

# Desarrollo de un modelo matemático para la optimización energética en sistemas de calefacción de piscinas

## Development of a mathematical model for energy optimization in pool heating systems

Cesar Alejandro Isaza Roldan<sup>1</sup>, Santiago del Río Rico<sup>2</sup>

Fecha de recepción: 30 de abril de 2013

Fecha de aceptación: 20 de julio de 2013

### Resumen

En este trabajo de investigación los autores elaboran un modelo matemático que cobija todos los flujos de energía que interactúan con una piscina climatizada de características geométricas establecidas, donde dichas interacciones son representadas por relaciones matemáticas que fueron encontradas mediante una búsqueda bibliográfica exhaustiva con la consiguiente conjugación de los modelos matemáticos en un balance de energía de la piscina, obteniendo así una serie de curvas que revelan la evolución de la temperatura del agua de la piscina a lo largo de un tiempo definido en función del diseño elaborado con base en el balance de energía. Complementariamente, se elaboró un programa en la plataforma Matlab<sup>®</sup> que permite dimensionar el equipo climatizador, el costo de inversión y la operación que lleva consigo el calentamiento de la piscina, con el fin de optimizar la carga térmica necesaria para elevar la temperatura de la piscina a un valor de confort. Se espera como conclusión importante que el desarrollo de este software permita al diseñador o usuario obtener el equipo climatizador más óptimo, además de

- 
- 1 Ingeniero Mecánico, PhD, Coordinador del Centro de Refrigeración y Climatización, Grupo de Investigación en Energía y Termodinámica, Universidad Pontificia Bolivariana. cesar.isaza@correo.upb.edu.co
  - 2 Ingeniero Mecánico, Analista del Centro de Refrigeración y Climatización, Universidad Pontificia Bolivariana santiagodrr@gmail.com

fomentar el uso racional de energía y el uso de tecnologías limpias, tales como las bombas de calor o los sistemas de calentamiento con energía solar.

**PALABRAS CLAVE:** Balances de energía en piscinas, climatización de piscinas, optimización energética, simulación matemática en piscinas

## Abstract

In this research work the authors construct a mathematical model that encompasses all energy flows interact with a heated geometrical set, where such interactions are represented by mathematical relationships that were found through a comprehensive literature search with subsequent conjugation mathematical models in an energy balance of the pool, thus obtaining a series of curves that reveal the evolution of the temperature of pool water over a period of time defined in terms of elaborate design based on energy balance. Additionally, a program was developed in Matlab® platform that allows not only measure the air conditioning equipment, but also the cost of investment and operation that involves heating the pool in order to optimize the thermal load required to raise the temperature of the pool to a value of comfort. As important conclusion is expected that the development of this software allows the designer or user to get the most optimal air conditioning equipment, and to promote the rational use of energy and the use of clean technologies such as heat pumps or heating systems solar energy.

**KEYWORDS:** Energy balance in swimming pools, pool heating, energy optimization, mathematical simulation in pools

---

## Nomenclatura

---

|                   |   |
|-------------------|---|
| A                 | Área (m <sup>2</sup> )  |
| C                 | Calor Específico (JK <sup>-1</sup> Kg <sup>-1</sup> )                                   |
| f                 | Fracción de volumen de agua renovada cada semana  |
| F <sub>R</sub>    | Factor de remoción de calor   |
| G                 | Irradiación Solar (Wm <sup>-2</sup> )   |
| h <sub>c</sub>    | Coefficiente de Transferencia de Calor Convectivo (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )   |
| h <sub>evap</sub> | Coefficiente de Transferencia de Calor Evaporativo (Wm <sup>-2</sup> Pa <sup>-1</sup> ) |
| I                 | Corriente eléctrica (A)   |
| $\dot{m}$         | Flujo Másico (Kgs <sup>-1</sup> )   |
| P                 | Presión (Pa)  |
| PCI               | Poder calorífico inferior (kJ/Kg)   |
| $\dot{Q}$         | Rata de transferencia de calor (W)  |
| T                 | Temperatura (K)   |

---

| <b>Nomenclatura</b>   |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| v                     | Velocidad (ms <sup>-1</sup> )  |
| V                     | Volumen (m <sup>3</sup> )      |
| <b>Letras Griegas</b> |                                |
| $\alpha$              | Absortividad                   |
| $\varepsilon$         | Emisividad                     |
| $\rho$                | Densidad (Kgm <sup>-3</sup> )  |
| $\sigma$              | Coficiente de Stefan-Boltzmann |
| <b>Subíndices</b>     |                                |
| a                     | Agua                           |
| amb                   | Ambiente                       |
| ar                    | Agua de Reposición             |
| c                     | Colector                       |
| cl                    | Cielo                          |
| conv                  | Convección                     |
| elec                  | Eléctrico                      |
| e                     | Convección                     |
| evap                  | Evaporación                    |
| in                    | Entrada                        |
| p                     | Piscina                        |
| rad                   | Radiación                      |
| T                     | total                          |
| u                     | Útil                           |
| vp                    | Vapor                          |

## 1. Introducción

**A**lrededor del mundo existen diferentes procesos de carácter industrial, doméstico y comercial que implican un importante consumo de energía derivado de combustibles hidrocarburos, lo cual obliga a la necesidad del uso de energías alternativas y sistemas de alta eficiencia que conlleven no solo a aminorar la dependencia que se tiene por el uso del petróleo, sino también el impacto ambiental generado por dicho recurso energético. La climatización de piscinas es hoy una de las actividades que exige una considerable carga

térmica, lo cual se traduce para un año de operación en altos costos de funcionamiento del sistema calefactor.

Comercialmente existen diversas tecnologías que permiten climatizar las piscinas a una temperatura deseada. Sin embargo, el dimensionamiento de dichos sistemas está acompañado de un estudio que comprende todos los flujos de energía que hay en las piscinas. Este estudio es generalmente caracterizado por la complejidad que lleva implícita la cuantificación de las pérdidas de energía, al punto de que se han publicado varias investigaciones enfocadas en determinar la carga térmica óptima.

Desde el punto de vista conceptual, existen en las piscinas cuatro tipos de pérdidas de energía a tener en cuenta: pérdidas por conducción, radiación, convección y evaporación, cada una de ellas exhibiendo una importancia en los balances de energía, donde la evaporación, convección y radiación representan el 56%, 26% y 18%, respectivamente <sup>[1]</sup>. Con respecto a la conducción de calor, su efecto suele despreciarse debido a la baja conductividad térmica que llega a exhibir la tierra circundante.

En la literatura, existen modelos matemáticos diseñados para dar valor a cada una de las pérdidas de energía. No obstante, la dificultad en el estudio de la climatización de piscinas yace en las pérdidas por evaporación debido a la gran dificultad que lleva consigo su cálculo. La ASHRAE expone un modelo el cual, para muchos, no es aconsejable su utilización por la gran discrepancia que presenta con la información derivada de pruebas experimentales, la cual llega a adoptar un valor alrededor del 28%.

En la actualidad, existe un gran abanico de ecuaciones para la evaporación, donde el número de ellas se reduce significativamente de acuerdo con las condiciones bajo las cuales están expuestas las piscinas, tal como sucede en las piscinas a la intemperie en relación con las que se encuentran confinadas en edificaciones.

Con el fin de obtener resultados más precisos, se han publicado una serie de correlaciones empíricas que permiten predecir la rata de evaporación de pequeños cuerpos de agua sometidos a velocidades que oscilan entre los 0 y 0.9 m/s <sup>[2]</sup>. De acuerdo con los resultados expuestos en este estudio, la respuesta del modelo que propusieron se desvía de los datos experimentales en un valor aproximado de 2.9%. Sin embargo, es importante mencionar que su

aplicabilidad se encuentra fuertemente restringida a situaciones domésticas en las que se ven involucrados volúmenes de agua relativamente pequeños.

En la literatura se puede encontrar otros modelos empíricos, destinados a cuantificar la rata de evaporación en grandes cuerpos de agua expuestos a la intemperie. No obstante, los modelos allí presentes están diseñados para condiciones de flujo forzado de aire sobre la superficie libre del agua, lo cual responde a una situación que se aleja de manera significativa de la realidad [3].

Entre los modelos más utilizados para evaluar las pérdidas de energía por evaporación en piscinas está uno realizado para volúmenes grandes, expuestos además a un flujo natural de aire [4]. El modelo seleccionado es resultado de una serie de comparaciones entre diferentes condiciones experimentales, encontrando para este modelo una respuesta con una desviación del 0.036%.

## 2. Balance de energía en piscinas

Toda piscina climatizada al aire libre comprende una serie de mecanismos de pérdidas y ganancias de energía que propician la disminución de su temperatura. Estos flujos de energía son representados por los siguientes fenómenos termodinámicos: conducción, radiación, convección, evaporación, agua de reposición y energía solar incidente.

La Figura 1 es una ilustración de cada una de las interacciones energéticas a las que se encuentra sometidas las piscinas, la cual se acompaña con la presentación matemática del balance de energía sobre el cuerpo de agua.

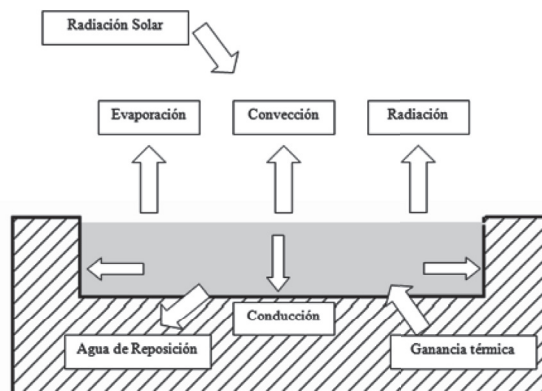


Figura 1. Interacciones energéticas sobre una piscina

$$\rho V_p C_p \frac{dT_p}{dt} = A_p \alpha G + \dot{Q}_{util} - (\dot{Q}_{evaporación} + \dot{Q}_{radiación} + \dot{Q}_{convección} + \dot{Q}_{agua de reposición} + \dot{Q}_{conducción}) \quad (1)$$

## 2.1. Pérdidas de energía por conducción

En medio de todos los flujos de energía que interactúan con las piscinas a la intemperie, las pérdidas de calor por conducción llegan a presentar un valor mucho menor en relación con el total de las demás pérdidas, al punto de que muchos estudios de investigación no involucran sus efectos sobre los resultados esperados [4]-[7]. Sin embargo, algunos paquetes de simulación en lugar de descartar este fenómeno, lo calculan con base en un valor porcentual tal como ocurre en el software Trnsys<sup>®</sup>, donde se establece como medida de recomendación un valor menor al 1% [8]. No obstante, dentro de la literatura existe un modelo matemático ampliamente aceptado para predecir dicho fenómeno el cual, para efectos del trabajo, se adoptó para ser acoplado dentro del balance de energía de la piscina, el cual se encuentra representado bajo la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{cond} = -\frac{1}{2L_C} \dot{q}_{SS} k_{soil} \frac{A_s}{A_{cond}} (T_p - T_{soil}) \quad (2)$$

## 2.2 Pérdidas de energía por radiación

En un orden de importancia, la radiación en relación con la conducción, ocupa el tercer lugar, adoptando un valor aproximado del 10% de las pérdidas totales. Desde el punto de vista térmico, la relación matemática que posibilita su cuantificación se presenta bajo la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_p (T_p^4 - T_{cl}^4) \quad (3)$$

La particularidad que reside en este modelo es la expresión correspondiente a la temperatura asociada al cielo ( $T_{cl}$ ), para la cual existen diferentes expresiones empíricas destinadas a su determinación, como se pueden observar enlistadas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Ecuaciones para la determinación de la temperatura del cielo

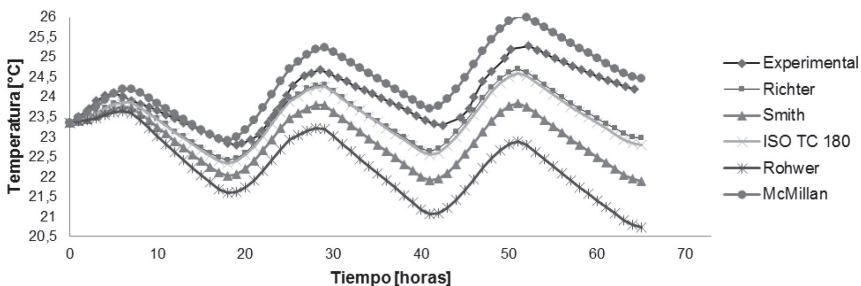
|   |                |
|---|----------------|
| $T_{cielo} = T_{amb}$   | Dreyfus, 1960  |
| $T_{cielo} = 0.0552T_{amb}^{1.5}$   | Swinbank, 1963 |
| $T_{cielo}^4 = T_{amb}^4 \left( 1 - 0.261 \exp(-7.77 * 10^{-4})(T_{amb} - 273)^2 \right)$ | Daguenet, 1985 |
| $T_{cielo} = T_{amb} \left( 0.56 + 0.08 P_{vp}^{0.5} \right)^{0.25}$                      | Melchor, 1982  |
| $T_{cielo} = T_{amb} \left( 0.55 + 3.85 * 10^{-2} P_{vp}^{0.5} \right)^{0.25}$            | Daguenet, 1985 |

La temperatura del cielo ( $T_{cl}$ ) está calculada en la mayoría de las ecuaciones en función de la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y la presión de vapor de agua ( $P_{vp}$ ), calculada a la temperatura del agua de la piscina ( $T_p$ ).

Para efectos del proyecto, se hará uso de la expresión propuesta por Swinbank por su simplicidad y de más amplio uso [4].

### 2.3. Pérdidas de energía por convección

Siguiendo un orden de ideas, las pérdidas por convección ocupan, en términos de importancia, el segundo fenómeno de pérdida energética, llegando a representar un valor aproximado del 40%. Al igual que la radiación, posee una relación matemática que lo personifica, la cual se encuentra expresada bajo la siguiente ecuación:



**Figura 2.** Diferentes modelos de pérdida de energía por evaporación.

Temperatura vs tiempo

Dentro de ésta ecuación, la complejidad se concentra en la determinación del coeficiente de transferencia de calor ( $h_{conv}$ ), ya que es función de diversas variables tales como la velocidad del viento ( $v_{viento}$ ), la temperatura del aire ( $T_{amb}$ ), la temperatura del agua de la piscina ( $T_p$ ), la presencia de personas en la piscina, entre otras. A raíz de ello, de acuerdo con lo presentado en diversos estudios concernientes al tema, la relación empírica que más se adecúa a los resultados experimentales para encontrar el coeficiente de convección en las piscinas al aire libre es la siguiente:

$$h_{conv} = 3.1 + 4.1v_{viento} \quad (5)$$

Esta expresión es por muchos la más usada para este tipo aplicación, en consecuencia, se implementar  en el balance de energía de la piscina <sup>[4]</sup> y <sup>[6]</sup>.

## 2.4. Pérdidas de energía por evaporación

Este fenómeno, a diferencia de los anteriores, es el mecanismo de transporte de energía más significativo en las piscinas, alcanzando un valor porcentual mayor al 50% del total de las pérdidas de energía. Sin embargo, la dificultad que hay detrás de dicho fenómeno rebasa a los demás flujos de energía, ya que las relaciones empíricas existentes presentan poco acercamiento a lo que se evidencia en la realidad. No obstante, ante la necesidad de hacer un hecho el tema del uso racional de la energía, se han estructurado otros modelos matemáticos con una respuesta mucho mejor posibilitando optimizar el tamaño del sistema calefactor, los cuales conducen a una reducción de los costos de inversión y operación. La relación matemática genérica destinada al cálculo de las pérdidas por la evaporación es la siguiente:

$$\dot{Q}_e = A_p h_e (P_p - P_a) \quad (6)$$

El común denominador de esta ecuación en relación con la convección es la dificultad en hallar el coeficiente de transferencia de calor evaporativo, para el cual la Tabla 2 pone a la vista los modelos matemáticos empíricos más usados y se pueden observar en la Figura 2.



**Tabla 2.** Coeficientes de transferencia de calor evaporativos

| Autor        | A                                | B                                | n   |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|-----|
|              | $\left[ \frac{W}{Pam_2} \right]$ | $\left[ \frac{W}{Pam_3} \right]$ |     |
| Smith et al. | 0.0638                           | 0.0669                           | 1   |
| ASHRAE       | 0.0890                           | 0.0782                           | 1   |
| Richter      | 0.0423                           | 0.0565                           | 0.5 |
| ISO TC 180   | 0.0506                           | 0.0669                           | 1   |
| Rohwer       | 0.0850                           | 0.0508                           | 1   |
| McMillan     | 0.0360                           | 0.0250                           | 1   |

Para efecto del trabajo investigativo, el modelo propuesto por Richter fue escogido por ser el recomendado por la literatura [4].

## 2.5. Pérdidas de energía por agua de reposición

Una consecuencia directa del fenómeno de la evaporación, junto con la presencia de personas en la piscina, es la disminución del nivel del agua, los cuales llevan a la necesidad de reponer las pérdidas a través del uso de agua del acueducto. La siguiente relación corresponde a la manera para calcular la interacción energética, la cual, para efectos del trabajo, se adopta para ser incluida dentro del balance de energía [9].

$$\dot{Q}_{\text{agua de reposición}} = \dot{m}_{\text{agua}} C_p (T_p - T_{\text{agua de reposición}}) \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \dot{m}_{\text{evaporación}} + f_{\text{reposición}} \frac{\rho V_p}{604800} \quad (8)$$

## 2.6 Radiación solar

Dentro del conjunto de interacciones energéticas que experimentan las piscinas a la intemperie, existe una que representa una ganancia de energía, la cual contribuye a la disminución del tamaño del sistema calefactor y adopta la siguiente expresión.

$$\dot{Q}_{\text{rad}_solar} = \alpha_p G_T A_p \quad (9)$$

## **2.6. Validación del modelo matemático**

Para hacer un uso adecuado del modelo matemático estructurado a partir de las relaciones anteriormente exhibidas, es necesario e indispensable verificar el grado de veracidad que posee el modelo general. Por ello, se llevó a cabo una validación que consistió en contrastar la temperatura arrojada por el modelo contra una prueba experimental realizada en un estudio bajo condiciones de ausencia de personas y equipo calefactor, donde la piscina se caracteriza por poseer un área superficial y volumen de  $50\text{m}^2$  y  $80.5\text{m}^3$ , respectivamente.

En la Figura 2 se presenta la comparación entre la curva experimental y la teórica donde la obtención de esta última se logró mediante la elaboración de un código en Matlab®, en el cual se empleó el método de Runge-Kutta de cuarto orden para solucionar la ecuación diferencial que resulta del balance de energía. Sin embargo, con el objeto de dar importancia al modelo de evaporación, se implican dentro de la simulación las cinco ecuaciones exhibidas en la Tabla 2, teniendo presente el peso que infringe la evaporación sobre la temperatura de la piscina.

Con base en lo expuesto en la Figura 2, se evidencia una clara discrepancia entre la respuesta arrojada por los modelos frente al conjunto de valores experimentales. Sin embargo, ha de tenerse presente que el balance de energía no contempla el fenómeno de la estratificación, lo cual representa un aspecto limitador en la respuesta del modelo de la piscina. Por otro lado, el balance de energía en sí se encuentra constituido por relaciones netamente empíricas estructuradas bajo condiciones específicas de laboratorio que bien no pueden corresponder al caso de la piscina de la Universidad Pontificia Bolivariana, tal como lo evidencian los modelos de Rohwer y Smith, cuyas respuestas se distancian de forma significativa de la curva experimental. Finalmente, como tercer y último aspecto para resaltar, se consideró, para la temperatura del agua de la piscina, un valor de  $23.35\text{ }^\circ\text{C}$  como condición inicial para la evaluación de la ecuación diferencial; esto implica que de no considerarse un valor apropiado, podría darse lugar a desfases significativos con respecto a los datos experimentales.

No obstante, con el objetivo de mostrar el ajuste que presenta cada balance de energía con su respectivo modelo de evaporación, en relación con la

curva experimental en forma cuantitativa, se exhibe en la Tabla 3, los valores de la desviación cuadrática media estándar (RMSD) de cada uno de ellos, donde se empleó la siguiente:

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{X_{\text{cal}} - X_{\text{exp}}}{X_{\text{exp}}} \right)^2} \times 100 \quad (10)$$

Donde se presenta como el valor teórico, el valor experimental y N el número de datos disponibles.

**Tabla 3.** Desviación cuadrática estándar para los modelos de evaporación.

| Richter | McMillan | ISO TC 180 | Smith  | Rohwer |
|---------|----------|------------|--------|--------|
| 0.0340  | 0.0346   | 0.0359     | 0.0541 | 0.0813 |

Estos resultados demuestran que el modelo de evaporación de Ritcher se posiciona como el más apto para predecir el comportamiento de la temperatura del agua de la piscina en el tiempo. Por otro lado, al considerar el RMSD asociado al modelo de McMillan, se infiere que éste adopta la posición del segundo modelo más apto para la simulación, seguido de los modelos de Smith y Rohwer como los más divergentes.

### 3. Herramienta informática para el diseño y evaluación energética para piscinas a ser climatizadas

Para abordar y desarrollar de manera satisfactoria la simulación de la piscina, se decidió elaborar una herramienta informática con el fin de obtener la evolución de la temperatura de la piscina en el tiempo, frente a un grupo de sistemas de calentamiento. Esto con el fin de obtener los tiempos y costo de operación, partiendo del modelo matemático estructurado, implícito dentro de las líneas de código del programa.

Los tipos de sistemas de que dispone la herramienta internamente son:

- Calentador de resistencia eléctrica
- Calentador a gas
- Bomba de calor aire-agua

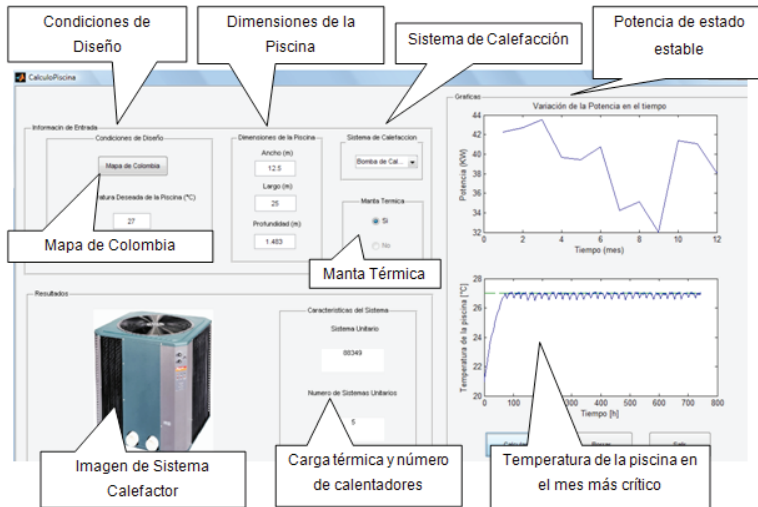
- Colector solar de tubos de vacío

Cada tipo de sistema exhibe un modelo matemático asociado, los cuales son exhibidos en la Tabla 3.

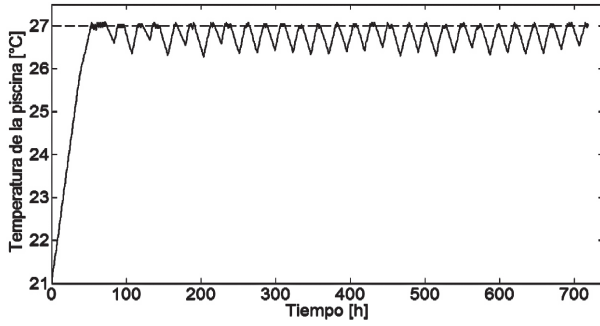
**Tabla 4.** Modelos matemáticos de los sistemas de calefacción

| Sistema calefactor                  | Modelo matemático  |
|-------------------------------------|--|
| Calentador de resistencia eléctrica | $\dot{Q}_{\text{útil}} = I_{\text{elec}} V_{\text{elec}}$                    |
| Calendar a gas                      | $\dot{Q}_{\text{útil}} = \eta \dot{m}_{\text{combustible}} \text{PCI}$       |
| Bomba de calor aire-agua            | $\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{W}_{\text{elec}}$      |
| Colector solar de vacío             | $\dot{Q}_{\text{útil}} = A_C F_R [S - U_L (T_{\text{in}} - T_{\text{amb}})]$ |

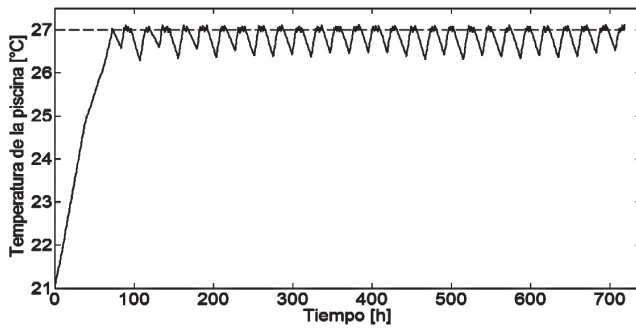
En la Figura 3 se muestra una imagen de la forma que adopta la interfaz gráfica, la cual fue desarrollada en la plataforma Matlab®.



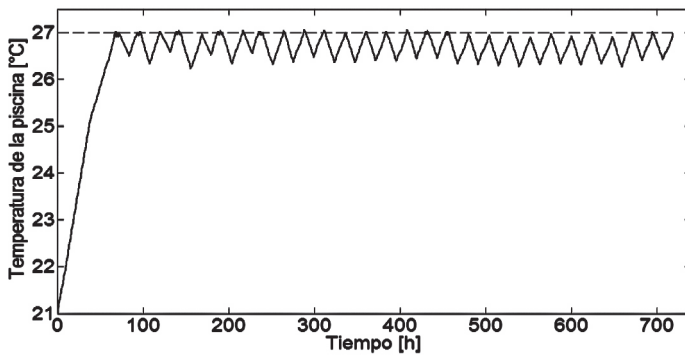
**Figura 3.** Interfaz gráfica de diseño y evaluación del sistema calefactor



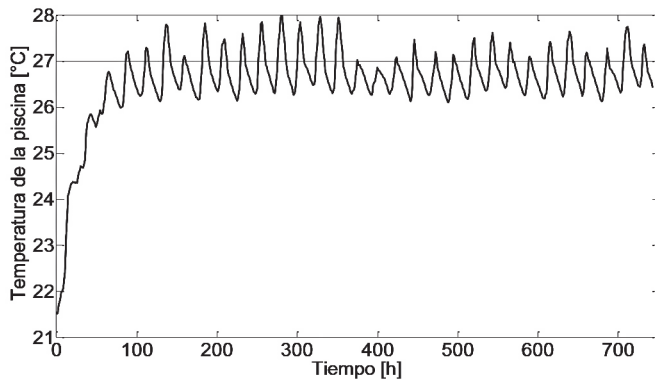
**Figura. 1A** Temperatura de la piscina usando calentador de resistencia eléctrica



**Figura. 1B** temperatura de la piscina usando calentador a gas



**Figura. 1C** temperatura de la piscina usando bomba de calor aire-agua



**Figura. 1D** temperatura de la piscina usando híbrido bomba de calor-colector solar de vacío

#### 4. Resultados

A partir del software desarrollado, se logró obtener un grupo de curvas correspondientes al estado de la temperatura de la piscina en el tiempo, a partir de la cual se encontró el tiempo de operación del sistema calefactor y su costo de operación.

En la Tabla 5 se ilustran los tiempos y costos de operación de cada sistema calefactor.

**Tabla 5.** Costos y tiempos de operación

| Sistema                                  | Tiempo de operación | Costo de operación |
|--|---------------------|--------------------|
| Calentador eléctrico                     | 4417 h/año          | 109.685.000 \$     |
| Calentador a gas                         | 3034 h/año          | 24.967.900 \$      |
| Bomba de calor                           | 5129 h/año          | 18.044.300 \$      |
| Bomba de calor + Colector solar de vacío | 4699 h/año          | 5.484.653 \$       |

Estos resultados, teniendo presente el comportamiento térmico de la piscina frente a cada alternativa, que cada sistema se encuentra en la capacidad de sostener la temperatura de la piscina. No obstante, energéticamente, sin dejar el lado el costo de operación, el sistema híbrido se posicionó como la mejor opción, seguido de la bomba de calor como la segunda opción más certera.

## 5. Conclusiones

Con base en lo expuesto en el trabajo de investigación, se concluye que los sistemas de calefacción existentes son, desde la perspectiva técnica, candidatos para el proceso de la climatización de la piscina debido a su capacidad de mantener las condiciones de confort a lo largo del mes de marzo. Sin embargo, los sistemas solares, por efecto directo de la disponibilidad de área sobre la plancha del laboratorio de operaciones unitarias, junto con el tiempo de uso de la piscina por parte de los usuarios, no son aptos como sistemas autónomos para la tarea del calentamiento de la piscina. Por otra parte, desde el punto de vista económico, particularmente en los costos de inversión y operación, los sistemas, híbrido y bomba de calor, son quienes se presentan como los más atractivos, entre los cuales, basándose en los resultados de los índices de rentabilidad del Capítulo 5, el sistema híbrido se destaca como el más potencial.

Desde el punto de vista del modelo matemático elaborado en este trabajo de grado, es importante hacer énfasis en el hecho de que, el estar constituido por modelos de carácter empírico, implica la presencia de discrepancias con respecto a la información experimental, particularmente en la relación que comprende el fenómeno de la evaporación, ya que como fue mencionado en este trabajo de grado, dicho fenómeno alcanza valores de más del 50% del total de las pérdidas de energía. No obstante, con base en los resultados obtenidos en la sección de validación del modelo matemático, hay lugar a una tendencia aproximada entre la entre la respuesta teórica del modelo de Richter y la experimental, evidenciando un distanciamiento que ronda los  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte, el modelo de McMillan se presenta como el segundo con la mejor respuesta teórica, dando lugar a una desviación cuadrática media estándar de 0,0346. Respecto a los demás modelos, la divergencia adquiere una presencia significativa, lo cual pone en evidencia la importancia que hay que darle al coeficiente convectivo de transferencia de masa, siendo éste función netamente de la velocidad del viento local.

## 6. Referencias

- [1] C. Smith, L, George, and J, Randy. "Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swimming pool". Solar Energy. Vol. 53. No. 1. pp. 3-7. 1994.

- [2] P. K. Bansal, G. Xie “A unified empirical correlation for evaporation of water at low air velocity”. *Heat Mass Transfer*. Vol. 25. No 2. pp. 183-190. 1998.
- [3] E. Sartori. “A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces”. *Solar Energy*. Vol. 68. No. 1. pp. 77-89. 1999.
- [4] E. Ruiz, P. Martínez. “Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using experimentally validated TRNSYS model”. *Solar Energy*. Vol. 84. pp. 116-123. 2010
- [5] J. Duomarco, M. Pérez. “Solar heating of swimming pools”. *Building Simulation*. pp. 271-278. 2005.
- [6] G. Morrison, E. Donnelly. “Thermal performance of solar energy systems for swimming pools”. *New South Wales*; 1980; 0157-5104.
- [7] J. Woolley, C. Harrington, M. MODERA. “Swimming pools as heat sinks for air conditioners: Model design and experimental validation for thermal behavior of the pool”. *Building and Environment*. 2010.
- [8] T. Auer. “Assessment of an indoor or outdoor swimming pool”. En: 1996.
- [9] RETScreen, “Solar waterh project analysis”. En: Canada; 0-622-35674-8. 2001-2004.