujos de éstos.
4. **Realizar el balance de masa y de energía:** Identificar las pérdidas de calor de la piscina y los requerimientos de agua caliente sanitaria. En este trabajo se recopilaron y están disponibles las ecuaciones que permiten realizar este balance.
5. **Realizar el análisis exergético:** Identificar los flujos de exergía que entran y salen del sistema y las irreversibilidades
6. **Definir puntos de intervención solar:** Ver sus requerimientos energéticos y exergéticos y tabularlos.
7. **Criterio VAN como factor de decisión:** Para aplicar el criterio del VAN para definir la cantidad de colectores, generar la planilla descrita en la tabla 7.2 y luego totalizar esos datos en una planilla anual como la descrita en la tabla 7.3. Ambas tablas se completan en función del número de colectores lo que permite generar una curva *Nº Colectores vs. VAN* para encontrar el número de colectores que maximiza el retorno monetario. Generar esta tabla para diferentes modelos de colectores solares.
8. **Cantidad de colectores:** La planilla anual entrega como resultado la cantidad de colectores que maximiza el VAN para cada tipo o modelo de colector. El número de colectores permite además estimar el área de instalación necesaria. Así, en función del área disponible y el máximo retorno de la inversión, máximo VAN, se define la cantidad de colectores para el proyecto.
9. **Sistema modificado:** Una vez definido el número de colectores a utilizar, ver el comportamiento del sistema con la nueva configuración, estableciendo que equipos salen y/o disminuyen su aporte al sistema.

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES

Se generó una metodología de evaluación a partir de un análisis exergético y económico del sistema correspondiente a la piscina de Vitacura. Se recopiló además información importante sobre el funcionamiento de piscinas públicas, atendiendo a los requerimientos de bienestar y salud de sus ocupantes.

Se identificó la pérdida por evaporación como la de mayor importancia en la piscina. Se propone el uso de una cubierta para la piscina en sus horas fuera de servicio. Se observa un potencial de mejora en la infraestructura que cubre la piscina. Es importante para el diseño de piscinas cubiertas considerar una aislación adecuada con el exterior, de manera de disminuir los transientes, permitiendo generar condiciones más adecuadas en su interior.

El análisis exergético permitió conocer el comportamiento del sistema desde otro punto de vista, localizando los flujos y pérdidas de exergía. Se encontró que en general el rendimiento exergético es bajo, y está suscrito en parte a la eficiencia de los equipos térmicos utilizados.

De los flujos de exergía de la piscina, la evaporación es uno que tiene posibilidades de recuperación, en particular en este caso, las bombas de calor *BC-1* y *BC-2* extraen aire del interior del recinto de la piscina, recuperando parte de esta exergía para su operación. La exergía del aire que ingresa a las bombas tiene un impacto en su consumo eléctrico y las mantiene en un régimen de operación estable a lo largo del año.

Si bien el aporte solar no genera una ganancia exergética notoria, podemos suponer que existe un ahorro exergético aguas arriba del sistema, hacia las fuentes de generación de la energía eléctrica utilizada. Esta ventaja está dada por la utilización directa de energía solar para calentar el líquido, evitando pérdidas en procesos intermedios.

Se generó un método para evaluar la cantidad de colectores necesarios en base a criterios de inversión y requerimientos de energía térmica. Se utilizó el VAN (Valor Actual Neto) como criterio de selección.

En el sentido económico, la principal ventaja de los colectores es la fuente gratuita de energía en la que basan su funcionamiento. Si bien existe una fuerte inversión inicial, mediante el criterio del VAN aplicado se pudo observar que en un horizonte de 5 años, el sistema propuesto no solo recupera la inversión, sino que además genera importantes ahorros monetarios.

En cuanto a los tipos de colectores, se observó que los colectores *Heat-Pipe* presentan una mejor eficiencia y generan un mayor ahorro con una menor área de colección respecto a los colectores de *Placa Plana*. Sin embargo, se observó que la razón $(\text{área colección})/(\text{área total})$ en los primeros es significativamente menor que en los últimos,

lo que implica que aún cuando la cantidad de colectores sea menor, el área total necesaria para su instalación puede ser bastante mayor. Es necesario así establecer el área disponible para la instalación y considerarla en la selección de los equipos.

Como conclusión final se puede decir que la inclusión de un sistema de colectores solares, como apoyo a calefacción de agua, tiene un claro beneficio económico. El beneficio exergético puede ser discutible hacia el interior del recinto, sin embargo, la menor demanda de energía del sistema a la red eléctrica genera ahorros exergéticos aguas arriba. Si bien este ahorro puede ser marginal, podemos suponer que a mayor escala, los sistemas de calefacción de agua solar pueden ser un aporte a la eficiencia exergética global, y sin duda un aporte a mejorar la calidad del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sitio Web de la Ilustre Municipalidad de Vitacura. www.vitacura.cl
- [2] Sitio Web de la Piscina Municipal de Vitacura. www.piscinacuavita.cl
- [3] Sitio Web Empresa Energy Group S.A. www.energygroup.cl
- [4] www.planos.cl
- [5] ASHRAE, *2007 ASHRAE Handbook HVAC Applications*, Atlanta, USA, 2007
- [6] MINISTERIO DE SALUD, *Aprueba Reglamento de Piscinas de Uso Público, D.OFICIAL 08.11.03 N°209*, Santiago de Chile, 2002.
- [7] R. Román: *Apuntes del curso Conversión Térmica de la Energía Solar*, Universidad de Chile, 2008.
- [8] CNE, UTFSM, PNUD: *Irradiancia Solar en Territorios de la República de Chile*, Santiago de Chile, 2008.
- [9] Teletrece: Subsidio energía solar Accesado Mayo 2009.
- [10] Apricus: Heat-Pipe Accesado Mayo 2009.
- [11] M.J. Moran and H.N. Shapiro: *"Fundamentals of Engineering Thermodynamics: SI version"*, 5th ed., John Wiley & Sons Inc., West Sussex, 2006.
- [12] M.J. Moran, H.N. Shapiro, B. Munson, D. DeWitt: *"Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer"*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken (New Jersey), 2003.
- [13] Zheng Zuo: *Annual Energy Consumption Analysis and Energy Optimization of a Solar-Assisted Heating Swimming Pool*, Renewable Energy Resources and a Greener Future, Vol.VIII-1-3, GuangZhou, 2006.
- [14] Sitio Web del Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar. www.ise.fgh.de
- [15] J. Álvarez, J. Glaría: *Estudios previos para temperar una piscina*, Departamento de Electrónica UTFSM, Valparaiso, 2000.
- [16] H.C. Petersen *Elementos para la creación de un manual de buenas prácticas para instalaciones solares térmicas domiciliarias*, Memoria Ingeniería Civil Mecánica Universidad de Chile, Santiago, 2007.
- [17] J.A. Palyvos: *A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling*, Applied Thermal Engineering 28, 2008, pp.801 – 808.
- [18] V. Badescu: *Optimal control of flow in solar collectors for maximum exergy extraction*, Int. Journal of Heat and Mass Transfer 50, 2007, pp.4311 – 4322.

- [19] Farahat S et al., *Exergetic optimization of flat plate solar collectors*, Renewable Energy, 2008.
- [20] D. Rojas et al. Solar Energy 82, 2008, pp.746 – 757.
- [21] K. A. R. Ismail and M. M. Abogderah: Journal of Solar Energy Engineering, 1998, Vol. 120, pp.51 – 59.
- [22] A. Ucar and M. Inalli: *Thermal and economic comparisons of solar heating systems with seasonal storage used in building heating.*, Renewable Energy 33, 2008, pp.2532 – 2539.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS COLECTORES

A continuación se presenta un extracto de los informes técnicos de los colectores utilizados en este trabajo.

El primer extracto corresponde al colector *COL1*, el segundo al colector *COL2* y el tercero al colector *COL3*.



Test Report: KTB Nr. 2007-07-en

Collector test according to EN 12975-1,2:2006

for:

Jiangsu sunrain solar energy co. ltd , P.R. China

Brand name:

TZ58-1800

Responsible for testing:

Dipl.-Ing. (FH) K. Kramer

Date:

23rd March 2007

Address:

Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems ISE
Heidenhofstraße 2, D-79110 Freiburg
Tel.: +49-761-4588-5354; Fax.: +49-761-4588-9354
E-mail: korbinian.kramer@ise.fraunhofer.de
Internet: www.kollektortest.de

Accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2005



Registration No.:
DAP-PL-3926.00

4 Overview of series TZ58-1800 collectors

According to the SolarKeymark Scheme rules (version 8.0, January 2003) there is an agreement concerning collectors, which differ only in size, so called series or families. Only the biggest and the smallest collector have to be tested in this case. A complete collector test according to EN 12975-1,2 has to be performed at the biggest collector. The efficiency test only is sufficient at the smallest collector. The SolarKeymark label based on this tests is valid for the whole series.

(MS) = Manufacturer Specification

Brand name	test collector	number of tubes	length of tubes
TZ58-1800-10R	yes	10	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-12R	no	12 (MS)	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-14R	no	14 (MS)	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-15R	no	15 (MS)	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-18R	no	18 (MS)	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-20R	no	20 (MS)	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-24R	no	24 (MS)	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-25R	no	25 (MS)	1.800 m (MS)
TZ 58/1800-28R	no	28 (MS)	1.800 m (MS)
TZ58-1800-30R	yes	30	1.800 m (MS)

4.1 Specific data of the largest collector of the series (TZ58-1800-30R)

Brand name:	TZ58-1800-30R
Serial no.:	
Year of production:	2006
Number of test collectors:	1
Collector reference no. (ISE):	2 KT 57 001 102006 (function tests)
Total area:	2.025 m * 2.420 m = 4.901 m ²
Collector depth:	0.189 m
Aperture area:	1.710 m x 0.0544 m x 30 tubes = 2.791 m ²
Absorber area:	1.710 m x 0.0470 m x 30 tubes = 2.411 m ²
Weight empty:	106 kg
Volume of the fluid:	2,3 l (MS)

5 Collector efficiency parameters

5.1 Test method

Outdoor, steady state according to EN 12975-2:2006 (tracker)
Thermal solar systems and components - solar collectors,
Part 2: Test methods

5.2 Description of the calculation

The functional dependence of the collector efficiency on the meteorological and system operation values can be represented by the following mathematical equation:

$$\eta_{(G,(t_m-t_a))} = \eta_0 - a_{1a} \frac{t_m - t_a}{G} - a_{2a} \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \quad (1)$$

(based on aperture area)

$$t_m = \frac{t_e + t_{in}}{2}$$

where: G = global irradiance on the collector area (W/m^2)
 t_{in} = collector inlet temperature ($^{\circ}C$)
 t_e = collector outlet temperature ($^{\circ}C$)
 t_a = ambient temperature ($^{\circ}C$)

The coefficients η_0 , a_{1a} and a_{2a} have the following meaning:

η_0 : Efficiency without heat losses, which means that the mean collector fluid temperature is equal to the ambient temperature:

$$t_m = t_a$$

The coefficients a_{1a} and a_{2a} describe the heat loss of the collector. The temperature dependency of the collector heat loss is described by:

$$a_{1a} + a_{2a} * (t_m - t_a)$$

5.3 Efficiency parameters

Boundary conditions:

As the collector is constructed without a reflector or another defined reflecting backside, the efficiency measurements were performed by using a tarpaulin with a defined absorption coefficient of 83 %. This corresponds to typical absorption coefficients of common roof tile.

Test method:	outdoor, steady state
Latitude:	48.0°
Longitude:	7.8°
Collector tilt:	tracked between 35° and 55°
Collector azimuth:	tracked
Mean irradiation :	936 W/m ²
Mean wind speed:	3 m/s
Mean flow rate:	66 kg/h
Kind of fluid:	water
date of the Measurement	February 2007

Results:

The calculated parameters are based on following areas of the collector TZ58-1800-10R . These values are also valid for the complete series.¹:

aperture area of 0.936 m ² :	absorber area of 0.808 m ² :
$\eta_{0a} = 0.734$	$\eta_{0A} = 0.850$
$a_{1a} = 1.529 \text{ W/m}^2\text{K}$	$a_{1A} = 1.771 \text{ W/m}^2\text{K}$
$a_{2a} = 0.0166 \text{ W/m}^2\text{K}^2$	$a_{2A} = 0.0192 \text{ W/m}^2\text{K}^2$

The determination for the standard deviation (k=2) was performed according ENV 13025 (GUM). Based on this calculation the uncertainty is less than 2%-points of the efficiency values over the complete measured temperature range ($\eta_{0a} = 0.734 \pm 0.02$). Based on our experience with the test facilities the uncertainty is much smaller and in a range of **+/- 1%-point**. The standard deviation of the heat loss parameters resulting from the regression fit curve through the measurement points is:

$$a_{1a} = 1.529 \pm 0.0686 \text{ and } a_{2a} = 0.0166 \pm 0.0008 .$$

For more detailed data and the calculated efficiency curve please see annex B.

¹ absorber area - projected area of absorber tube,
aperture area - projected area of inner diameter of cover tube

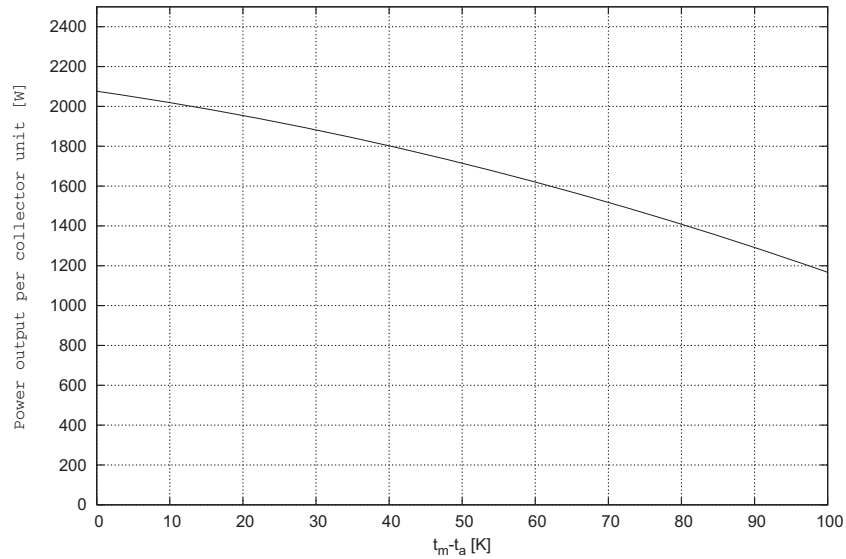


Figure 4: Power output for collector TZ58-1800-30R based on 1000 W/m²

Power output per collector unit [W] for collector TZ58-1800-30R
(aperture area of 2.791 m²):

$t_m - t_a$ [K]	400 [W/m ²]	700 [W/m ²]	1000 [W/m ²]
10	772	1387	2001
30	650	1264	1879
50	490	1105	1719

The power output per collector unit can be calculated for other collectors of this series according to the following procedure:

$$P = P_{ref} * \frac{A_a}{A_{a,ref}}$$

with:

- P = Collector output for a different collector of the series
- P_{ref} = Collector output for collector TZ58-1800-10R , (values see table)
- A_a = Aperture area of a different collector of the series
- $A_{a,ref}$ = Aperture area of collector TZ58-1800-10R = 0.936 m²

Solar Collector Factsheet

Jansen SchücoSol.CH



Model	SchücoSol.CH
Type	Flat plate collector
Manufacturer	Jansen AG
Address	Industriestrasse 34
	CH-9463 Oberriet
Telephone	+41 (0) 71 763 9256
Fax	+41 (0) 71 761 2738
Email	urs.mueller@jansen.com
Internet	www.jansen.com
Test date	07.2001

- Performance test EN12975
- Quality test EN12975

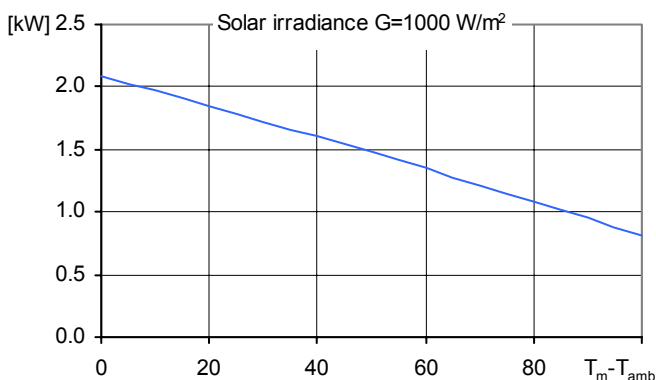


Dimensions		Technical data	
Total length	2.153 m	Minimum flowrate	20 l/h
Total width	1.254 m	Nominal flowrate	150 l/h
Gross area	2.700 m ²	Maximum flowrate	450 l/h
Aperture area	2.508 m ²	Fluid content	2.4 l
Absorber area	2.504 m ²	Maximum operating pressure	10 bar
Weight empty	59 kg	Stagnation temperature	197 °C

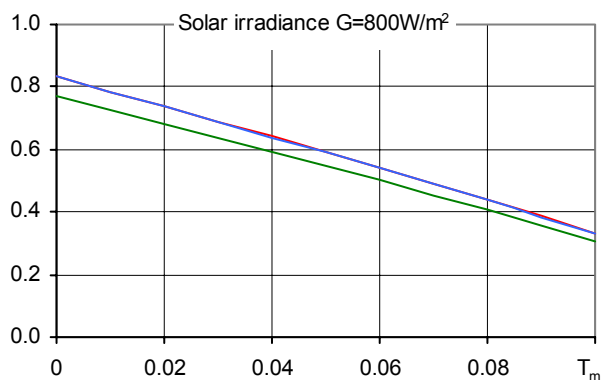
Types of mounting	Further information
<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Construction for sloping roof <input checked="" type="checkbox"/> Integration into sloping roof <input checked="" type="checkbox"/> On flat roof with stand <input checked="" type="checkbox"/> Facade 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Units in different sizes available <input type="checkbox"/> Glazing replaceable <p>Hydraulic connection Copper pipe, nominal diameter 12 mm</p>

Construction	
	<ul style="list-style-type: none"> 1 Sealing 2 Casing 3 Sealing profile 4 Connection feed-through 5 Hydraulic connection 6 Glazing 7 Absorber 8 Thermal insulation 9 Rear panel

Peak Power per collector unit W_{peak}



Relative efficiency η

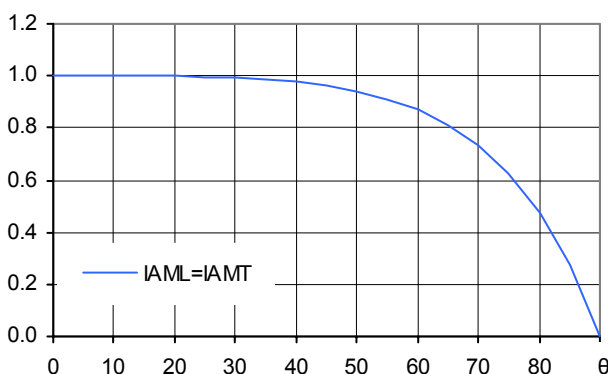


Peak Power W_{peak}	2086 W
Thermal capacity*	6.3 kJ/K
Flowrate during test	175 l/h
Fluid for test	Water-Glycol 33.3%

Reference	Gross	Aperture	Absorber
η_0	0.773	0.832	0.833
a_1 [$WK^{-1}m^{-2}$]	4.33	4.66	4.67
a_2 [$WK^{-2}m^{-2}$]	0.0039	0.0042	0.0042

*) Specific thermal capacity C of the collector without fluid, determined according to 6.1.6.2 of EN12975-2

Incident angle modifier IAM



K1, transversal IAM at 50°	0.94
K2, longitudinal IAM at 50°	0.94

Pressure drop Δp

Pressure drop at nominal flowrate
 $\Delta p = \text{-- Pa}$ ($T=20^\circ C$)

SPF Simulation of systems using Polysun

Short description of the system
Climate: Central Switzerland, orientation of the collectors: South,
Cold water 10°C, Hot water 50°

Surface demand** **Solar yield****
Number of collectors

Domestic hot water: $F_{ss}^* = 60\%$
Tank 450 l, collector inclination 45°,
Daily energy demand 10 kWh (4-6 persons)
Energy demand of the reference system 4200 kWh/year

5.02 m²
2.0 collectors 507 kWh/m²

Water pre-heating: $F_{ss}^* = 25\%$
2 Tanks: 1500 l & 2500 l, collector inclination 30°,
Domestic hot water consumption 10'000 l/day (200 persons)
Daily heat losses (circulation and tanks) 60 kWh,
Energy demand of the reference system 191'700 kWh/year

62.9 m²
25.1 collectors 763 kWh/m²

Space heating system: $F_{ss}^* = 25\%$
Combined storage 1200 l, collector inclination 45°,
Daily energy demand 10 kWh (4-6 persons), Building 200 m², moderately
heavy construction, well insulated, Heating power demand 5.8 kW (ambient
temperature -8°C), Energy demand space heating 12140 kWh/year,
Energy demand of the reference system 16340 kWh/year

16.2 m²
6.5 collectors 332 kWh/m²

*) Fractional solar savings: Proportion of the final energy that, thanks to the solar system, can be saved compared to a reference system.
**) Surface demand and solar yield are given with respect to the aperture area.

Captador Solar Térmico

**RAL 4 S
RAND**

Informe de Ensayo de Captador Solar
Rendimiento

Copia:	Controlada Nº:
	No controlada:
Asignada a:	
Fecha de envío:	

Laboratorio de Captadores Solares
Centro Nacional de Energías Renovables
CENER
Avda. Ciudad de la Innovación nº 7
31621 Sarriguren-Navarra

Laboratorio de ensayo acreditado por ENAC con expediente nº 355/LE977

Proyecto: 30.0019.0

Id. del captador:	30.0019.0-3
Fabricante:	METAL & ENAMELING INDUSTRIES LTD.
Nombre comercial:	RAND RAL 4 S
Tipo de captador (sin cubierta/ con cubierta / de vacío):	Plano con cubierta
Año de producción:	2004
Número de serie:	Sin número
Dibujos documento n°:	--
Peticionario:	METAL & ENAMELING INDUSTRIES LTD.
Domicilio social:	17 Shenkar street, Kiryat Arie Petach Tikva Israel
Fecha de inicio:	18/02/2005
Fecha de fin:	25/02/2005

Método de ensayo:	El ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma EN 12975-1:2000, EN 12975-2:2001 y EN 12975-2:2001/AC:2002, así como al método de ensayo de régimen interno n° ME-542.
--------------------------	--

Declaraciones:	<p>Los resultados de este informe se refieren únicamente a la muestra ensayada. Cener no se responsabiliza de las conclusiones o generalizaciones que pudieran obtenerse de los resultados indicados en este informe.</p> <p>No se ha realizado método de muestreo en la elección del captador. El cliente es responsable de la selección efectuada del mismo.</p> <p>Este informe no podrá ser parcialmente reproducido sin la aprobación del Laboratorio de Ensayo de captadores solares de CENER.</p>
-----------------------	--

Realizado por: A. García de Jalón Técnico 25/02/2005	Revisado por: J.A. Ferrer Jefe de Servicio 28/02/2005	Aprobado por: F. Manteca Jefe de Departamento 28/02/2005
Informe n°: 30.0019.0-3 Anexo 6	Fecha de emisión: 28/02/05	Pág.: 2/10

1. Generalidades

Referencia de captador N°: 30.0019.0-3

Ensayo realizado por: LCS – CENER

Avda. Ciudad de la Innovación nº 7, 31621 Sarriguren-Navarra

Tel.: + 34 948 25 28 00

Fax: + 34 948 27 07 74

2. Descripción del captador solar

Nombre del fabricante: METAL & ENAMELING INDUSTRIES LTD.

2.1. Captador

Tipo: Plano / de vacío / subatmosférico	Plano con cubierta
Área total:	2,95 m ²
Área de apertura:	2,76 m ²
Área de absorbedor:	2,65 m ²
Peso en vacío:	46 Kg
Contenido de fluido:	No especificado
N° de cubiertas:	1
Materiales de cubierta:	Cristal solar antirreflectivo
Espesor de cubierta:	4 mm
Número de tubos o canales:	Verticales: 10 Horizontales: 2
Diámetro de tubos o dimensiones de los canales:	Diám.ext: 10 mm Diám.int: 8 mm
Tubo o paso de canal:	29 mm exterior
Medio de transferencia de calor: agua / aceite / otro	Agua
Especificaciones (aditivos, etc.):	--
Fluidos de transferencia de calor alternativos aceptables:	Agua

3. Resultado de ensayos

3.1. Ensayos realizados al interior bajo condiciones de estado estacionario

Irradiancia solar media: 985 W/m²

Tipo de lámparas: HMI

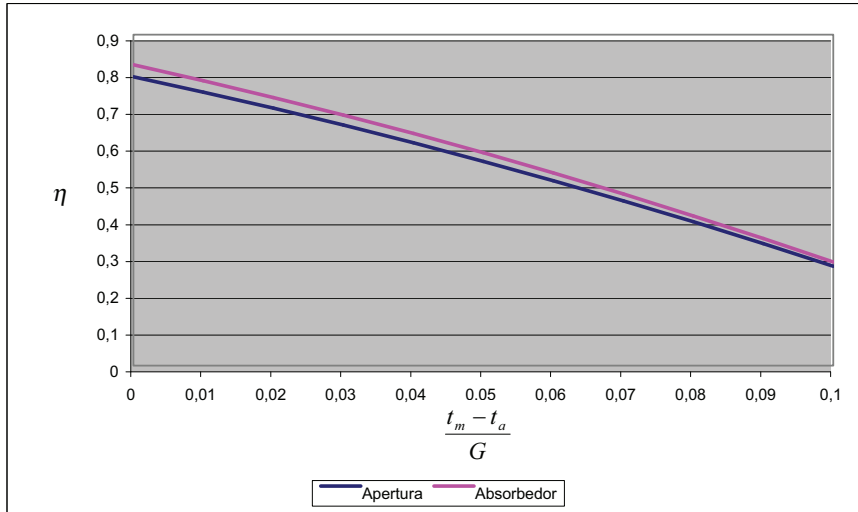
Sombreado de la radiación de alta longitud de onda:	Si
---	----

3.2. Curva de eficiencia instantánea basada en el área de (absorbedor/apertura) y temperatura media

Área de referencia: Área del absorbedor A _A	
Área del absorbedor usado para la curva en m ² A _A :	2,65
Eficiencia instantánea definida como:	$\eta_A = \frac{\dot{Q}}{A_A \times G}$

Área de referencia: Área de apertura A _a	
Área de apertura para curva en m ² A _a :	2,76
Eficiencia instantánea definida como:	$\eta_a = \frac{\dot{Q}}{A_a \times G}$

Curva de eficiencia instantánea basada en el área de (absorbedor/apertura) a 800 W/m2



Caudal de fluido usado para los ensayos 0,020 kg/s m²

Área total de captador 2,95 m²

$$h_A = h_{0A} - a_{1A} \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right) - a_{2A} G \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2$$

$$h_a = h_{0a} - a_{1a} \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right) - a_{2a} G \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2$$

η_{0A} :	0,818	
a_{1A} :	4,208	W/m ² K
a_{2A} :	0,014	W/m ² K ²

η_{0a} :	0,785	
a_{1a} :	4,041	W/m ² K
a_{2a} :	0,014	W/m ² K ²

Fluido utilizado: Agua

MEDIDAS REALIZADAS EN LA PISCINA

Se realizaron una serie de medidas y observaciones con el fin de especificar el funcionamiento de la piscina.

En primer lugar, se identificaron los equipos y su función dentro del sistema, generando a partir de esto un esquema del funcionamiento de éste.

Se midió la temperatura de entrada y salida del agua en los equipos térmicos. Esto se realizó midiendo la temperatura de pared de las cañerías en estos puntos. Se utilizó un termómetro infrarrojo marca *UNI-T*, modelo *UT301A*, y se pintó la superficie de las cañerías con pintura negra opaca para evitar fluctuaciones por la emisividad de los materiales. En el anexo C se observa el balance de energía a partir del cual se obtiene la temperatura del fluido utilizando la temperatura de pared de la cañería.

En la tabla de la figura B.1 se observan las temperaturas medidas.

	ICP-1		ICP-2		ICP-3	
	Caliente	Frio	Caliente	Frio	Caliente	Frio
Entrada	70	47	70	27	70	27
Salida	57	55	50	45	50	45

	BC-1	BC-2	BC-3	WIH-1	WIH-2
Entrada	27	27	33	57	50,6
Salida	35	35	35	72,5	57

Figura B.1: Temperaturas medidas en los equipos térmicos. [°C]

Por otra parte, se midió la temperatura de las duchas y de la piscina con un termómetro de contacto. Para medir la temperatura de la ducha, se encendió esta y se llenó un recipiente durante 1 minuto, con lo cual se pudo medir no sólo la temperatura sino que estimar la cantidad de agua por minuto utilizada. Para la piscina, se midió la temperatura en distintos puntos obteniéndose para todos la misma temperatura.

La temperatura de las duchas fue 40[°C] mientras que la piscina tiene una temperatura de 28[°C].

TEMPERATURA DEL AGUA AL INTERIOR DE LAS CAÑERÍAS

Se realizaron mediciones en la pared exterior de las cañerías, por lo que es necesario buscar una relación que permita calcular la temperatura del agua al interior de éstas. Como se ve en la figura C.1, los mecanismos de transferencia de calor que gobiernan el sistema son la conducción a través de la pared de la tubería, Q_1 , y la convección desde la pared externa de la tubería hacia el ambiente, Q_2 .

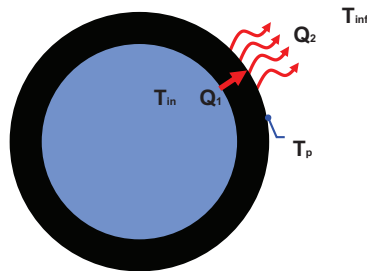


Figura C.1: Balance de energía en la pared de una tubería.

Siguiendo este esquema, aplicamos las ecuaciones de transferencia de calor para conducción y convección.

Conducción

$$\dot{Q}_1 = h_{ef} \cdot A_1 \cdot (T_{in} - T_p) \quad (C.1)$$

$$h_{ef} = \frac{k_1}{t_{ef}} = \frac{2 \cdot k_1}{d_{int} \cdot \ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)} \quad (C.2)$$

Donde:

A_1 : área interior de la cañería.

h_{ef} : coeficiente de transferencia de calor efectivo, en este caso en base a un sistema radial.

k_1 : conductividad térmica de la tubería.

d_{int} y d_{ext} : diámetros interior y exterior de la tubería respectivamente.

T_p : temperatura de la pared externa de la tubería.

T_{in} : temperatura del fluido.

Convección

$$\dot{Q}_2 = h_{conv} \cdot A_2 \cdot (T_p - T_{inf}) \quad (C.3)$$

Donde:

h_{conv} : Conductividad térmica del medio, en este caso aire.

A_2 : área exterior de la cañería.

T_p : temperatura de la pared externa de la cañería.

T_{inf} : temperatura "lejana" al cuerpo.

Por conservación de flujo de calor, $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$, y obtenemos:

$$h_{ef} \cdot \frac{\pi d_{in}^2}{4} \cdot (T_{in} - T_p) = h_{conv} \frac{\pi d_{out}^2}{4} \cdot (T_p - T_{inf}) \quad (C.4)$$

Despejando T_{in} de la ecuación C.4 se llega a,

$$T_{in} = \frac{h_{conv} \cdot d_{out}^2}{h_{ef} \cdot d_{in}^2} \cdot (T_p - T_{inf}) + T_p \quad (C.5)$$

Podemos entonces calcular la temperatura del agua que circula por las tuberías a partir de la temperatura de la pared externa de éstas y las propiedades de transferencia de calor de los materiales y del medio. Cálculos posteriores permitieron estimar que la temperatura medida en la superficie de la cañería es la misma que la del fluido en su interior.

FORMULARIO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En este anexo se presenta un formulario que indica el mínimo de mediciones y datos que deben ser recopilados para evaluar una piscina temperada. Se deben considerar además las particularidades que pudiese tener cada sistema para analizarlo correctamente.

Estudio para una piscina temperada

El siguiente formulario contiene el mínimo de mediciones y datos que deben ser recopilados para la evaluación de una piscina temperada.

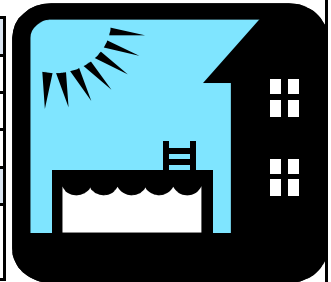
Es importante revisar además las disposiciones del ministerio de salud referente a piscinas de uso público, para considerar los requerimientos impuestos por éste.

T = Temperatura

Proyecto:
Lugar:
Latitud:

Datos de la Piscina

T agua:	
Dimensiones	Áreas
Largo:	Superficie
Ancho:	Paredes + Suelo
Profundidad:	Volumen:
Calidad del agua	Flujos de energía a considerar
Tasa de recirculación:	Evaporación Radiación Convección
Agua fresca diaria:	Purgas Conducción



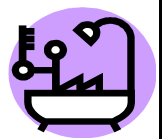
Datos del Espacio Techado

En caso de no contar con un recinto cerrado, utilizar los datos del ambiente para realizar los cálculos necesarios

T aire:	Flujos de energía a considerar	
Humedad (HR[%]):	Convección piscina	Evaporación
Volumen:	Convección externa	
Calidad del aire	Radiación	
Tasa de reposición:		

Datos del Agua Caliente Sanitaria

T acs:	Con estos datos se puede estimar el volumen de agua caliente sanitaria (ACS) necesaria para el proyecto.
T ducha:	
Tiempo ducha:	
Usuarios/día:	



Ambiente

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
T agua-red						
T aire						
HR [%]						
G media*						
	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T agua-red						
T aire						
HR [%]						
G media						

*G media: Radiación global media para un día tipo del mes

MÓDULO MACRO EXCEL

El siguiente código corresponde a una planilla que permite estimar el comportamiento de un sistema de colectores a lo largo del día. Esta planilla está disponible en <http://www.cec.uchile.cl/~acuevas/mem/colectores.xls>

```
'*****SOLVER COLECTORES*****
```

```
Sub COLECTORES()
```

```
' Resolver Hoja COLECTORES
```

```
Dim aux1 As Integer
```

```
Dim aux2 As Integer
```

```
Dim colect As Integer
```

```
Dim hoja As Worksheet
```

```
Dim R As Range
```

```
Dim R2 As Range
```

```
Dim paso As Integer
```

```
Dim porcentaje As Double
```

```
Set hoja = ActiveSheet
```

```
Set R = ActiveSheet.Range("G3")
```

```
Set R2 = ActiveSheet.Range("J4")
```

```
aux1 = 15
```

```
aux2 = 33
```

```
colect = hoja.Cells(15, 7).Value
```

```
porcentaje = 0
```

```
R2.Value = porcentaje
```

```
R.Value = "TRABAJANDO..."
```

```
For j = 1 To aux2
```

```
    'If Hoja.Cells(j + 43, 3).Value = 0 Then
```

```
    'Hoja.Cells(j + 43, 5).Value = Hoja.Cells(22 + colect, 3).Value
```

```
    'Else
```

```
    hoja.Cells(23, 2).Value = hoja.Cells(j + 43, 3).Value
```

```
    'End If
```

```
For i = 1 To aux1
```

```
    SOLVER.SolvReset
```

```
    SOLVER.SolvOk SetCell:=hoja.Cells(i + 22, 10), MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", _
```

```
        ByChange:=hoja.Cells(i + 22, 4)
```

```
    SOLVER.SolvAdd CellRef:=hoja.Cells(i + 22, 10), Relation:=3, FormulaText:="0"
```

```
    SOLVER.SolvSolve userFinish:=True
```

```
    SOLVER.SolvFinish KeepFinal:=1
```

```
    hoja.Cells(j + 43, 5) = hoja.Cells(22 + colect, 4)
```

```
Next i
```

```
porcentaje = (j / 33)
```

```
R2.Value = porcentaje
```

```
Next j
```

```
R.Value = "LISTO"
```

```
End Sub
```

```
Sub COLECT1()
```

```
Dim aux1 As Integer
```

```
Dim hoja As Worksheet
```

```
Dim R As Range
```

```
'Dim nombre As String
```

```
Set R = ActiveSheet.Range("G3")
```

```
Set hoja = ActiveSheet
```

```
'nombre = ActiveSheet.Name
```

```
'hoja.Range("R2").Value = nombre
```

```

aux1 = 15
R.Value = "TRABAJANDO..."

For i = 1 To aux1
    SOLVER.SolvReset
    SOLVER.SolvOk SetCell:=hoja.Cells(i + 22, 10), MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", _
        ByChange:=hoja.Cells(i + 22, 4)
    SOLVER.SolvAdd CellRef:=hoja.Cells(i + 22, 10), Relation:=3, FormulaText:="0"
    SOLVER.SolvSolve userFinish:=True
    SOLVER.SolvFinish KeepFinal:=1

Next i
R.Value = "LISTO"
End Sub

```

```

Sub COLECT2()
    Dim aux1 As Integer
    Dim hoja As Worksheet
    Dim R As Range

    Set R = ActiveSheet.Range("G3")
    Set hoja = ActiveSheet

    aux1 = 15
    R.Value = "TRABAJANDO..."

    For i = 1 To aux1
        SOLVER.SolvReset
        SOLVER.SolvOk SetCell:=hoja.Cells(i + 22, 10), MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", _
            ByChange:=hoja.Cells(i + 22, 4)
        SOLVER.SolvAdd CellRef:=hoja.Cells(i + 22, 10), Relation:=3, FormulaText:="0"
        SOLVER.SolvSolve userFinish:=True
        SOLVER.SolvFinish KeepFinal:=1

    Next i
    R.Value = "LISTO"
End Sub

```

```

Sub COLECTORESFULL()
    'DEFINIR VARIABLES
    Dim activa As Worksheet
    Dim aux1 As Integer
    Dim aux2 As Integer
    Dim colect As Integer
    Dim R As Range
    Dim R2 As Range
    Dim paso As Integer
    Dim porcentaje As Double
    Dim nombre As String

    'SETEO DE VARIABLES
    Set activa = ActiveSheet
    nombre = ActiveSheet.Name
    Set R = activa.Range("G3")
    Set R2 = activa.Range("J4")
    Set flujo = activa.Range("G16")

```

```
aux1 = activa.Range("G15").Value
aux2 = 17
aux3 = activa.Range("M2").Value
colect = activa.Range("G15").Value
porcentaje = 0
R2.Value = porcentaje
R.Value = "TRABAJANDO..."
```

```
'LIMPIAR TABLA
```

```
activa.Range("E44", "AB60").Value = ""
```

```
'INICIO DE LOS CALCULOS
```

```
For k = 1 To aux3
```

```
'ESTABLECE EL FLUJO [KG/S] DE LA ITERACION
```

```
flujo.Value = k * 0.01
```

```
For j = 1 To aux2
```

```
'CAMBIA VALOR DE LA RADIACION PARA RESOLVER COLECTORES
```

```
activa.Range("B23").Value = activa.Cells(j + 43, 3).Value
```

```
'RESUELVE COLECTORES
```

```
For i = 1 To aux1
```

```
'SI RADIACION ES CERO, SE MANTIENE LA TEMPERATURA
```

```
If activa.Cells(i + 22, 2) <= 0 Then
```

```
activa.Cells(i + 22, 4) = activa.Cells(i + 22, 3)
```

```
Else
```

```
'SI HAY RADIACION, SE RESUELVEN LAS ECUACIONES POR SOLVER
```

```
SOLVER.SolvReset
```

```
SOLVER.SolvOk SetCell:=activa.Cells(i + 22, 10), MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", _  
ByChange:=activa.Cells(i + 22, 4)
```

```
SOLVER.SolvAdd CellRef:=activa.Cells(i + 22, 10), Relation:=3, FormulaText:="0"
```

```
SOLVER.SolvSolve userFinish:=True
```

```
SOLVER.SolvFinish KeepFinal:=1
```

```
End If
```

```
'SE COMPLETA LA TABLA INFERIOR
```

```
'TEMPERATURA DE SALIDA DE LA LINEA DE COLECTORES
```

```
activa.Cells(j + 43, ((3 * k) - 2) + 4) = activa.Cells(22 + colect, 4)
```

```
'EXERGIA
```

```
activa.Cells(j + 43, ((3 * k) - 1) + 4) = activa.Cells(22 + colect, 14)
```

```
'EXERGIA GANADA
```

```
activa.Cells(j + 43, ((3 * k)) + 4) = activa.Cells(22 + colect, 15)
```

```
Next i
```

```
Next j
```

```
porcentaje = (k / aux3)
```

```
R2.Value = porcentaje
```

```
Next k
```

```
FLUJO60 (nombre)
```

```
R.Value = "LISTO"
```

```
End Sub
```

Sub COLECTORESFULL2(nombre As String)

```
'DEFINIR VARIABLES
Dim activa As Worksheet
Dim aux1 As Integer
Dim aux2 As Integer
Dim colect As Integer
Dim R As Range
Dim R2 As Range
Dim paso As Integer
Dim porcentaje As Double
```

```
'SETEO DE VARIABLES
Set activa = Sheets(nombre)
activa.Activate
Set R = activa.Range("G3")
Set R2 = activa.Range("J4")
Set flujo = activa.Range("G16")
aux1 = activa.Range("G15").Value
aux2 = 17
aux3 = activa.Range("M2").Value
colect = activa.Range("G15").Value
porcentaje = 0
R2.Value = porcentaje
R.Value = "TRABAJANDO..."
```

```
'LIMPIAR TABLA
activa.Range("E44", "AB60").Value = ""
'INICIO DE LOS CALCULOS
For k = 1 To aux3
'ESTABLECE EL FLUJO [KG/S] DE LA ITERACION
flujo.Value = k * 0.01
```

```
For j = 1 To aux2
'CAMBIA VALOR DE LA RADIACION PARA RESOLVER COLECTORES
activa.Range("B23").Value = activa.Cells(j + 43, 3).Value
```

```
'RESUELVE COLECTORES
For i = 1 To aux1
'SI RADIACION ES CERO, SE MANTIENE LA TEMPERATURA
If activa.Cells(i + 22, 2) <= 0 Then
activa.Cells(i + 22, 4) = activa.Cells(i + 22, 3)

Else
'SI HAY RADIACION, SE RESUELVEN LAS ECUACIONES POR SOLVER
SOLVER.SolvReset
SOLVER.SolvOk SetCell:=activa.Cells(i + 22, 10), MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", _
    ByChange:=activa.Cells(i + 22, 4)
SOLVER.SolvAdd CellRef:=activa.Cells(i + 22, 10), Relation:=3, FormulaText:="0"
SOLVER.SolvSolve userFinish:=True
SOLVER.SolvFinish KeepFinal:=1

End If
```

```
'SE COMPLETA LA TABLA INFERIOR
'TEMPERATURA DE SALIDA DE LA LINEA DE COLECTORES
activa.Cells(j + 43, ((3 * k) - 2) + 4) = activa.Cells(22 + colect, 4)
'EXERGIA
```

```
activa.Cells(j + 43, ((3 * k) - 1) + 4) = activa.Cells(22 + colect, 14)
'EXERGIA GANADA
activa.Cells(j + 43, ((3 * k)) + 4) = activa.Cells(22 + colect, 15)
```

```
Next i
```

```
Next j
porcentaje = (k / aux3)
R2.Value = porcentaje
```

```
Next k
R.Value = "LISTO"
```

```
End Sub
```

```
Sub RUNALL()
```

```
Dim hojames As String
Dim start As Worksheet
```

```
Set start = ActiveWorkbook.Sheets("INICIO")
start.Range("D7", "D18").Value = ""
start.Range("D7", "D18").Interior.ColorIndex = 0
```

```
For mes = 1 To 12
hojames = start.Cells(6 + mes, 3).Value
start.Cells(6 + mes, 4).Interior.ColorIndex = 0
start.Cells(6 + mes, 4).Value = "Trabajando..."
COLECTORESFULL2 (hojames)
FLUJO60 (hojames)
start.Cells(6 + mes, 4).Value = "OK"
start.Cells(6 + mes, 4).Interior.ColorIndex = 4
Next mes
```

```
End Sub
```

```
Sub FLUJO60(nombre As String)
```

```
'DEFINIR VARIABLES
Dim activa As Worksheet
Dim aux1 As Integer
Dim aux2 As Integer
Dim colect As Integer
Dim R As Range
Dim R2 As Range
Dim paso As Integer
Dim porcentaje As Double
Dim max As Double
Dim max1 As Double
Dim min As Double
Dim min1 As Double
Dim delta As Range
```

```
'SETEO DE VARIABLES
Set activa = Sheets(nombre)
```

```

activa.Activate
Set R = activa.Range("G3")
Set R2 = activa.Range("J4")
Set flujo = activa.Range("G16")
Set delta = activa.Range("U29")
aux1 = activa.Range("G15").Value
aux2 = 17
aux3 = activa.Range("M2").Value
colect = activa.Range("G15").Value
porcentaje = 0
R2.Value = porcentaje
R.Value = "TRABAJANDO..."
paso = 0
max = 0.2
max1 = 0.2
min = 0
min1 = 0.0101

activa.Range("U22").Formula = "=AVERAGE(G" & 23 & ":G" & 23 + colect - 1 & ")"
activa.Range("U29").Formula = "=(U" & 28 & "-D" & 22 + colect & ")"

For j = 1 To aux2
'CAMBIA VALOR DE LA RADIACION PARA RESOLVER COLECTORES
activa.Range("B23").Value = activa.Cells(j + 43, 3).Value

Do
paso = paso + 1
'SI RADIACION ES CERO, PASAR A LA SIGUIENTE
If activa.Range("B23").Value = 0 Then
activa.Cells(j + 43, 4).Value = ""
Exit Do
End If

'INICIAR CON FLUJO MAX
If paso = 1 Then
flujo.Value = max
Else
If delta.Value > 0 Then
If flujo.Value < min1 Then
activa.Cells(j + 43, 4).Value = ""
Exit Do
End If
flujo.Value = (min + max) / 2
max1 = max
max = flujo
min = min
Else
max = max1
min = flujo.Value
flujo.Value = (max + min) / 2
End If
End If

'SI FLUJO MENOR A FLUJO MINIMO (0.01) NO CALCULAR FLUJO
'If flujo.Value < 0.01 Then
'activa.Cells(j + 43, 4).Value = ""
'Exit Do
'End If

```



```

For i = 1 To aux1
'SI RADIACION ES CERO, SE MANTIENE LA TEMPERATURA
'If activa.Cells(i + 22, 2) <= 0 Then
"activa.Cells(i + 22, 4) = activa.Cells(i + 22, 3)
'activa.Cells(j + 43, 4).Value = ""
'Exit Do
'Else
If i = 1 Then
activa.Range("D23").Value = activa.Range("C23").Value + 7
End If
'SI HAY RADIACION, SE RESUELVEN LAS ECUACIONES POR SOLVER
SOLVER.SolvReset
SOLVER.SolvOk SetCell:=activa.Cells(i + 22, 10), MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", _
    ByChange:=activa.Cells(i + 22, 4)
SOLVER.SolvAdd CellRef:=activa.Cells(i + 22, 10), Relation:=3, FormulaText:="0"
SOLVER.SolvSolve userFinish:=True
SOLVER.SolvFinish KeepFinal:=1
'End If
Next i

activa.Cells(j + 43, 4).Value = flujo.Value

Loop Until Abs(delta) < 0.1

paso = 0
max = 0.1
min = 0.01

Next j

End Sub

Sub soloflujo60()
Dim hoja As Worksheet
Dim nombre As String
Set hoja = ActiveSheet
nombre = hoja.Name
FLUJO60 (nombre)
End Sub

```