



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

MODELADO SEMI-TRANSITORIO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA PARA
LA ALBERCA OLÍMPICA UNIVERSITARIA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
AGUILAR LÓPEZ DANIEL

TUTOR PRINCIPAL
DR. ELISEO MÁRTINEZ ESPINOSA
INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. VICENTE Y RODRÍGUEZ WILLIAM

Secretario: DR. SALINAS VÁZQUEZ MARTÍN

1^{er}. Vocal: DR. MARTÍNEZ ESPINOSA ELISEO

2^{do}. Vocal: DR. VALDÉS PALACIOS JOSÉ ALBERTO

3^{er}. Vocal: DR. JUÁREZ MARTÍNEZ LUIS CARLOS

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: POSGRADO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. MARTÍNEZ ESPINOSA ELISEO



FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, el Dr. Eliseo Martínez Espinosa ya que sin usted y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando más las necesite; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas. Gracias por sus orientaciones.

A mis profesores, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes mis profesores queridos, les debo mis conocimientos. Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

A mi familia, ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro, como una meta más conquistada.

Gracias por ser quienes son y por creer en mí

A mis amigos y compañeros de viaje, hoy culmina esta maravillosa aventura y no puedo dejar de recordar cuantas tardes y horas de trabajo nos juntamos a lo largo de nuestra formación. Hoy nos toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de vida y no puedo dejar de agradecerles por su apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles, por compartir horas de estudio. Gracias por estar siempre allí.

Finalmente a mi amada institución, la Universidad Nacional Autónoma de México y sobre todo al Posgrado de Ingeniería quienes me brindaron la mejor educación y herramientas para poder realizar con éxito este trabajo de investigación. Un goya por ello.

INDICE

LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABLAS.....	7
CAPITULO I	8
Introducción	8
1.1. Estado del arte	9
1.2. Softwares comerciales.	14
1.3. Justificación	16
1.4. Objetivos	16
1.5. Nomenclatura.....	16
CAPITULO II	18
Antecedentes	18
2.1. Mecanismos de transferencia de calor	18
2.2. Tasa de evaporación.....	19
2.3. Radiación solar	23
CAPITULO III	30
Caso de estudio	30
3.1. Descripción general de una alberca	30
3.2. Situación actual de la alberca de CU	31
3.3. Consumos de energía de la alberca	36
CAPITULO IV	37
Modelado termodinámico de la alberca.....	37
4.1. Descripción de la alberca	37
4.2 Balance de materia y energía transitorio.....	39
4.3 Pérdidas y ganancias de energía	42
4.4. Balance final	43
CAPITULO V	45
Metodología para el acoplamiento de términos estacionarios en el balance transitorio.....	45
5.1. Condiciones meteorológicas	45
5.2. Acoplamiento de términos estacionarios en el balance transitorio de energía	57
5.3. Conclusiones.....	59
5.4. Trabajos futuros	59

Referencias.....	60
ANEXOS	64
A.1. Simulación en TRNSYS.....	64
A.2. Consumo de combustible	66
A.3. Tabla de coeficientes convectivos y ecuación de (Ruiz & Martínez, 2010).	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parámetros y radiación solar para el 21 de enero de 2020. Programa propio...	28
Figura 2. Parámetros y radiación solar del 21 de octubre de 2020. Programa propio.....	29
Figura 3. Foto panorámica de las instalaciones de la AOU.	31
Figura 4. Foto de las dos calderas instaladas en el cuarto de máquinas.	32
Figura 5. Foto de las bombas de calor que se encuentran a un costado de la AOU.	32
Figura 6. Foto de la alberca y los calentadores solares sobre el techo de los edificios de la AOU.	33
Figura 7. Diagrama unifilar de los sistemas de la AOU.....	34
Figura 8. Diagrama esquemático del fenómeno. Elaboración propia.	37
Figura 9. Volumen de control del caso de estudio. Elaboración propia.....	43
Figura 10. Temperatura del aire el 31 de enero de 2019 en CU.	46
Figura 11. Temperatura del aire el 21 de marzo de 2019 en CU.	47
Figura 12. Temperatura del aire el 21 de junio de 2019 en CU.....	47
Figura 13. Temperatura del aire el 21 de septiembre de 2019 en CU.....	48
Figura 14. Temperatura del aire el 21 de diciembre de 2019 en CU.	48
Figura 15. Temperatura del aire en distintos días de 2019 en CU.....	49
Figura 16. Velocidad del viento el 31 de enero de 2019 en CU.	50
Figura 17. Velocidad del viento el 21 de marzo de 2019 en CU.	50
Figura 18. Velocidad del viento el 21 de junio de 2019 en CU.	51
Figura 19. Velocidad del viento el 21 de septiembre de 2019 en CU.....	51
Figura 20. Velocidad del viento el 21 de diciembre de 2019 en CU.	52
Figura 21. Velocidad del viento en diferentes días de 2019 en CU.	53
Figura 22. Humedad relativa el 31 de enero de 2019 en CU.....	53
Figura 23. Humedad relativa el 21 de marzo de 2019 en CU.....	54
Figura 24. Humedad relativa el 21 de junio de 2019 en CU.....	54
Figura 25. Humedad relativa el 21 de septiembre de 2019 en CU.	55
Figura 26. Humedad relativa el 21 de diciembre de 2019 en CU.....	55
Figura 27. Humedad relativa en diferentes días de 2019 en CU.....	56
Figura 28. Diagrama de flujo de la metodología para evaluar el balance de energía en MATLAB.....	58
Figura 29. Software TRNSYS.....	64
Figura 30. Gráficas en TRNSYS.....	64
Figura 31. Proyecto 2 en TRNSYS con bloque de tiempo.....	65
Figura 32. Gráficas del proyecto 2 en TRNSYS.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Bloques de comandos más comunes en proyectos de alberca en TRNSYS	15
Tabla 2. Rangos de operación de la correlación de Inan.....	22
Tabla 3. Rangos de operación de la correlación de Shah	22
Tabla 4. Radiación horaria y total a diferentes horas del 21 de enero de 2020.....	28
Tabla 5. Consumos mensuales de combustible en el 2016.....	36
Tabla 6. Días de muestra para los parámetros meteorológicos.	46
Tabla 7. Consumo de gas lp para las calderas de la AOU.....	66
Tabla 8. Coeficientes convectivos adaptado de (Orozco et.al., 2011).....	67

CAPITULO I

Introducción

Los depósitos de agua como lo son las albercas, tienen interacción con sus alrededores, una de ellas es el intercambio de calor debido a la diferencia de temperatura. La temperatura del agua de la alberca puede llegar a incrementar debido a la radiación solar y/o a una fuente de energía externa. Por el otro lado, también la alberca puede disminuir su temperatura a través de los mecanismos de transferencia de calor presentes en la naturaleza, tal es el caso de las pérdidas por conducción a través de las paredes, la convección debido al contacto con el aire, radiación y evaporación debido al cambio de fase que se genera al variar las humedades relativas del agua como del aire y a las distintas temperaturas que existen entre el agua y el aire a lo largo del día, semanas, meses y años.

La temperatura de la alberca depende de las condiciones climatológicas y si está expuesta directamente al medio ambiente o si está en confinada. En el caso de estudio tenemos una alberca al aire libre donde los parámetros climatológicos como lo son la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad afectan directamente a la temperatura del agua ya que se debe mantener en un rango de temperaturas como lo estipula la Federación Internacional de Natación (FINA) para el control de los usuarios (entre 27°C y 29°C).

A partir de la revisión de investigaciones previas relacionadas al análisis energético de las albercas y las pérdidas de calor, se encontró que los autores proponen un modelo estacionario del balance de energía para facilitar los cálculos ya que las condiciones meteorológicas al variar constantemente hacen muy complejo realizar un modelo transitorio aun cuando éste se acerca más a la realidad. Sin embargo, podemos observar que existe un patrón en el comportamiento de estos parámetros lo cual nos permite proponer un modelo semi transitorio y de esta manera aproximarnos mejor a la situación real del fenómeno.

La complejidad de la propuesta radica en encontrar el tipo de función que se ajusta mejor al fenómeno y que pueda contemplar la mayoría de los casos encontrados por las mediciones en el centro de control atmosférico de la UNAM. Una vez definidas las funciones, el mayor reto será lograr el acoplamiento de los términos estacionarios en el balance transitorio para obtener nuestro modelo semi transitorio.

1.1. Estado del arte

Se han realizado numerosos estudios sobre las pérdidas de energía térmica en albercas tanto al aire libre como en interiores, considerando varias condiciones como el clima, la ocupación de las instalaciones y los horarios y días de operación. Dentro de los autores que proponen métodos para calcular los requerimientos energéticos en albercas en recintos cerrados y que también pudieran ser alimentadas a través de calentadores solares son: (Asdrubali, 2009), (Bataineh, 2015), (Delgado, 2020) y (Mancic, Zivkovic, & Milosavljevic, 2014), quienes fueron complementando sus estudios gracias a los esfuerzos de precursores en el tema, sin embargo siempre tomando a la alberca como un sistema estacionario y modelándolo de tal forma.

(Asdrubali, 2009) En su trabajo realiza un modelo a escala de una alberca en un recinto para realizar experimentos en un banco de pruebas donde tienen control de los parámetros climatológicos más importantes como la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento para poder observar las pérdidas de evaporación en diferentes condiciones y proponer un modelo predictivo de las pérdidas por evaporación y así compararlo con lo publicado por otros autores. Los resultados que obtuvo con su modelo propuesto comparado con (Shah) y (Smith) es que esta dentro de los valores propuestos, aunque menciona que (Smith) tiende a sobre estimar las pérdidas por evaporación.

(Bataineh, 2015) Presenta en su trabajo un análisis transitorio del calentamiento de agua a partir de calentadores solares en una alberca dentro de un recinto, en donde comienza describiendo el funcionamiento de los calentadores solares y el tanque de almacenamiento de agua caliente. Este trabajo si menciona la importancia de que los calentadores solares operen de la mejor manera sobre todo en épocas de invierno por lo que describen como deberían ir instalados con respecto a la geometría solar para aprovechar la mayor radiación solar. Posteriormente, proponen un balance energético considerando la variación con respecto al tiempo, pero solo de la radiación solar y las demás pérdidas de calor, así como de las pérdidas por evaporación no son muy específicos si trabajan con valores promedios o si las consideran variantes con respecto al tiempo. Finalmente hacen un análisis económico para conocer el mínimo de área que deben cubrir los calentadores solares con respecto al volumen de agua para ahorrar energía pero que no sacrifique mucho la inversión.

En el trabajo de (Delgado y García, 2020), se estima la demanda de energía térmica de una alberca techada a partir de una simulación realiza en TRNSYS y la validan comparando su modelo con otras albercas las cuales están siendo monitoreadas todo momento. Lo que hacen es utilizar el balance de energía propuesto por (Zuccari, 2017) y para resolver las pérdidas de calor por los mecanismos de transferencia que se tienen en la alberca utiliza las ecuaciones propuestas por (Brambley y Wells, 1983), de esa manera junto con el software de TRNSYS genera

un modelo dinámico e integra las ecuaciones al sistema para obtener el análisis energético de la alberca. La alberca que estudian tiene un sistema de calentamiento híbrido ya que además de utilizar calentadores solares, también usan calderas con biomasa lo que comparte un poco la forma en la que se encuentra el sistema de calentamiento de agua del presente estudio y ver como se interconectan. Finalmente, los resultados muestran buena aproximación con otros.

Por su parte, (Mancic et.al., 2014) proponen un modelo matemático para analizar las pérdidas de calor en una alberca dentro de un edificio generando un proyecto en TRNSYS para corroborar su propuesta matemática. Ellos además de considerar los mecanismos de transferencia de calor ya propuestos por los demás autores, también consideran la ocupación de la alberca por los usuarios y como varía esta pérdida por el número de personas. El sistema de calentamiento de su alberca también es híbrido ya que tienen bombas de calor y calentadores solares considerados dentro del modelo matemático como ganancias de calor. Finalmente, mencionan el área que debe cubrir los calentadores solares para obtener ahorros de energía considerables.

En los artículos publicados, los autores proponen sus ecuaciones de energía considerando las pérdidas de calor por evaporación, convección, conducción y radiación, principalmente. Sin embargo, los mecanismos de transferencia de calor los calculan de manera estacionaria, es decir, que no varía respecto al tiempo. Este modelado de la temperatura de la alberca es válido en grandes intervalos de tiempo, pero si queremos analizar lo que sucede en la alberca en periodos de tiempo críticos (cortos) que son por las madrugadas antes de comenzar la operación, el modelo propuesto por los autores, al ser constante en el tiempo, no nos permite tener resultados más apegados a la realidad en estos periodos donde es importante el análisis para desarrollar propuestas de ahorro de energía.

Los autores que se han dedicado a proponer modelos energéticos para albercas al aire libre son: (Almanza & Lara, 1994), (Bernhard, Marc, Quilichini, & Castaing-Lasvignottes, 2019), (Buonomano, De Luca, Figaj, & Vanoli, 2015), (Dongellini, Falcioni, Martelli, & Morini, 2015), (Govaer & Zarmi, 1981), (Kaci, y otros, 2017), (Lovell, Rickerby, & al., 2019), (Lugo, Morales, Best, Gómez, & García-Valladares, 2019), (Nouanegue, Sansregret, Le Lostec, & Daoud, 2011), (Ruiz & Martínez, 2010) y (Zuccari, Santiangeli, & Orecchini, 2017), como es nuestro caso de estudio, y, por ende los artículos más revisados para buscar si alguno de ellos proponía un modelo transitorio o semi-transitorio, sin embargo lo más cercano que se encontró a esto fue una propuesta por los autores (Ruiz & Martínez, 2010) donde presentan una ecuación del modelo matemático del balance de energía de manera transitoria, solo que al momento de analizar el caso de estudio simplifican el balance regresando a la idea estacionaria mencionando que hacerlo por la otra vía es muy complejo.

El artículo de (Bernhard et.al., 2019) se divide en tres partes importantes: la primera parte presenta un modelo global de una alberca al exterior donde presenta de manera esquemática las pérdidas y las ganancias de energía en el sistema, propone un balance de energía. En la segunda parte aplican el modelo en una alberca situada en una provincia en Francia y analizan los parámetros importantes para obtener una base de datos. El estudio no es muy amplio ya que se concentra solo por las noches donde no están operando los equipos auxiliares. En la tercera parte se analizan y comparan los resultados obtenidos en el experimento con los datos estadísticos en la alberca, y el modelo propuesto en la primera parte.

(Dongellini et.al., 2015) estudian el calentamiento del agua de tres diferentes tipos de albercas: chapoteadero, alberca pública y olímpica. Mediante tres diferentes tipos de calentadores solares (de cuerpo oscuro, de cuerpo translucido y termosifones), ubicados en la provincia de Bologna en Italia. Los autores proponen utilizar Matlab para crear un modelo dinámico donde mediante bloques de operaciones y comandos evalúen las entradas y salidas del sistema. Proponen tres grandes bloques: el primero es con datos climatológicos de dos meses con intervalos de una hora. El segundo bloque son los calentadores solares con su geometría solar y por último el tercer bloque que contiene los datos de la alberca como sus dimensiones y la temperatura deseada, así como las pérdidas y ganancias de energía (aquí es donde está su balance de energía). Finalmente, al integrar todos estos datos y unir los bloques en el software colocando las ecuaciones correspondientes analizan el sistema en su totalidad.

Los autores encontraron una gran relación entre el área de superficie de los colectores con el área total de la alberca y que, para cada tamaño de esta, la tecnología de colector utilizada podía variar. También algo importante que descubrieron fue que el parámetro principal es la temperatura en la alberca, ya que esta debe estar definida siempre dentro del rango permitido (26 a 32 °C). También descubrieron que la temperatura decae más rápido por las noches mientras más pequeño sea el volumen de la alberca, es decir, cae más rápido la temperatura en el chapoteadero que en la alberca olímpica. De igual manera al analizar todas las pérdidas de calor en la alberca, descubrieron que los tres medios principales que propician la disminución de la temperatura son: la evaporación del agua, la irradiación y la reposición del agua.

Para disminuir las pérdidas de calor ellos proponen colocar una cubierta por las noches y precalentar el agua de reposición de la alberca para acercarse más a la temperatura de confort y la diferencia de temperatura no sea tan grande. Por otra parte, los autores concluyen que la mejor opción de tecnología solar son los paneles solares con cuerpo oscuro para albercas pequeñas como piscinas comunitarias o chapoteaderos y los termosifones para albercas de carácter competitivo u olímpico.

El artículo de (Kaci et.al.,2017) propone una simulación del calentamiento del agua de una alberca situada en Algeria, cerca del desierto del Sahara, a partir de un

sistema solar híbrido ya que parte de la carga térmica la cubrirá el sistema solar y la otra parte mediante una caldera. El trabajo presenta un balance de energía, sin embargo, las ecuaciones no son muy claras ya que la numeración de las ecuaciones es confusa, en ningún momento proponen un modelo transitorio ya que no se encuentra la variable del tiempo. Las condiciones de sitio para la simulación que hacen con ayuda del software TRANSOL es el área de la alberca (250 m²), 1.5 m de profundidad, 12 horas de operación, un área de los colectores de 126 m², la temperatura deseada la colocan en 26°C y finalmente los datos solares locales.

Toman datos de una base llamada METEORONORM para graficar la radiación solar mensual en un año, siendo la mayor en Julio. La siguiente gráfica muestra la carga térmica necesaria cada mes del año siendo en la época más calurosa (Junio – Septiembre) una carga baja. Después se comparan las cargas térmicas de los colectores solares opacos y translucidos viendo que tienen una mayor eficiencia los primeros debido a su rendimiento óptico. La refracción solar es mayor en los colectores con vidrio que los opacos.

Como conclusión, los colectores solares de cuerpo opaco muestran un mejor rendimiento que los translucidos debido a su rendimiento óptico. Estos dispositivos de calentamiento de agua a partir del sol muestran un gran potencial para el ahorro de energía durante el verano.

Lugo et.al., 2019 realizaron una simulación numérica utilizando el software de TRNSYS y validan sus resultados con una base de datos meteorológicos realizada por parte de la UNAM. La alberca se encuentra en el estado de Morelos en México donde se tiene un clima cálido, sin embargo, esta alberca está al aire libre y hay varios objetos que generan sombra por lo que ellos consideran dentro del estudio un factor de sombra que lo replican para todo un año. En su balance de energía proponen crear un nuevo bloque para TRNSYS en donde evaluarán a la alberca, se basan en el balance de energía propuesto por (Ruiz y Martínez, 2010) el cual lo integran al software, sin embargo, en el trabajo de (Ruiz y Martínez, 2010) ellos proponen una ecuación transitoria sin embargo no la aplican debido a que consideran es muy complejo resolverla.

Finalmente, en sus resultados observan que su modelo propuesto en TRNSYS se asemeja a los datos reportados por la UNAM y validan su trabajo además de recomendar utilizar calentadores solares en México ya que es viable recuperar la inversión y que en climas cálidos como Morelos se aprovecha mucho su funcionamiento.

Ruiz y Martínez, 2010, analizan el sistema de calentamiento de agua de una alberca al aire libre usando un modelo experimental el cual lo validan a través de TRNSYS. Dentro de la investigación observan que las pérdidas por evaporación son el mecanismo de transferencia más importante que tiene la alberca hacia sus alrededores, es por ello que utilizan 6 diferentes modelos de evaporación de la literatura para observar cuál de ellos encaja mejor en su balance energético el cual

lo meterán al software para realizar su experimento, sin embargo, aunque su balance energético considera que es un proceso transitorio comentan que es complicado de resolver por lo que aproximan su modelo a uno estacionario, de esa manera lo evalúan en el software. La alberca que están analizando tiene un sistema de calentamiento por calentadores solares y el objetivo de su modelo experimental es calcular el área que debe tener su alberca en calentadores solares para ahorrar energía y que la inversión no sea muy elevada, ya que mencionan que utilizando calentadores solares se puede asegurar un mayor tiempo de utilización de la alberca.

Otro aspecto muy importante a tratar con cuerpos de agua en contacto con el medio ambiente es la evaporación y en este tema todos los autores coinciden que es el mecanismo de transferencia de calor predominante en el fenómeno y que este cambio de fase que se genera entre el agua y el aire y su incremento de humedad juega un papel muy importante en las pérdidas de calor, sin embargo, para poder evaluar la tasa de evaporación varios autores se dieron a la tarea de realizar experimentos y bancos de prueba para controlar los parámetros y condiciones climatológicas, de esta manera y revisando las interacciones entre los datos propusieron correlaciones que se aproximarán a sus rangos de operación y por ende a sus condiciones de sitio, dentro de estos autores se destacan (Ciuman & Lipska, 2018), (Kumar & Arakeri, 2015), (Poós & Varju, Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations, 2020), (Inan & Atayilmaz, 2017), (Shah M. , 2018) y (Tang & Etzion, 2004).

De los anteriores autores, (Poós & Varju, Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations, 2020) realiza su propio experimento para obtener su propia correlación, sin embargo, además, evalúa sus resultados y los compara con otras 10 correlaciones teóricas propuestas por otros autores, dentro de ellas están las de (Inan & Atayilmaz, 2017), (Shah M. , 2018) y (Tang & Etzion, 2004), siendo la primera y la última las más aproximadas a los resultados arrojadas por sus experimentos, sin embargo la primera todavía se acerca más. Finalmente opte por utilizar tanto la primera como la segunda correlación tanto por la aproximación de la de (Inan & Atayilmaz, 2017), como por la correlación que permite evaluar la tasa de evaporación fuera de los rangos (Shah M. , 2018) de la primera.

1.2. Softwares comerciales.






Algunos autores se apoyan del software TRNSYS para modelar su proyecto, tales como (Delgado, 2020), (Lugo et.al., 2019), (Buonomano et.al., 2015) y (Ruiz & Martínez, 2010). Este software es comercial y tiene un costo, lo que no lo hace muy accesible para todo el público, sin embargo, tienen una versión de prueba que permite hacer y analizar un proyecto pequeño (5 componentes). En nuestro caso, modelar la alberca requiere más componentes por lo que no es posible hacerlo con la versión de prueba. Sin embargo, no es necesario depender del software para poder analizar las pérdidas de calor y el suministro de energía térmica debido a que es importante primero entender el fenómeno para estar seguros de estar haciendo lo correcto e introduciendo los datos y pasos en el programa. Para resolver la ecuación de la energía podemos apoyarnos de softwares que permiten realizar cálculos con varias variables tal es el caso de Matlab.

Como se mencionó anteriormente, existe un software llamado TRNSYS, el cual es un programa de simulación de procesos térmicos. Al inicio era específicamente para aplicaciones de energía solar, sin embargo, se fue actualizando y fue creciendo tal que ahora se utiliza para muchas más aplicaciones, dentro de ellas, el análisis a las albercas.

El programa es simple en cuanto a su operación, ya que es mediante bloques interconectados los cuales ya tienen predefinidos valores que el usuario debe suministrar, sin embargo, el desafío real se encuentra al conocer a fondo el programa, pero sobre todo, conocer bien el fenómeno que se desea estudiar para desarrollar bien el proyecto ya que el software es una caja negra donde solo metemos valores de parámetros y nos arroja resultados, si hay algo que no está correcto mostrara alertas de error, pero si hay algo que el sistema detecto bien, pero no es algo que representa el fenómeno adecuado y no logramos descubrirlo, obtendremos resultados erróneos que pasan desapercibidos.

A continuación, se presenta una tabla con los bloques más utilizados en el análisis de las albercas junto con sus breves descripciones, así como las variables de entrada y salidas propuestas por los autores de los diversos artículos revisados para este presente documento:

Tabla 1. Bloques de comandos más comunes en proyectos de alberca en TRNSYS

BLOQUE	DESCRIPCIÓN	ENTRADAS	SALIDAS
 Type69b Temperatura de cielo efectiva para el intercambio de radiación de onda larga.	Determina la temperatura del cielo efectiva, la cual es utilizada para calcular el intercambio de radiación de larga onda entre una superficie al exterior arbitraria y la atmosfera. La temperatura de cielo efectiva es siempre menor que la temperatura ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> • T_{amb} • T_{pr} • H_d • H_b 	<ul style="list-style-type: none"> • T_{sky} • Factor de nubosidad del cielo
 Type33e Psicrometría: Temperatura de bulbo seco y humedad relativa conocida.	Este componente toma como entradas la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire húmedo y llama la rutina psicrométrica de TRNSYS.	<ul style="list-style-type: none"> • T_{bs} • Φ_{rel} • P_{atm} 	<ul style="list-style-type: none"> • Φ_{abs} • T_{bh} • h • T_{bs} • Φ_{rel} • P_{atm}.
 Type15-6 Procesador de datos meteorológicos	El propósito de este componente es leer los datos en intervalos regulares de tiempo desde un archivo externo de datos meteorológicos, interpolando los datos (incluyendo la radiación solar en superficies inclinadas) en pasos de tiempo menores a una hora	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo precargado a la base de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los datos cargados en la base de cierta ubicación.
 Type14h Función para forzar el tiempo	En una simulación transitoria, a veces es conveniente utilizar funciones que fuercen un tiempo dependiente que tiene un comportamiento característico por un patrón repetido. El patrón de la función forzada se establece por un conjunto de puntos de datos discretos indicando el valor de la función a varios tiempos a través de un ciclo.		<ul style="list-style-type: none"> • Valor promedio de la función. • Valor instantáneo de la función sobre el paso de tiempo.
 Type14b Función para forzar extracciones de agua.	Esta versión del componente usa las unidades de kg/hr para crear funciones de forzado de extracción de agua.		<ul style="list-style-type: none"> • Valor promedio de extracción de agua. • Valor instantáneo de extracción de agua.

En conclusión, el software es útil para simular procesos térmicos y dentro de ellos las albercas. Sin embargo, el costo para adquirirlo, así como, la incertidumbre que genera el conocer el proceso de simulación al ser un programa de caja negra, es decir, que solo se meten valores y arroja resultados sin poder analizar el proceso interno, hacen que se opte por revisar cada componente del sistema de calentamiento de la alberca, así como las pérdidas de calor por separado. Posteriormente, integrar todo en nuestro modelo semi transitorio y analizarlo mediante otro software de cálculo el cual es MATLAB.

1.3. Justificación

La revisión del estado del arte y del software comercial TRNSYS muestran que el estudio de albercas es desarrollado sin el acoplamiento adecuado de términos estacionarios en el balance de energía transitorio (enfoque de cálculo integral) y sin poner énfasis en las madrugadas. Por consiguiente, se propone realizar el balance de energía transitorio en la alberca de Ciudad Universitaria para el planteamiento de un programa de ahorro de energía mediante un método semi-transitorio.

1.4. Objetivos

Desarrollar una propuesta metodológica semi-transitoria para acoplar los términos estacionarios de flujos de calor (pérdidas y ganancias) en el balance de energía transitorio de la alberca con la finalidad de plantear una propuesta de ahorro y uso eficiente de la energía.

1.4.1. Objetivos específicos:

- Estudiar las pérdidas y ganancias de calor presentes en la operación de una alberca.
- Estudiar el comportamiento de la temperatura, humedad y velocidad del viento en el tiempo.
- Planteamiento del acoplamiento de términos estacionarios en un balance de energía transitorio.

1.5. Nomenclatura

A continuación se presenta la simbología presente en el trabajo la cuál facilita la búsqueda del significado de cada símbolo dentro de las ecuaciones propuestas:

símbolos	
\dot{q}	Flujo de calor en [W/m ²]
K	Conductividad térmica [W/mK]
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m ² K]
T	Temperatura [°C]
ε	Emisividad [-]
σ	Constante de Stefan Boltzmann [W/m ² K ⁴]
E	Tasa de evaporación [g/m ² s]
V	Velocidad del viento [m/s]
P	Presión [kPa]
Φ	Humedad relativa [%]
h_{fg}	Entalpía de evaporación [kJ/kg]
h	Entalpía específica [kJ/kg]
G	Irradiancia [W/m ²]
δ	Declinación [°]
φ	Latitud [°]
L	Longitud [°]
Θ_z	Angulo cenital [°]
H	Irradiación diaria [J/m ²]
K_T	Factor de nubosidad [-]
r	Factor de radiación [-]
\dot{m}	Flujo másico [kg/s]
ρ	Densidad [kg/m ³]
N	Número de nadadores [-]
Vol	Volumen [m ³]
t	Tiempo [s]
subíndices	
cond	Conducción
conv	Convección
rad	Radiación
evap	Evaporación
sol	Solar
s	salida
e	entrada
∞	ambiente
on	extraterrestre
sc	constante solar
d	difusa
b	directa
nad	nadadores
sup	superficie
oc	ocupada

CAPITULO II

Antecedentes

En este capítulo se discutirán los mecanismos de transferencia de calor que existen en la alberca. En este caso es la alberca con el medio ambiente, dentro de ellos tenemos la conducción, la convección y la radiación. Se tratará de manera aparte la evaporación ya que, si bien también es un mecanismo de transferencia de calor, este tiene una gran relevancia en los cuerpos de agua por lo que se hablará con más detalle. Finalmente se revisará el tema de la radiación solar ya que la alberca puede llegar a elevar su temperatura debido a la interacción del sol con el agua. La relevancia del sol y como su comportamiento en el año puede ser un elemento muy importante para ahorrar energía.

2.1. Mecanismos de transferencia de calor

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas (Incropera, 1996). En nuestro caso la conducción se da del agua de la alberca hacia las paredes sólidas.

Para la conducción de calor se utilizará la ecuación de Fourier unidimensional, la cual modela la velocidad con que se transfiere el calor en una dirección por unidad de área perpendicular a la dirección de la transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura. La constante de proporcionalidad, k , es la conductividad térmica y es característica del material de la pared.

$$\dot{q}_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \left[\frac{W}{m^2} \right] \dots \dots \dots (1)$$

Para la transferencia de calor por convección se combina el mecanismo de calor por conducción (difusión) y el movimiento global del fluido. Se da entre dos superficies y que una esté en movimiento, en nuestro caso, la superficie del agua de la alberca y el aire ambiente. Mientras mayor sea la velocidad de movimiento del aire, mayor será la transferencia de calor por convección.

La ecuación que describe la transferencia de calor por convección es la ley de enfriamiento de Newton, la cual menciona que el flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido por una constante de proporcionalidad llamada "coeficiente de transferencia de calor

por convección”, el cual depende de la geometría de la superficie y otras propiedades termodinámicas del fluido.

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \left[\frac{W}{m^2} \right] \dots\dots\dots (2)$$

Para conocer el coeficiente convectivo, podemos apoyarnos del modelo propuesto por (Ruiz & Martínez, 2010) el cual considera la velocidad del viento dentro de la ecuación, ya que la alberca está a la intemperie y la superficie del agua interactúa con las corrientes de aire. La ecuación que modela el valor del coeficiente convectivo es:

$$h = 3.1 + (4.1 * V) \dots\dots\dots (3)$$

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Sin importar la forma, la radiación se atribuye a cambios en las configuraciones electrónicas de sus átomos.

La radiación que la superficie emite se origina a partir de a energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área se denomina la potencia emisiva superficial.

$$\dot{q}_{rad} = \epsilon\sigma T_s^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

La ley de Stefan Boltzmann se utiliza para la radiación térmica donde T_s es la temperatura absoluta [K] de la superficie, σ es la constante de Stefan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) y ϵ es una propiedad radiativa de la superficie llamada emisividad.

2.2. Tasa de evaporación

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas de calor en una alberca son por evaporación, conducción, convección y radiación, siendo la evaporación la predominante en este tipo de fenómenos.

La evaporación es un proceso simultaneo de transferencia de masa y calor (Poos, 2020). Debido a que el agua de la alberca se encuentra en fase líquida saturada y el aire empieza a aumentar su humedad al absorber el agua, parte de la masa del agua de la alberca se transfiere al aire al evaporarse, cuando el aire más cercano al agua ya se ha humedecido lo suficiente este se desplaza al aumentar su densidad y permite que otra capa de aire con menor humedad entre en contacto con la superficie de agua de la alberca, si el aire se encuentra tranquilo, es decir que no

hay movimiento, la transferencia de masa y calor es menor, pero cuando la velocidad del viento aumenta, la transferencia también lo hace y se acelera el proceso.

La transferencia de masa y calor entre la superficie líquida saturada y el aire se dan por la diferencia de presiones parciales de vapor de ambas, también por la diferencia de temperatura entre ellas, la humedad relativa del aire y si la temperatura del agua está por debajo de la temperatura de punto de rocío del aire. Sin embargo, si las temperaturas son iguales y el aire está saturado de humedad no habrá pérdidas por evaporación.

Para analizar las pérdidas por conducción, tenemos la Ley de Fourier, para la convección, la Ley de enfriamiento de Newton y para la radiación, la Ley de Stefan Boltzmann, sin embargo, para modelar las pérdidas por evaporación, se han realizado experimentos y bancos de prueba para obtener datos experimentales que expliquen el fenómeno que ocurre y qué parámetros son los importantes de analizar y considerar al momento de presentarse la evaporación. Es por ello que buscando autores que realizaran dichos experimentos y que estos pudieran ser aplicados a nuestro objeto de estudio que son las albercas al aire libre, se encontró el trabajo de Tibor Poos y Evelin Varju el cual lleva por nombre "Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations", publicado en la revista "International Journal of Heat and Mass Transfer", en el año 2020, donde ellos realizan sus estudios diseñando y elaborando un banco de pruebas tomando en cuenta las variables físicas que consideraron eran las más representativas en el fenómeno después de haberlo analizado. Llegaron a la conclusión que estas variables son: las temperaturas del agua y del aire, por ende, sus presiones parciales de vapor a esas temperaturas, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento.

La tasa de evaporación depende de las propiedades del líquido y las condiciones ambientales, como la temperatura, velocidad, humedad y turbulencia del aire. La evaporación puede ocurrir en convección natural o forzada. Si la velocidad del aire está por arriba de 0.15 m/s se considera que es convección forzada, estas condiciones se pueden encontrar en albercas al aire libre.

Estos parámetros son monitoreados en periodos instantáneos, cortos o grandes por los centros meteorológicos y/o climatológicos tanto locales, nacionales o mundiales, por equipos que cada vez son más precisos. De esta manera los autores pudieron controlar los parámetros en su banco de pruebas y obtener datos para posteriormente analizarlos y comprender su comportamiento, así como establecer los límites en donde el fenómeno pudiera tener una cierta tendencia y se pudiera obtener una correlación entre los factores involucrados en las pérdidas por evaporación.

Para comprobar que estuvieran haciendo un buen trabajo, corroboraron sus datos experimentales con las correlaciones propuestas por los trabajos publicados por

otros autores y decidir qué correlaciones eran las que más se ajustaban a sus resultados experimentales. De las 10 correlaciones teóricas, las correlaciones de (Inan & Atayilmaz, 2017), así como la de (Tang & Etzion, 2004) fueron las más aproximadas a sus valores experimentales, sin embargo, ambas correlaciones pueden ser aplicadas en casi los mismos rangos de las condiciones físicas y ambientales, es por ello que se seleccionaron las que más se acercaba de estas dos la cual es la de (Inan & Atayilmaz, 2017) y si las condiciones ambientales se salían del rango se utilizará la correlación de Mohammed Shah publicada en el artículo “Improved model for calculation of evaporation from water pools” publicado en la revista “Science and Technology for the Built Environment” en 2018. Cabe aclarar que en el artículo de Inan Mehmet & Atayilmaz Sevket llamado “Experimental investigation of evaporation from a horizontal free water surface” publicado en “Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences” en 2017, realizan un experimento similar a (Poos & Varju, 2020) y determinan sus rangos de operación de la correlación, sin embargo, en el trabajo de (Poos & Varju, 2020) observan que el rango de operación de la correlación propuesta por (Inan & Atayilmaz, 2017) se puede extender sin que se vean afectados los resultados.

Con las dos correlaciones se pretende obtener la tasa de evaporación y por consiguiente las pérdidas de calor por evaporación. A continuación, se presentan las dos correlaciones que se ocuparan en el análisis de las pérdidas de calor por evaporación, así como los rangos de operación de cada una:

Correlación de Inan & Atayilmaz:

$$E = (0.280 + 0.784V) \left[\frac{(P_s - \phi P_\infty)^{0.695}}{h_{fg}} \right] \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

$$E = \text{tasa de evaporación} \left[\frac{g}{m^2s} \right]$$

$$V = \text{velocidad del viento} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$P_s = \text{presión parcial de vapor del agua a la temperatura del agua [Pa]}$$

$$P_\infty = \text{presión parcial de vapor del aire a la temperatura del aire ambiente [Pa]}$$

$$\phi = \text{humedad relativa del aire [-]}$$

$$h_{fg} = \text{entalpía de evaporación} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Rangos de operación

Tabla 2. Rangos de operación de la correlación de Inan

T_s	13 – 24.8	[°C]
T_∞	16 – 60	[°C]
V	0.2 – 2.04	[m/s]
Φ	0.038 – 0.7	[-]

Correlación de Shah:

$$E = (0.00005) \left(\frac{V}{0.12} \right)^{0.8} (P_s - \phi P_\infty) \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

$$E = \text{tasa de evaporación} \left[\frac{kg}{m^2h} \right]$$

$$V = \text{velocidad del viento} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$P_s = \text{presión parcial de vapor del agua a la temperatura del agua [Pa]}$$

$$P_\infty = \text{presión parcial de vapor del aire a la temperatura del aire ambiente [Pa]}$$

$$\phi = \text{humedad relativa del aire [-]}$$

Rangos de operación

Tabla 3. Rangos de operación de la correlación de Shah

T_s	7 – 94	[°C]
T_∞	6 – 51	[°C]
V	0 – 1.9	[m/s]
Φ	0.16 – 0.98	[-]

Ya que obtuvimos la tasa de evaporación con las correlaciones seleccionadas en el trabajo, para obtener las pérdidas de calor por evaporación, multiplicamos la tasa de evaporación por el área superficial, el cual se refiere al largo y ancho de la alberca que está en contacto con el medio ambiente, y multiplicamos también por la entalpía de evaporación (cambio de fase). De esta manera obtenemos las pérdidas de evaporación en un momento dado, sin embargo, como queremos observar la variación de las pérdidas a lo largo del tiempo, debemos apoyarnos de los datos meteorológicos capturados en la base de datos del centro de control atmosférico para calcular estas pérdidas en diferentes momentos del día y analizar si son similares en diferentes lapsos de tiempo para así poder delimitarlos y facilitar el estudio en un estadio semi transitorio.

2.3. Radiación solar

Un análisis muy importante en el estudio de las albercas y cualquier cuerpo de agua es la radiación solar y cómo se comporta esta a lo largo del día, en cada mes del año ya que, en diferentes periodos estacionales, se obtendrán distintos niveles de radiación solar. Otros factores importantes son la ubicación del lugar en el mundo con respecto a la latitud (ecuador) y longitud (meridianos), el clima, sobre todo si en ese lugar se encuentran cielos más despejados o nublados a lo largo del año y finalmente si hay objetos tanto naturales como artificiales que generan sombra total o parcial a lo largo del día.

Todos estos factores que serán descritos a continuación son muy importantes ya que determinaran si las pérdidas de calor disminuyen o se mantienen.

El estudio del sol, la constante solar, la geometría solar y la radiación solar son muy importantes para el tema del calentamiento de agua de las albercas ya que determinar muy bien estos parámetros, monitorearlos y simular el comportamiento de los mismos a lo largo de un día y de cada día del año puede servir de mucho al momento de proyectar las ganancias de calor por la radiación solar y observar en que momentos del día se puede aprovechar de mejor manera la radiación solar y en qué momentos se debe subsanar el déficit de radiación solar para mantener la temperatura del agua deseada en todo momento.

Comenzamos con el sol y su constante solar. El sol se encuentra a una distancia de 1.495×10^{11} metros de la Tierra lo que es una unidad de distancia astronómica y la constante solar es de 1367 W/m^2 . La constante solar se refiere a la energía proveniente del sol por unidad de tiempo recibida por unidad de área en una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación fuera de la atmosfera, en otras palabras, es la radiación solar total que recibe la Tierra fuera de la atmosfera.

También es importante conocer la radiación solar extraterrestre la cual es mayor a la constante solar debido a que este análisis se hace considerando si la Tierra no tuviera atmosfera ya que la atmosfera sirve como filtro para las ondas electromagnéticas e impide que muchas de ellas ingresen a la superficie. Esta radiación extraterrestre varia con respecto a los meses del año debido a que la Tierra al estarse trasladando sobre su órbita esta se encuentra más cerca del Sol en un periodo y más lejos en otro, sin embargo, la variación no pasa de un 3.3%. La ecuación que representa esto es la siguiente:

$$G_{on} = G_{sc} * (1.000110 + 0.034221\cos B + 0.001280\sin B + 0.000719\cos 2B + 0.000077\sin 2B) \dots\dots\dots (7)$$

Donde G_{on} es la radiación extraterrestre incidente en el plano normal a la radiación en el n-ésimo día del año y B está dado por:

$$B = (n - 1) * \left(\frac{360}{365}\right) \dots\dots\dots (8)$$

2.3.1. Radiación directa y difusa

Otras definiciones que son importantes para los procesos térmicos son descritas a continuación con las cuales debemos trabajar para conocer la radiación solar que se tendrá en un lugar y momento específico.

- Radiación directa. - es la radiación solar que proviene del sol y que no fue dispersada por la atmosfera.
- Radiación difusa. - radiación solar proveniente del sol que cambió de dirección por ser dispersada por la atmosfera.
- Radiación total o global. - es la suma de la radiación directa y difusa.
- Irradiancia. - es la radiación total que incide por unidad de área en una superficie.
- Irradiación. - es la irradiancia recibida en un lapso de tiempo, este puede ser en una hora o un día.

2.3.2. Geometría solar

La relación geométrica entre un plano ubicado en el planeta con cualquier orientación y en cualquier momento del tiempo así como la entrada de la radiación solar directa, que en otras palabras es, la posición relativa del sol a ese plano, se puede representar mediante los siguientes ángulos:

- Latitud (Φ). - la localización angular con respecto al ecuador, norte hacia arriba y sur hacia abajo. $-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$
- Declinación (δ). - la posición angular del sol con respecto al mediodía solar con respecto al plano del ecuador, este no rebasa los trópicos de capricornio y cáncer. $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$
- Longitud (L). - la localización angular con respecto al meridiano cero (meridiano de Greenwich). $-180^\circ \leq L \leq 180^\circ$

Estos ángulos nos ayudan a ubicar el espacio a estudiar en el planeta, ahora bien, los siguientes ángulos nos servirán para ubicar la posición del sol en el cielo:

- Angulo cenital (θ_z). - el ángulo que se forma entre la vertical y la línea del sol, esto es, el ángulo de incidencia de la radiación directa en la superficie horizontal.
- Angulo de altitud solar (α_s). - es el ángulo entre la horizontal y la línea del sol, es decir, el complemento del ángulo cenital.

Existen más ángulos que se utilizan en la geometría solar, sin embargo, para nuestro trabajo estos son los más relevantes y son de gran ayuda para poder modelar el comportamiento de la radiación solar disponible a lo largo del año en cada momento del día ya que a pesar de que la Tierra se mantiene en movimiento a lo largo del día y del año, la órbita que recorre no ha cambiado significativamente en todo este largo tiempo de vida del planeta por lo que podemos apoyarnos de las siguientes ecuaciones propuestas por los científicos que estudian el tema de los procesos solar térmicos y la geometría solar.

Para calcular la declinación podemos ocupar la ecuación de (Spencer, 1971) la cual es mucho más precisa que la de (Cooper, 1969):

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) * (0.006918 - 0.399912\cos B + 0.070257\sin B - 0.006758\cos 2B + 0.000907\sin 2B - 0.002697\cos 3B + 0.00148\sin 3B) \dots\dots\dots (9)$$

La ecuación que relaciona el ángulo de la radiación directa en una superficie θ a los otros ángulos es:

$$\cos \theta = \sin \delta * \sin \phi * \cos \beta - \sin \delta * \cos \phi * \sin \beta * \cos \gamma + \cos \delta * \cos \phi * \cos \beta * \cos \omega + \cos \delta * \sin \phi * \sin \beta * \cos \gamma * \cos \omega + \cos \delta * \sin \beta * \sin \gamma * \sin \omega \dots\dots(10)$$

Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es el ángulo cenital del sol, θ_z . Este valor estará dentro de los 0° y 90° cuando el sol esté sobre el horizonte lo que simplifica la ecuación anterior en:

$$\cos \theta_z = \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \phi * \sin \delta \dots\dots\dots (11)$$

2.3.3. Radiación diaria directa y difusa

Estudios de base de datos de radiación diaria han mostrado que la fracción promedio que es difusa es una función del índice de claridad diaria (K_T) lo que nos permite aproximar cuanta radiación que se tiene al día es directa y cuanta es difusa.

La radiación total diaria, así como el índice de claridad son datos que se pueden obtener de estaciones meteorológicas y que nos pueden ayudar a saber cuánta radiación se puede llegar a aprovechar a lo largo del día. Para poder ocupar estos datos y expresarlos a lo largo del día, utilizaremos las siguientes ecuaciones:

La correlación de (Collares–Pereira & Rabl, 1979) para la relación de radiación difusa con respecto a la total es:

$$\frac{H_d}{H} = 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.865K_T^3 + 14.648K_T^4 \dots\dots\dots (12)$$

Ahora bien, para poder distribuir la radiación aproximada que se tiene en días nublados, como es nuestro caso, necesitamos apoyarnos de correlaciones para pasar radiación diaria a una horaria con base en nuestros ángulos solares.

La estimación de radiación horaria a partir de los datos diarios no es preciso ya que muchos factores interfieren en el día como nubes muy grandes o temperaturas

cambiantes, sin embargo, se han realizado numerosos estudios para conservar un proceso de largo periodo con buenos datos.

La ecuación que representa esto es la realizada por (Collares–Pereira & Rabl, 1979), es la siguiente:

$$r_t = \frac{\pi}{24} * (a + b * \cos\omega) * \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} * \cos\omega_s} \dots\dots\dots(13)$$

Los coeficientes a y b son:

$$a = 0.409 + 0.5016 * \sin(\omega_s - 60) \dots\dots\dots(14)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 * \sin(\omega_s - 60) \dots\dots\dots (15)$$

En estas ecuaciones ω es la hora que variará al día en grados y ω_s es el ángulo del horario ocaso de ese día.

Para la radiación difusa estimada horaria se tiene la ecuación propuesta por (Liu & Jordan, 1960):

$$r_d = \frac{\pi}{24} * \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} * \cos\omega_s} \dots\dots\dots (16)$$

Finalmente, para conocer la ganancia térmica a partir de la radiación solar se tiene:

$$Q_{sol} = r_t * H \dots\dots\dots (17)$$

Estas ecuaciones previas nos servirán para poder estimar la radiación total, directa y difusa que podríamos aprovechar en el día para la alberca. Como se mencionó previamente, se puede tener una base de datos con los valores registrados de radiación total diaria e índice de claridad diario y con los ángulos y la geometría solar podemos estimar la radiación horaria en un lugar del mundo en todo el año.

A continuación se presentan imágenes de este estudio realizado para el sitio de estudio en diferentes días del año.

Selecciona fecha de estudio:

Día	21
Mes	Octubre
Año	2020

Lugar de estudio:

Ciudad	CU LUNAM
Declinación	-23.158406
Latitud	19.33011
Longitud	99.18599
Long std	90
Inclinación	0
Azimuth	0
Angulo solar	-113.5
Hora civil	05:00
TSV	4 hrs 26 min
Angulo ocaso	1.4201822
ws	81.370446
Hora ocaso	17 hrs 25 min

Parámetros

Temperatura	13.17 [°C]
Vel. Viento	1.74 [m/s]
Pres. sup	77.04 [kPa]
Humedad esp.	9.2 [g/kg]
Humedad rel.	63.84 [%]

Datos de Radiación

Insolación (H)	5.77 [kWh/m ²]
H	20.772 [MJ/m ²]
Ho	25.60139 MJ/m ²
Hd	6.40272 MJ/m ²
Hb	14.36928 MJ/m ²
Indice de claridad	0.66 [-]

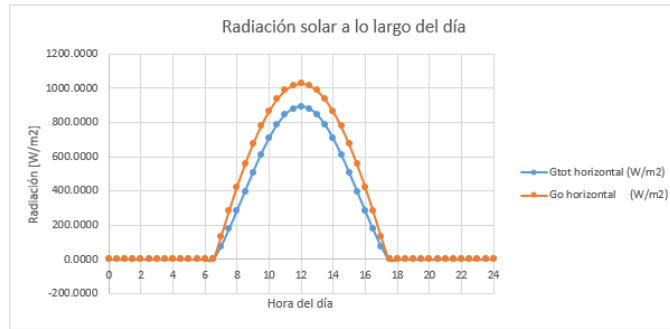


Figura 2. Parámetros y radiación solar del 21 de octubre de 2020. Programa propio.

CAPITULO III

Caso de estudio

En este capítulo se describirá nuestro caso de estudio que corresponde a la Alberca Olímpica Universitaria. El sistema de calentamiento de una alberca será descrito, así como su operación y sus componentes principales. Después de eso se hablará de la situación actual de la alberca de Ciudad Universitaria, cómo está compuesto su sistema de calentamiento, se presentará su diagrama unifilar para conocer las conexiones entre este sistema y el sistema hidráulico, y se comentarán aspectos que el personal de operación y mantenimiento de las instalaciones nos comentaron para darnos un contexto de cómo está funcionando la alberca actualmente. Finalmente conocer los consumos de energía que tiene la alberca para posteriormente analizar si se puede realizar una propuesta de ahorro de energía.

3.1. Descripción general de una alberca

Una alberca es un cuerpo de agua el cual tiene como fin que las personas puedan entrar y disfrutar de nadar ya sea de manera recreativa o competitiva. Las albercas tienen diferentes dimensiones y profundidades dependiendo de las actividades que se realizarán en ella. Pueden ser de baja profundidad (chapoteadores) o de gran profundidad (fosa de clavados), también por su longitud pueden ser clasificadas en semi olímpicas (25 metros de largo) u olímpicas (50 metros).

Las albercas para su funcionamiento y para mantener niveles adecuados tanto de temperatura como de limpieza para confort del ser humano está compuesto de varios sistemas que permiten operar de manera correcta.

Los sistemas básicos de una alberca es la red hidráulica la cual está compuesta por una línea de tubería de succión y de descarga la cual va a mantener en movimiento constante el agua lo que permite que el agua no se estanque y además llevarla a los demás sistemas de la alberca para su acondicionamiento. Otro sistema es el de cloración, niveles de pH y de filtrado para mantener el agua con niveles químicos adecuados para la salud de los usuarios. El sistema de calentamiento del agua también es importante debido a que mantiene el nivel de temperatura del agua adecuado para realizar las actividades acuáticas, este último sistema puede estar compuesto por diferentes equipos como calderas, calentadores solares, bombas de calor, etc., lo cual es un punto muy relevante para el estudio de las albercas ya que

el mayor consumo energético de una alberca se va en cómo está configurado el sistema de calentamiento de agua y qué medidas de ahorro se tienen para disminuirlo.

3.2. Situación actual de la alberca de CU

La alberca de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) abrió sus puertas el 10 de marzo de 1954, su capacidad volumétrica es de aproximadamente 6 millones de litros de agua. Esta alberca es la única en el mundo con tres canchas consecutivas y un chapoteadero, además que tiene la forma de la República Mexicana o viéndola desde otro ángulo, parece un microscopio (Gaceta UNAM 2019).

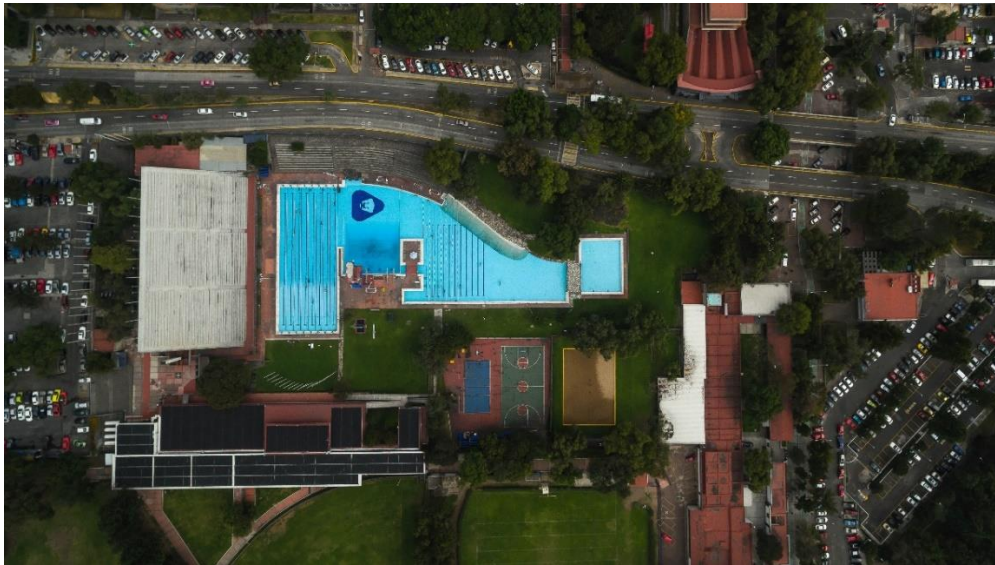


Figura 3. Foto panorámica de las instalaciones de la AOU.

Sistema de calentamiento

Cuando la alberca fue construida, es decir, hace 67 años fue concebida con un sistema de calentamiento a partir de dos calderas y combustible gas lp almacenado en 3 tanques para suministrarse a toda la alberca y mantener la temperatura del agua agradable para los usuarios. En esos momentos las fuentes de energías renovables no tenían un impacto grande como para considerarse en los diseños originales. Sin embargo, a lo largo del tiempo, la alberca ha recibido mantenimientos y actualizaciones al sistema de calentamiento. Al principio solo se cambiaron las calderas por unas de menor capacidad (100 HP), sin embargo, con una mayor capacidad de calentamiento.



Figura 4. Foto de las dos calderas instaladas en el cuarto de máquinas.

Posteriormente, se agregaron otros dos sistemas de calentamiento con la finalidad de disminuir el consumo de combustible de las calderas y también mitigar un poco las emisiones de gases contaminantes al medio ambiente. Estos sistemas son las bombas de calor, 10 unidades de 5 HP que se encuentran en la parte posterior de las gradas, las cuales fueron donadas por la Comisión Nacional del Deporte (CONADE) y tienen poco tiempo de haber entrado en operación ya que se tuvieron que realizar ajustes tanto al sistema de tuberías como a la subestación eléctrica para poder arrancarlas, sin embargo, ha sido un gran desafío que operen debido a algunos problemas que se han encontrado y que se explicaran más adelante.



Figura 5. Foto de las bombas de calor que se encuentran a un costado de la AOU.

El otro sistema que se integró a las bombas de calor y las calderas son los calentadores solares, este es un proyecto del Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM el cual ellos después de hacer un estudio determinaron colocar 1000 calentadores solares en los edificios que integran el recinto de la Alberca Olímpica Universitaria (AOU) así como el techo de las oficinas de futbol americano, sin embargo, aún no se ha terminado de instalar el 100% de los equipos, hasta el momento se han instalado 482 módulos. De igual manera que las bombas de calor, los calentadores solares no han podido operar de la mejor manera e inclusive ahora que se realizó un recorrido por las instalaciones y se hizo el levantamiento de los sistemas y equipos instalados se pudo observar que varios de estos ya no están operando por falta de mantenimiento y/o rupturas en tuberías y válvulas.



Figura 6. Foto de la alberca y los calentadores solares sobre el techo de los edificios de la AOU.

Finalmente, el sistema de calentamiento de agua de la alberca de consistir solamente de las calderas, termino siendo un sistema hibrido el cual está conformado además de las calderas por las bombas de calor y los calentadores solares, no obstante, a pesar de que la alberca cuenta con estos tres sistemas de respaldo para calentar el agua, al no haberse diseñado inicialmente para que operara de esta manera se ha tenido que realizar numerosos estudios para poder reconfigurar el actual sistema y que opere de manera adecuada y eficaz.

Lamentablemente en pláticas con personal a cargo de la operación y mantenimiento de las instalaciones de la alberca comentan que esto en la práctica ha sido un verdadero reto y que no se ha podido trabajar de manera eficiente con los tres sistemas simultáneamente y esto ocurre por varias situaciones.

Para comprender mejor el funcionamiento de cada sistema y como están acoplados e interconectados se realizó un levantamiento de los equipos y la red de tuberías para realizar un diagrama unifilar de la instalación. A continuación, se presenta el diagrama unifilar realizado a partir de los datos obtenidos en la visita a la alberca.

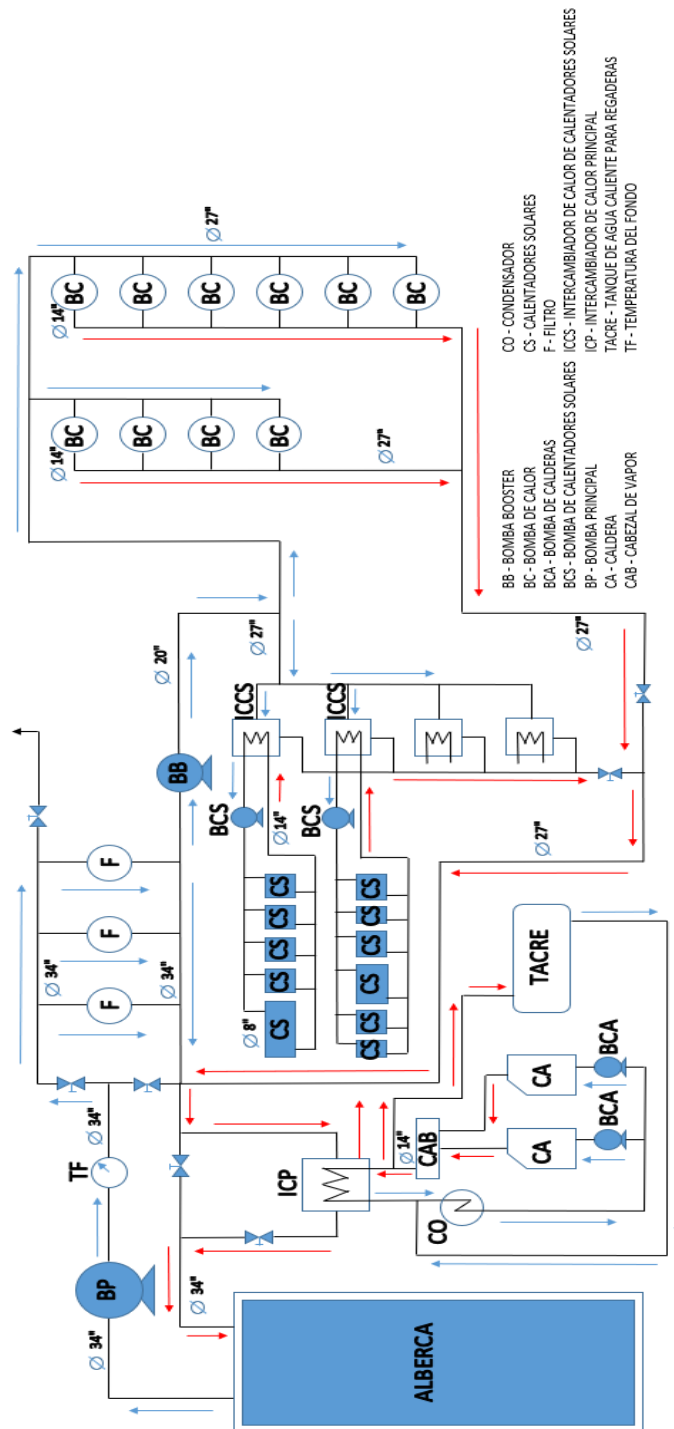


Figura 7. Diagrama unifilar de los sistemas de la AOU.

La alberca tiene dos líneas de tuberías, una es la succión que se encarga de llevar el agua de la alberca al sistema de calentamiento y acondicionamiento y la otra línea es la de descarga que lleva el agua de regreso a la alberca una vez que se calentó y acondiciono. Tenemos también por otro lado una línea de agua de repuesto ya que durante todo el trayecto y debido a las pérdidas de calor que se tienen a lo largo del día el nivel del agua disminuye y se debe reponer esa agua para mantenerla en el mismo nivel.

La succión se encuentra al fondo de la alberca con tomas en toda la periferia, una vez que el agua deja la alberca pasa por la bomba principal y se mide su temperatura para tener una referencia de a que temperatura se encuentra el agua, posterior a eso pasa por los tanques de filtrado y cloración para mantener en valores indicados para las albercas y los usuarios la composición química del agua. Después de eso, una parte del total de agua se va a los sistemas de bombas de calor y calentadores solares (no se tiene un medidor de caudal para determinar la cantidad) mientras que la mayor parte va hacia el intercambiador de calor.

En la separación del agua terminando los filtros el agua que va hacia los sistemas renovables se vuelve a dividir enviando una parte del agua a los calentadores solares en donde esta agua se calienta a través de intercambiadores de calor (actualmente están operando dos ya que aún no se encuentra la cantidad total de calentadores solares instalados), es decir, el agua que circula en los calentadores solares es independiente al agua que proviene de la alberca. Del lado de las bombas de calor el agua pasa a través de cada una de ellas y finalmente se vuelven a unir después de haber pasado por ambos sistemas y llega de nuevo a juntarse con el agua de la alberca que no se utilizó para estos sistemas y unir todo el caudal de la alberca hacia el intercambiador de calor principal.

Finalmente, del otro lado del intercambiador de calor se encuentra el vapor de agua proveniente de las dos calderas, las cuales son la principal fuente de calor que recibe el agua de la alberca, en donde en su etapa final esta obtiene el calor requerido para mantener la temperatura del agua deseada.

Como se puede observar el sistema estaba considerado solo con las calderas, sin embargo, con el apoyo de instituciones como la CONADE y el IER UNAM se logró integrar las bombas de calor y los calentadores solares para calentar el agua de la alberca, pero ha sido un gran reto lograr que los tres sistemas operen simultáneamente y esto debido a que no fueron concebidos los diseños al mismo tiempo, es muy importante no solo hacer un análisis de los requerimientos energéticos de cada sistema, sino que también se debe tomar en cuenta las líneas de tubería para mantener los caudales y las presiones adecuadas para poder operar correctamente, además, tener en cuenta que las bombas de calor y los calentadores solares dependen de las condiciones ambientales por lo que su aportación es valiosa pero intermitente por lo que podrán operar en su mayor capacidad solo en ciertos periodos de tiempo lo que ayuda a disminuir el tiempo de operación de las

calderas y por consecuencia disminuir el consumo de combustible permitiendo ahorrar una buena cantidad de combustible y dinero, bajando los niveles de contaminación, sin embargo, no podemos prescindir de las calderas ya que al tener un volumen grande de agua y al encontrarnos en un lugar con muchos días nublados no lograremos mantener la temperatura del agua de la alberca siempre como queremos.

3.3. Consumos de energía de la alberca

Cuando se realizó la visita a las instalaciones de la alberca, se solicitó también los registros del consumo de energía, en este caso, el consumo de gas LP que se tenía en un año para conocer cuánto combustible se ocupa para administrar a las calderas y estas a su vez calentar el agua, sin embargo, esa información quedo pendiente de enviar además de que tanto el año 2020 como 2021 el consumo que se tuvo no fue similar a previos años debido a la pandemia por lo que datos anteriores podrían mostrar de manera más realista el panorama anual, por lo que se compartieron datos de consumo de combustible de todo el año 2016, mismos que presento a continuación:

Tabla 5. Consumos mensuales de combustible en el 2016.

2016		
Mes	Litros	Monto
enero	87,020.00	\$ 648,299.00
febrero	66,074.00	\$ 492,251.30
marzo	24,291.00	\$ 180,767.90
abril	50,357.00	\$ 375,159.65
mayo	48,070.00	\$ 358,121.50
junio	37,195.00	\$ 277,102.25
julio	35,085.00	\$ 261,383.60
agosto	50,350.00	\$ 358,991.50
septiembre	33,154.00	\$ 148,584.60
octubre	35,953.00	\$ 239,446.98
noviembre	57,900.00	\$ 385,614.00
Total	525,449.00	\$ 3,725,722.28

En esta tabla podemos ver los consumos de gas LP que se hicieron mensualmente y el total del año 2016. Como podemos observar, en noviembre, enero y febrero se tiene el mayor consumo de combustible debido a la baja temperatura ambiente y que esta impacta a la temperatura del agua de la alberca disminuyéndola lo que provoca que se deban ocupar las calderas por mayor tiempo y eso genera que se consuma más combustible. En diciembre no hubo compra de combustible ya que la mayor parte del mes las instalaciones se mantienen cerradas.

CAPITULO IV

Modelado termodinámico de la alberca

En este capítulo nos adentraremos a la parte energética de la alberca, se presenta un diagrama esquemático donde se pueden observar nuestro volumen de control y todas las interacciones que hay con el medio ambiente. A partir de eso se explica brevemente los balances de masa y energía en volúmenes de control en estado transitorio. Posteriormente, se presenta el balance de materia y energía de nuestro caso de estudio donde se señalan todos los elementos que se encuentran dentro del sistema.

4.1. Descripción de la alberca

Para comprender mejor los requerimientos térmicos que existen en una alberca se presenta un diagrama esquemático del fenómeno donde tenemos nuestro volumen de control que es la Alberca Olímpica Universitaria y sus interacciones con los alrededores las cuales pueden entrar o salir de nuestro sistema. A continuación, el diagrama esquemático:

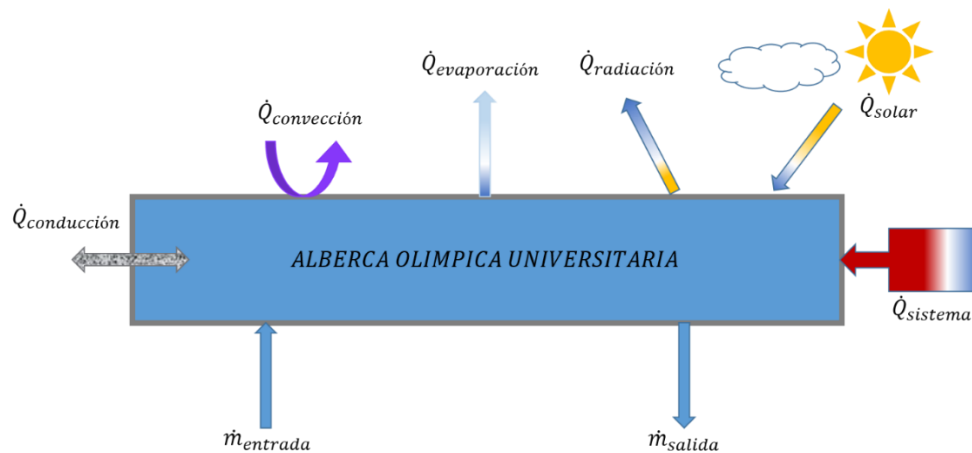


Figura 8. Diagrama esquemático del fenómeno. Elaboración propia.

Donde podemos observar los diferentes mecanismos de transferencia de calor y cómo interactúan con nuestro volumen de control. Por un lado, vemos como entran el agua de repuesto, el agua ya una vez que pasa por el sistema de calentamiento y el calentamiento de la superficie del agua debido a la radiación solar. Por otro lado, como salidas tenemos el agua que se pierde debido a la evaporación o por los mismos nadadores que al nadar sale de la alberca, las pérdidas de calor por conducción, por convección, por evaporación y por radiación.

Es importante hacer este análisis de la alberca como un volumen de control ya que como podemos apreciar hay muchos factores que afectan directamente la temperatura del agua y al poder estudiar cada una y cómo influye en el sistema global nos da la pauta para poder tomar decisiones y reducir las pérdidas de calor, así como conocer cuánta energía en forma de calor debemos suministrar nosotros en cada periodo de tiempo para optimizar la operación y no quedar cortos o muy sobrados.

Como se mencionó anteriormente, muchos autores han realizado estudios para calcular las pérdidas de calor que hay en las albercas a diferentes condiciones climatológicas, desde climas extremos hasta albercas techadas o a la intemperie, esto con la finalidad de mantener la temperatura deseada en todo momento que esté operando la alberca. Sin embargo, se han percatado que las condiciones ambientales que son parte fundamental varían con respecto al tiempo y que realizar el análisis del fenómeno de manera transitoria, es decir, tomando en cuenta en todo momento esa variación con respecto al tiempo lo hace muy complicado ya que muchos parámetros están involucrados en el proceso. Por tal motivo, es importante realizar este análisis ya que los cambios en las variables climatológicas varían considerablemente en periodos largos de tiempo. Por ejemplo, en las madrugadas como en el mediodía y al anochecer, estos cambios se incrementan si no se coloca una malla térmica sobre la superficie de la alberca para conservar la temperatura el mayor tiempo posible y es algo que sucede en la AOU. Por consiguiente, aunque la alberca no se encuentre en uso por las noches y madrugadas si es importante tomar en cuenta estos periodos ya que afectan directamente la temperatura a la que se encontrará el agua cuando se inicie operación.

Un análisis de manera transitoria es una labor compleja debido a la particularidad del fenómeno y todas las pérdidas de calor involucradas. Por ello, la revisión de las variaciones de los parámetros en cada momento para encontrar cuando se presentan cambios considerables y separar el tiempo por bloques. De esta manera logramos ajustar mejor el comportamiento del fenómeno más que considerar todo como un promedio o de manera estacionaria (que no varía con respecto al tiempo). Es así como el presente trabajo propone una metodología semi-transitoria del análisis del sistema de calentamiento de agua a partir del balance energético en la alberca.

4.2 Balance de materia y energía transitorio

El balance energético en un volumen de control requiere tomar en cuenta la energía transportada hacia o desde el volumen de control mediante la masa transferida a través de la superficie de control. Es decir, se debe verificar condiciones de equilibrio en cualquier frontera abierta y esto no impide que las propiedades varíen con el tiempo, como lo hacen algunos procesos no estacionarios, como es el caso de nuestra alberca.

- Balance de masa para un volumen de control

En ausencia de reacciones nucleares como es nuestro caso, la masa es conservativa y en un volumen de control el balance de masa se puede interpretar como:

(Variación de la masa con respecto al tiempo dentro de un volumen de control en el instante t)
= *(masa de entrada al volumen de control por unidad de tiempo en el instante t)*
– *(masa de salida al volumen de control por unidad de tiempo en el instante t)*

En forma de ecuación el enunciado anterior sería:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_{ent} \dot{m}_{ent} - \sum_{sal} \dot{m}_{sal} \dots\dots\dots (18)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico y representa la rapidez a la que la masa atraviesa la frontera.

- Balance de energía para un volumen de control

Para expresar la ecuación de balance de energía en un volumen de control como mencionamos previamente podemos definir la energía en el volumen de control como:

(*variación de energía con respecto al tiempo en el volumen de control*)
 = (*flujo neto de energía que atraviesa la frontera en forma de calor y trabajo*)
 + (*flujo total de energía que entra con la masa del volumen de control*)
 – (*flujo total de energía que sale con la masa del volumen de control*)

Esto expresado mediante una ecuación sería:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{ent} \dot{m} e_{ent} - \sum_{sal} \dot{m} e_{sal} \dots\dots\dots (19)$$

Donde e es la suma de la energía interna, cinética y potencial, donde en la mayoría de los casos la energía cinética y potencial se pueden despreciar debido a que son muy pequeñas con relación a la energía interna.

El fluido que entra o sale de un volumen de control posee una forma adicional de energía, la energía de flujo Pv , entonces, la energía total de un fluido en movimiento por unidad de masa sería:

$$Pv + e = Pv + (u + ec + ep) \dots\dots\dots (20)$$

Pero tenemos que:

$$h = u + Pv \dots\dots\dots (21)$$

Por lo que la ecuación de la energía la podemos reescribir como:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{ent} \dot{m} h_{ent} - \sum_{sal} \dot{m} h_{sal} \dots\dots\dots (22)$$

En el caso de la alberca tenemos que las propiedades en las fronteras del volumen de control varían con respecto al tiempo por lo que es un proceso no estacionario, de tal forma que la ecuación de la energía varía ligeramente.

En el análisis de volumen de control transitorio se suele utilizar dos hipótesis para establecer los modelos de las situaciones reales, estos son la de estado uniforme y flujo uniforme y se definen de la siguiente manera:

1. *Hipótesis de estado uniforme*: menciona que todas las propiedades intensivas dentro del volumen de control sean uniformes en cualquier instante. No obstante, el estado del volumen de control puede variar con el tiempo.
2. *Hipótesis del flujo uniforme*: en una entrada o salida exige que el estado de la masa que está atravesando la frontera sea invariable con el tiempo. Sin embargo, el flujo másico puede variar con el tiempo.

En la alberca existen ligeras variaciones en las propiedades intensivas como la temperatura y la presión, sin embargo, estas variaciones son ligeras, en el caso de la masa que atraviesa la frontera no cambia de estado por lo que si puede aplicar la hipótesis de flujo uniforme.

Cuando el estado del volumen de control es uniforme, el primer miembro de la ecuación de la energía puede reescribirse como:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \frac{d}{dt}(m_{vc}u) = m_{vc} \frac{du}{dt} + u \frac{dm_{vc}}{dt} \dots\dots\dots (23)$$

Lo que finalmente tenemos como la ecuación de energía para procesos no estacionarios:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \frac{d(mu)}{dt} + \sum_{sal} \dot{m} h_{sal} - \sum_{ent} \dot{m} h_{ent} \dots\dots\dots (24)$$

4.2.1 Balance de energía para la alberca

En el balance de energía consideramos dentro de la ecuación todos los términos que están involucrados en el volumen de control. Del lado izquierdo de la igualdad tenemos como una ganancia de energía el sol y las demás son pérdidas de calor. Del lado derecho de la igualdad tenemos la variación de la entalpía en donde primero tenemos la derivada de la masa y energía interna con respecto al tiempo, después la masa de salida multiplicada por su entalpía, la masa que se está evaporando por su entalpía de evaporación y finalmente la masa que entra por su entalpía. Esto se puede observar en la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{nad} = \frac{d(mu)}{dt} + \dot{m}_s h_s + \dot{m}_{evap} h_g - \dot{m}_e h_e \quad (25)$$

4.3 Pérdidas y ganancias de energía

Al desarrollar la ecuación anterior tenemos del lado izquierdo la masa por la derivada de la energía interna con respecto al tiempo y la energía interna por la derivada de la masa con respecto al tiempo. Del otro lado de la igualdad tenemos las pérdidas y ganancias de energía.

Por un lado, la ganancia térmica debido a la radiación solar la cual sobretodo en el momento del día en el que haya mayor radiación, los rayos del sol calentarán el agua de la alberca. Este efecto es mayor en épocas de primavera y verano en donde la radiación es mucho mayor y duradera.

En la parte de las pérdidas de calor se tienen muchos efectos que van a disminuir la temperatura del agua de la alberca y los cuales debemos de identificar y calcular para saber cuál de ellos será el más significativo y tratar de reducir lo más posible para ahorrar energía.

Dentro de las pérdidas tenemos la conducción, la convección, la radiación, la evaporación y las pérdidas de calor por los nadadores ya que al nadar provocan oleaje y también salpican agua fuera de la alberca lo que propicia una mayor pérdida de calor por evaporación, también hay que tomar en cuenta que la temperatura corporal es mayor que la que se encuentra en la alberca por lo que ahí tenemos también un intercambio de calor. Sin embargo, el cuerpo humano no va a disminuir su temperatura por debajo de sus límites a menos que si haya una diferencia de temperatura muy grande. Es por ello que solo consideraremos el aumento de la evaporación del agua debido a que se incrementa el movimiento del agua en la alberca.

A continuación, se presenta la ecuación más desarrollada y con los términos acomodados de cada lado de la igualdad:

$$m \frac{du}{dt} + u \frac{dm}{dt} = \dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{nad} + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s - \dot{m}_{evap} h_g \quad (26)$$

Desarrollando los términos y sustituyendo las \dot{Q} de ganancia y pérdidas por las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (16), tenemos:

$$m \frac{du}{dt} + u \frac{dm}{dt} = r_t * H(t) - kA \frac{dT}{dx} - h(T_{sup} - T_{\infty}) - (0.280 + 0.784V) \left[\frac{(P_{sup} - \phi P_{\infty})^{0.695}}{h_{fg}} \right] A_{sup} h_{fg} - \epsilon \sigma T_{sup}^4 - \dot{Q}_{nad} + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s - \dot{m}_{evap} h_g \dots (27)$$

4.4. Balance final

Como se vio previamente, la ecuación tiene muchos términos que son importantes analizar con la finalidad de facilitar el estudio. Además, de ejemplificar con un esquema del volumen de control, hay varios términos de la ecuación que se pueden eliminar tomando las siguientes consideraciones:

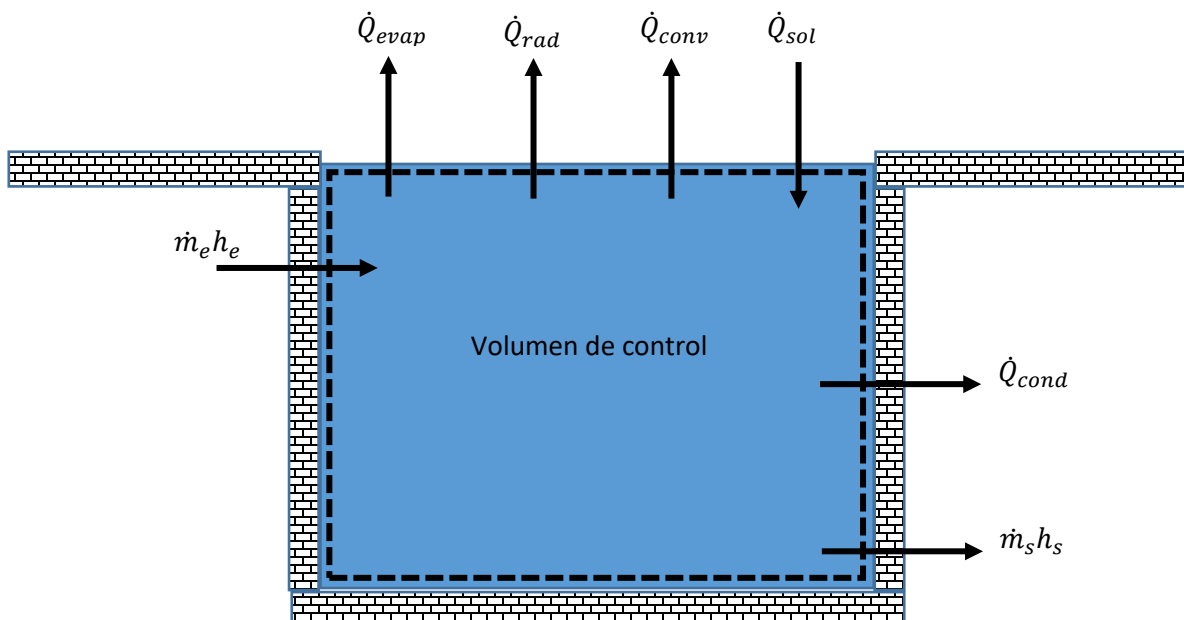


Figura 91. Volumen de control del caso de estudio. Elaboración propia.

En un sistema controlado si el nivel de agua de la alberca se mantiene constante, es decir, que no varíe considerablemente en el tiempo, la derivada de la masa con respecto al tiempo se desprecia de la ecuación ya que la masa no estaría cambiando con el tiempo al tener bajo control el nivel del agua.

Otro término que se puede despreciar de la ecuación es la masa evaporada por su entalpía de evaporación debido a que esta ya se está considerando dentro de las pérdidas por evaporación ya que se considera una tasa de evaporación y esa masa que se está perdiendo por la evaporación ya se encuentra ahí.

Finalmente, las pérdidas de calor por nadadores se eliminarán de la ecuación y se integrará a las pérdidas de calor por evaporación tomando en cuenta el factor desarrollado por (Shah, 2018) el cuál es el siguiente:

$$E_{oc} = E * 1.9 - 21(\rho_r - \rho_w) + 5.3N^* \dots\dots\dots (28)$$

Donde E_{oc} es la tasa de evaporación en albercas ocupadas, E la tasa de evaporación en albercas sin nadadores, $(\rho_r - \rho_w)$ la diferencia de densidad del aire tanto a la temperatura del ambiente como a la temperatura del agua y N^* es el número de nadadores por metro cuadrado de la superficie de la alberca.

De tal manera que el balance quedaría:

$$\rho Vol \frac{CdT}{dt} = r_t * H(t) - kA \frac{dT}{dx} - h(T_{sup} - T_{\infty}) - \left\{ (0.280 + 0.784V) \left[\frac{(P_{sup} - \phi P_{\infty})^{0.695}}{h_{fg}} \right] A_{sup} h_{fg} * 1.9 - 21(\rho_{\infty} - \rho_{sup}) + 5.3N^* \right\} - \epsilon \sigma T_{sup}^4 + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s \dots\dots\dots (29)$$

Finalmente, para mantener la nomenclatura igual, además de que en un volumen de control se considera que los efectos en la superficie se mantienen uniformes podemos decir que T_s que es la temperatura del agua en su superficie es igual a T la cual es la temperatura del agua.

También en las pérdidas de calor por radiación, la temperatura que se evalúa es la del medio ambiente por lo que T_s en realidad sería T_{∞} .

En cuanto a las pérdidas por conducción muchos autores como (Buonomano et.al., 2015), (Dorantes et.al., 2014), (Jordaan & Narayanan, 2019), (Kaci et.al., 2017), (Lugo et.al., 2019), (Mancic et.al., 2014) y (Ruiz & Martínez, 2010) consideran que se pueden despreciar al ser muy pequeñas comparadas a las demás pérdidas, sin embargo, (Bernhard et.al., 2019) a partir del trabajo de (Woolley et.al., 2011) considera que las pérdidas de calor por conducción pueden llegar a ser máximo de 1% del total de todas las pérdidas.

Por lo que el balance final quedaría de la siguiente manera:

$$\rho Vol \frac{CdT}{dt} = r_t * H(t) - 1.01 * \left\{ -[3.1 + (4.1 * V)] * (T - T_{\infty}) - \left\{ (0.280 + 0.784V) \left[\frac{(P - \phi P_{\infty})^{0.695}}{h_{fg}} \right] A_{sup} h_{fg} * 1.9 - 21(\rho_{\infty} - \rho) + 5.3N^* \right\} - \epsilon \sigma T_{\infty}^4 \right\} + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s \dots\dots\dots (30)$$

CAPITULO V

Metodología para el acoplamiento de términos estacionarios en el balance transitorio

En este capítulo se abordará la metodología para poder acoplar los términos estacionarios al balance para poder hacer el análisis transitorio. Para ello se tomarán en cuenta las condiciones climatológicas y cómo podemos modelar su comportamiento para aproximar los valores mediante una función matemática. La parte más importante de este capítulo es mostrar el modelo ya acoplado para que en futuros trabajos se pueda resolver y generar cálculos para poder comparar los resultados con los trabajos publicados por otros autores que consideran el fenómeno como estacionario.

5.1. Condiciones meteorológicas

El sitio de estudio se encuentra dentro de las instalaciones de Ciudad Universitaria de la UNAM la cual cuenta con su propia estación meteorológica en el Centro de Ciencias de la Atmosfera, además de la cercanía que tiene la estación con la alberca, la UNAM es una institución confiable que cuida mucho sus procesos de medición por lo que podemos confiar en los datos registrados y publicados en su página de internet la cual es de acceso libre.

En nuestro estudio tomamos los datos registrados en el año de 2019 desde enero hasta diciembre debido a que por pandemia las instalaciones estuvieron cerradas y luego con acceso controlado lo que impidió reportar los datos medidos, sin embargo, cabe aclarar que la estación siguió registrando y guardando los valores, pero este retraso de labores generó de igual manera el retraso en la publicación de todos los valores que se requirieron para el estudio.

Los datos climatológicos necesarios son la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa del aire, estos son de la zona de CU y como se mencionó anteriormente se analizaron los 365 días del 2019 tomando de la población de mi análisis 5 días distribuidos a lo largo del año para representar las variaciones de estos parámetros a lo largo del día y evitar tomar los valores como una constante.

Los días de muestra son:

Tabla 6. Días de muestra para los parámetros meteorológicos.

31 de enero	21 de marzo
21 de junio	21 de septiembre
21 de diciembre	

5.1.1. Temperatura del aire

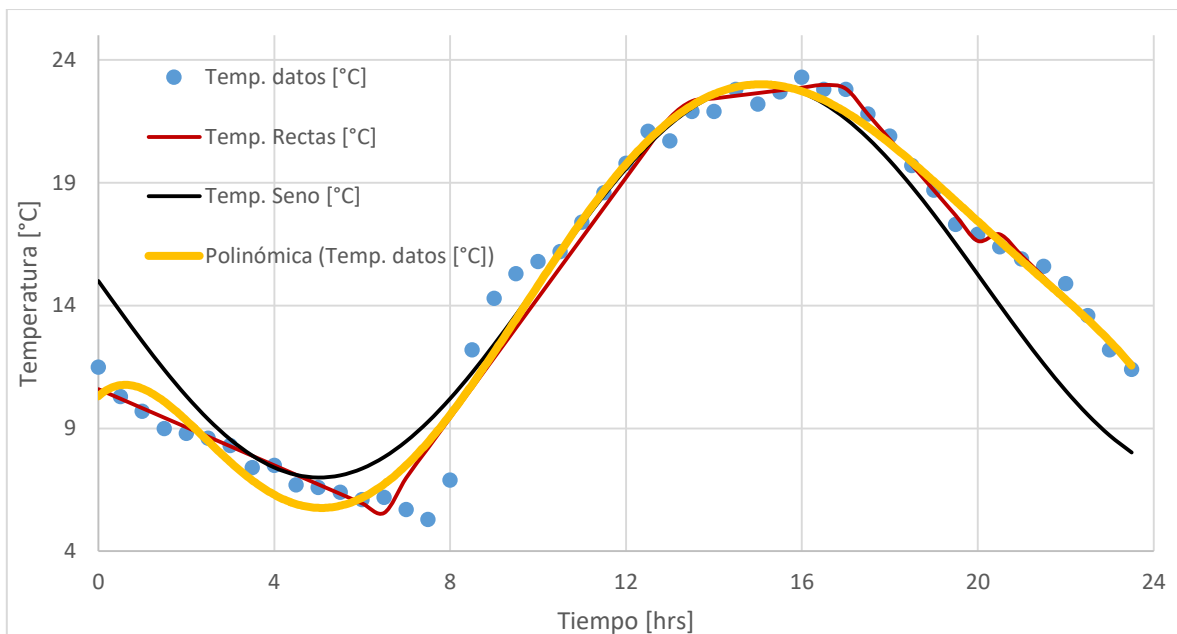


Figura 10. Temperatura del aire el 31 de enero de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $T_{\infty} = -0.00001t^6 + 0.0009t^5 - 0.0261t^4 + 0.3359t^3 - 1.6402t^2 + 1.6415t + 10.308$ (31)

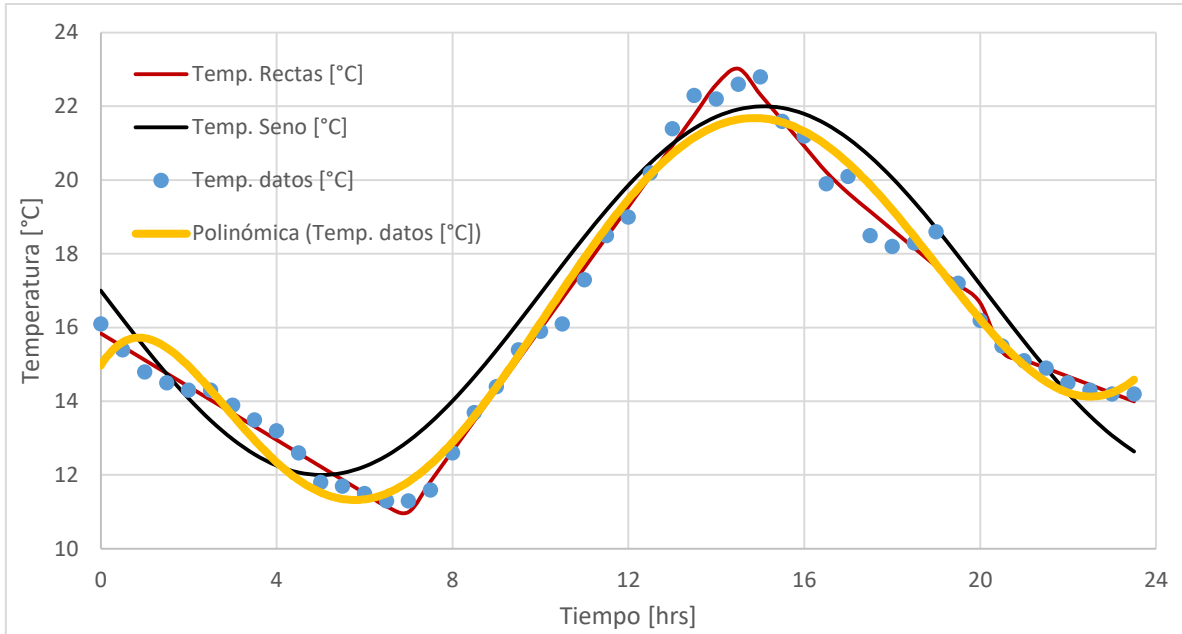


Figura 11. Temperatura del aire el 21 de marzo de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $T_{\infty} = -0.000006t^6 + 0.0005t^5 - 0.0176t^4 + 0.2485t^3 - 1.382t^2 + 1.8907t + 14.972$ (32)

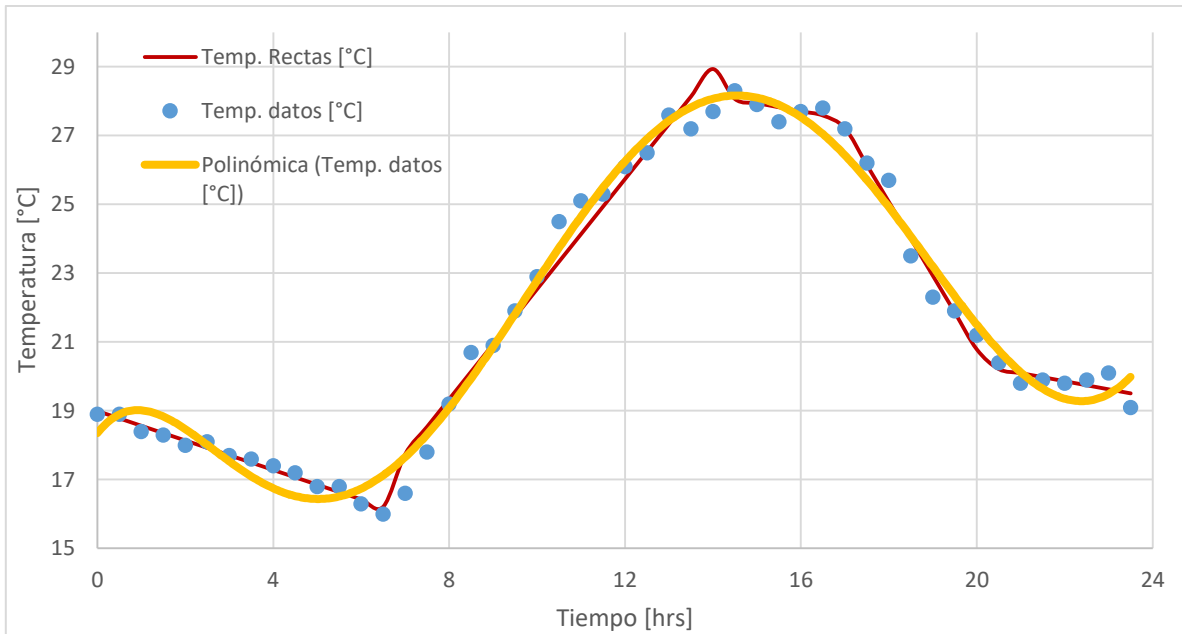


Figura 12. Temperatura del aire el 21 de junio de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $T_{\infty} = -0.000005t^6 + 0.0005t^5 - 0.0161t^4 + 0.2217t^3 - 1.1653t^2 + 1.6245t + 18.347$ (33)

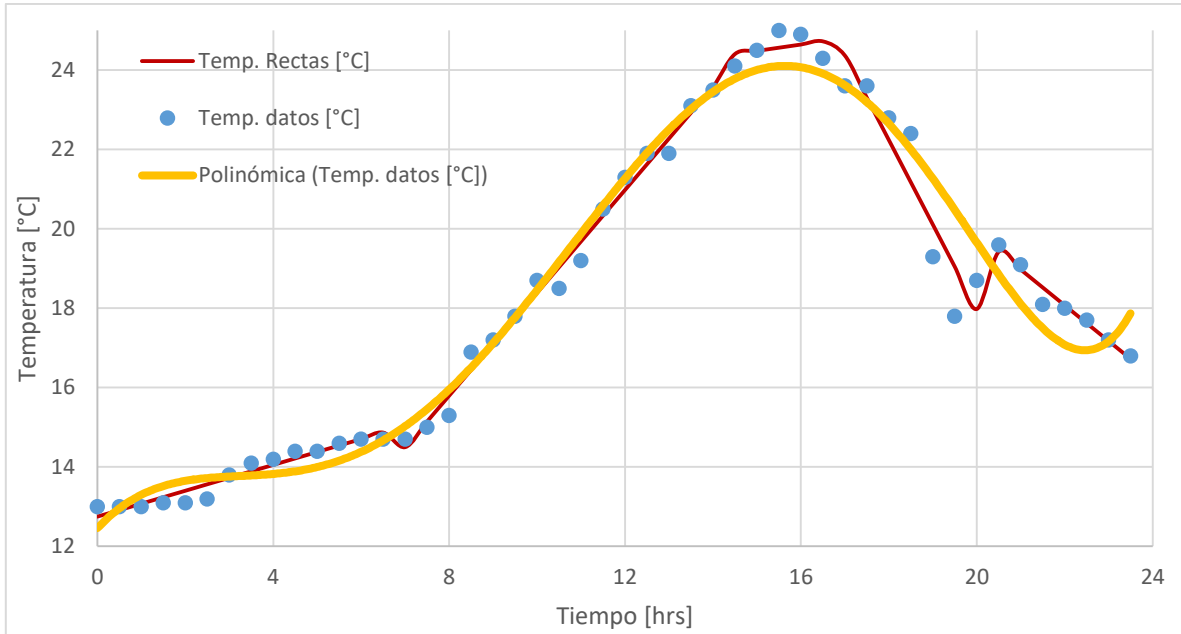


Figura 13. Temperatura del aire el 21 de septiembre de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $T_{\infty} = 0.000002t^6 - 0.00004t^5 - 0.0017t^4 + 0.0522t^3 - 0.3893t^2 + 1.1803t + 12.457$ (34)

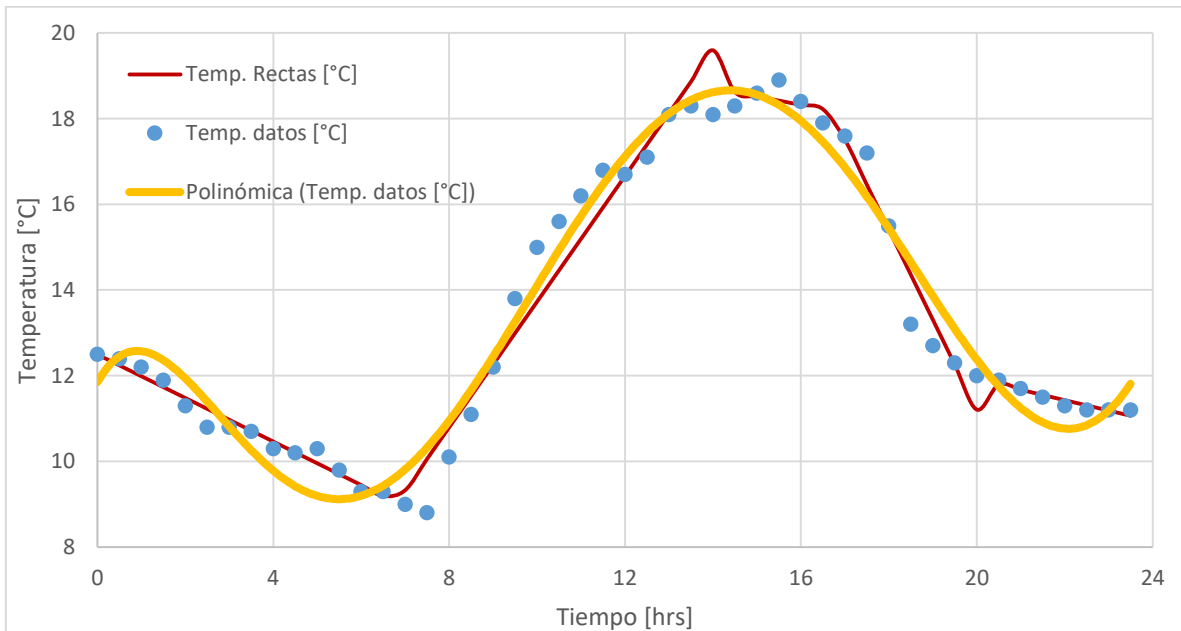


Figura 14. Temperatura del aire el 21 de diciembre de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $T_{\infty} = -0.000006t^6 + 0.0005t^5 - 0.0169t^4 + 0.2337t^3 - 1.269t^2 + 1.7725t + 11.85$ (35)

Como podemos observar a partir de las gráficas, la forma polinómica se aproxima mejor a los datos obtenidos por la estación meteorológica, por lo que fue seleccionada para modelar el comportamiento de la temperatura del aire en la ecuación de la energía de la alberca. La ecuación polinómica es de grado 6 por lo que su estructura es de la siguiente manera:

$$T_{\infty} = -at^6 + bt^5 - dt^4 + et^3 - ft^2 + gt + j \dots \dots \dots (36)$$

Donde los coeficientes a, b, d, e, f, g y j van a variar dependiendo del día en el que se realice el estudio y t es el tiempo en el que se quiere conocer la temperatura del aire en el día tomando en cuenta que los minutos se deben dar en valor numérico, es decir, la media hora sería 0.5. Los valores van de 0 a 23.9 ya que 24 se consideraría como el valor 0 del siguiente día.

A continuación, se presenta en una gráfica 4 días distintos del año con sus datos meteorológicos y su aproximación polinómica.

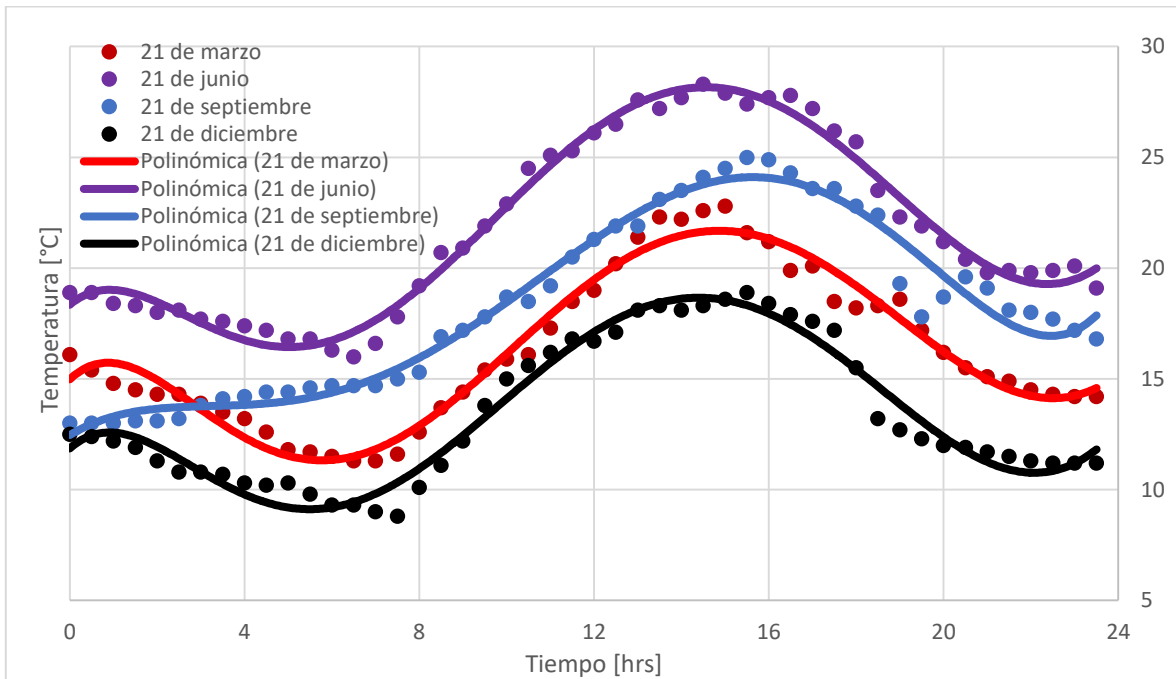


Figura 15. Temperatura del aire en distinto días de 2019 en CU.

5.1.2. Velocidad del aire

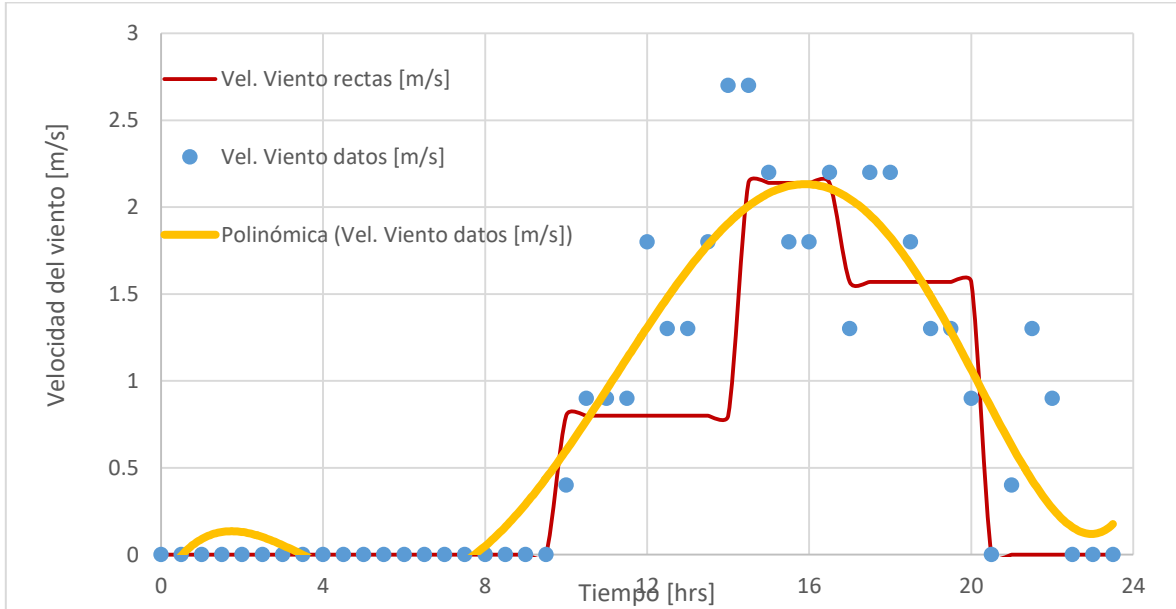


Figura 2. Velocidad del viento el 31 de enero de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $V = 0.0000002t^6 + 0.000009t^5 - 0.0011t^4 + 0.0235t^3 - 0.1737t^2 + 0.4134t - 0.1724$ (37)

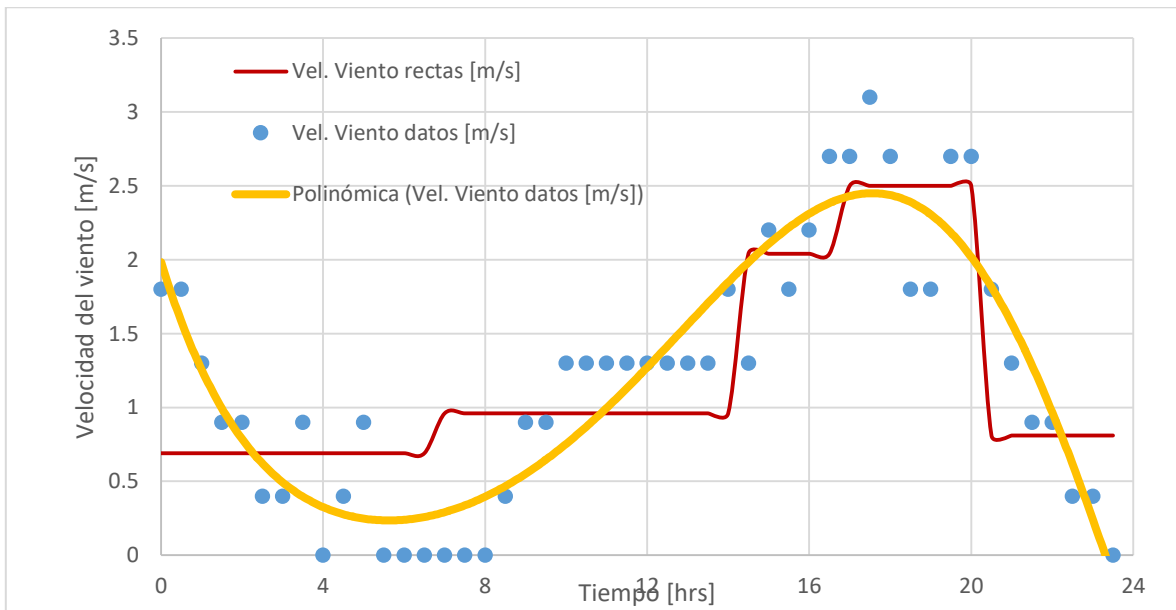


Figura 17. Velocidad del viento el 21 de marzo de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $V = 0.000009t^6 - 0.00006t^5 + 0.0016t^4 - 0.023512t^3 + 0.1816t^2 - 0.889t + 1.9835$ (38)

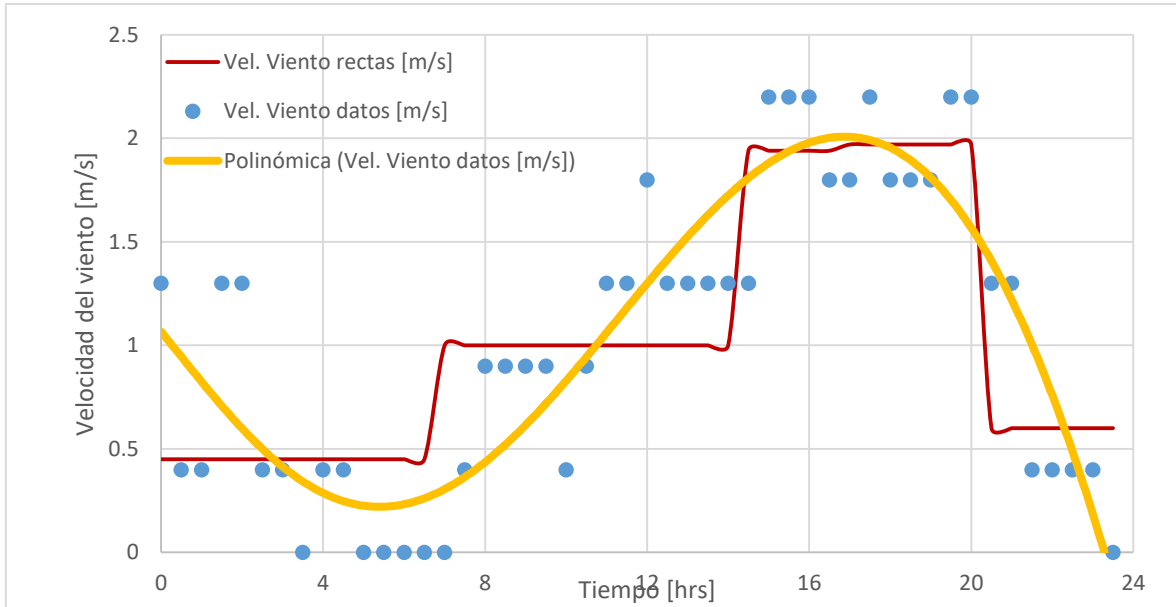


Figura 18. Velocidad del viento el 21 de junio de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $V = -0.0000001t^6 + 0.00001t^5 - 0.0005t^4 + 0.0068t^3 - 0.0094t^2 - 0.2384t + 1.0657$ (39)

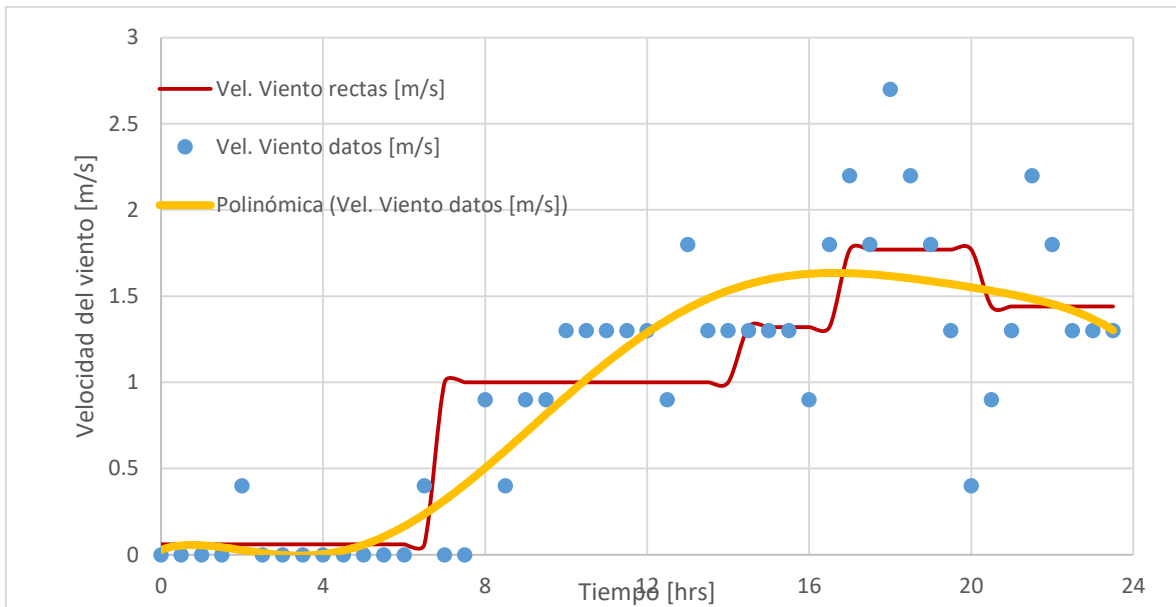


Figura 19. Velocidad del viento el 21 de septiembre de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $V = -0.000006t^6 + 0.00005t^5 - 0.0013t^4 + 0.0159t^3 - 0.0661t^2 + 0.0771t + 0.029$ (40)

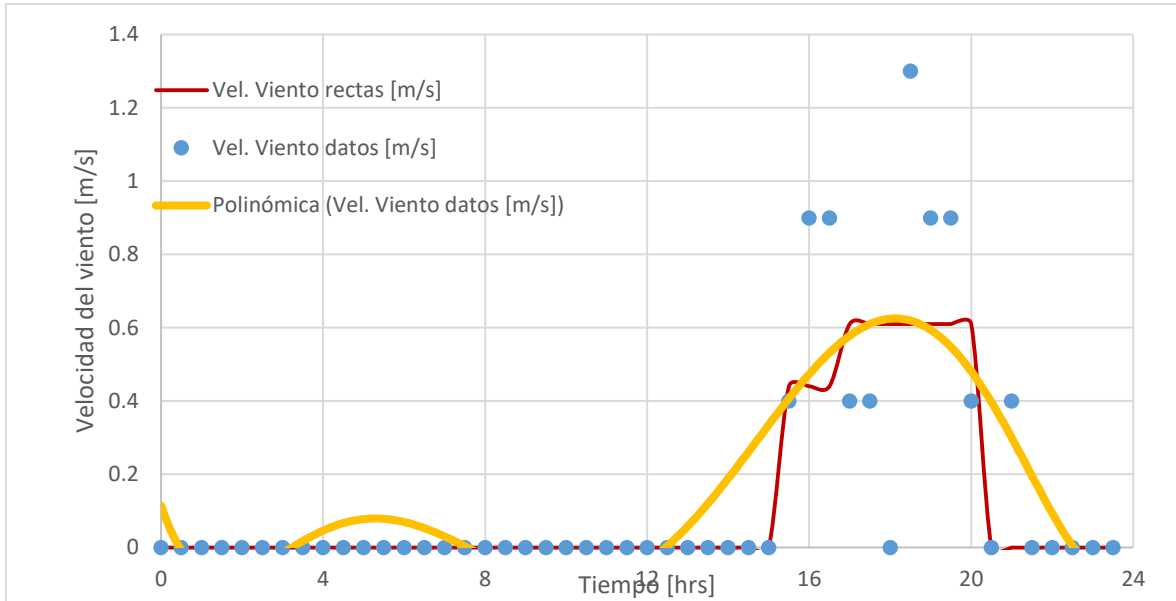


Figura 20. Velocidad del viento el 21 de diciembre de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $V = 0.000002t^6 - 0.0001t^5 + 0.0027t^4 - 0.0318t^3 + 0.1652t^2 - 0.3178t + 0.1141$ (41)

Como podemos observar a partir de las gráficas, la forma polinómica se aproxima mejor a los datos obtenidos por la estación meteorológica, aunque con la velocidad del viento las variaciones si son más atípicas, sin embargo, es la que se utilizó para modelar el comportamiento de la velocidad del viento en la ecuación de la energía de la alberca. La ecuación polinómica es de grado 6 por lo que su estructura es de la siguiente manera:

$$V = kt^6 + lt^5 - mt^4 + nt^3 - \tilde{n}t^2 + ot - p$$
 (42)

Donde los coeficientes k, l, m, n, ñ, o y p van a variar dependiendo del día en el que se realice el estudio y t es el tiempo en el que se quiere conocer la velocidad del viento en el día tomando en cuenta que los minutos se deben dar en valor numérico, es decir, la media hora sería 0.5. Los valores van de 0 a 23.9 ya que 24 se consideraría como el valor 0 del siguiente día.

A continuación, se presenta en una gráfica 4 días distintos del año con sus datos meteorológicos y su aproximación polinómica.

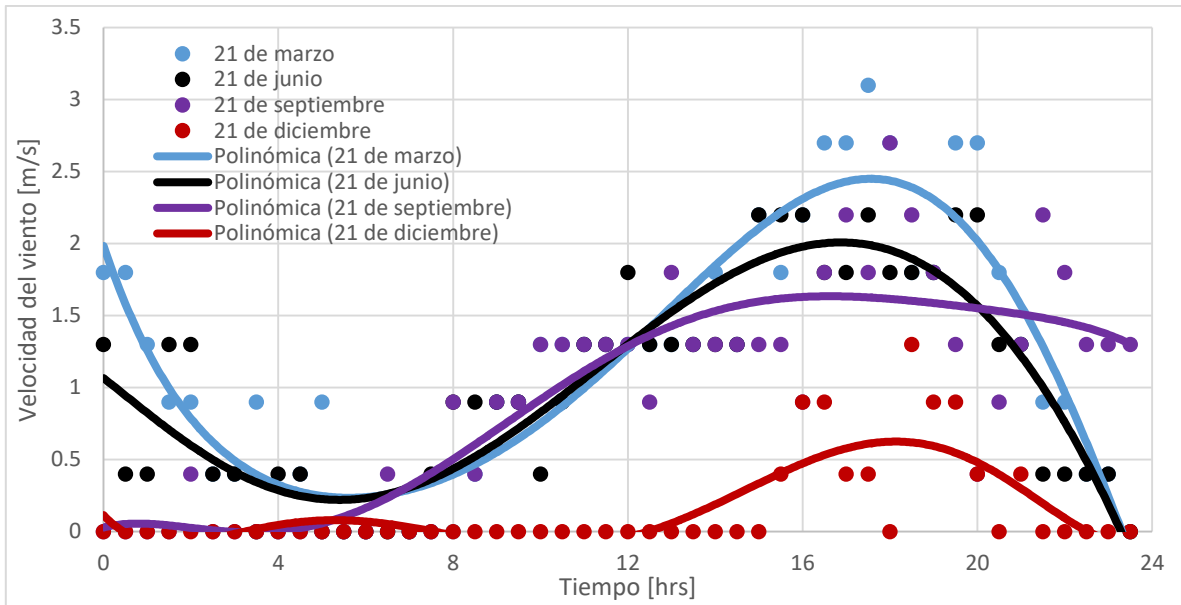


Figura 21. Velocidad del viento en diferentes días de 2019 en CU.

5.1.3. Humedad relativa

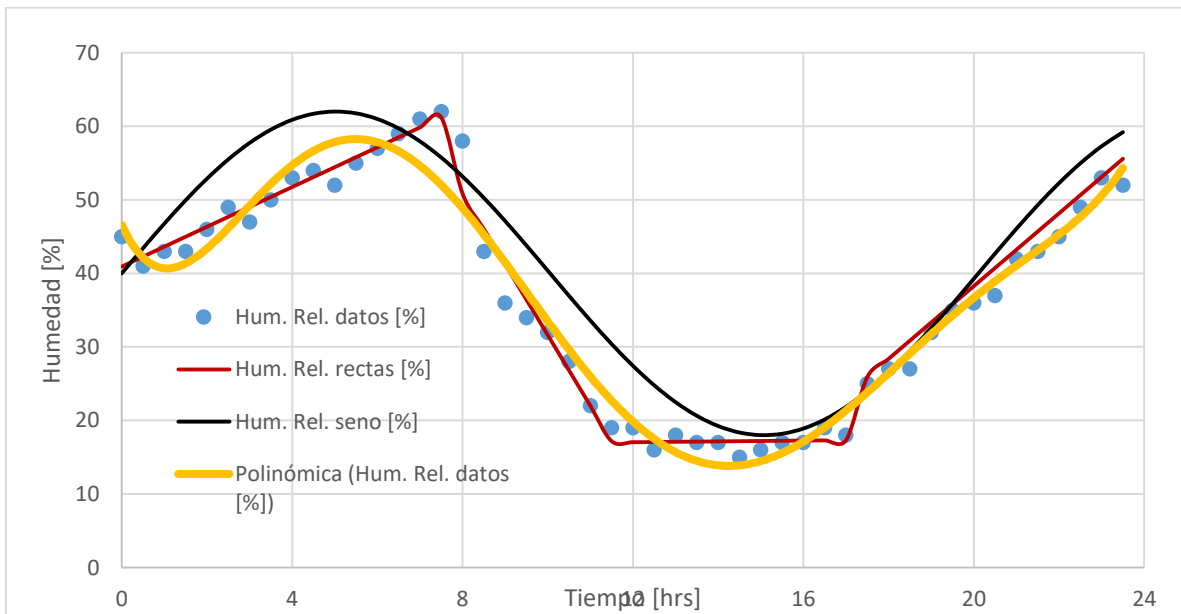


Figura 22. Humedad relativa el 31 de enero de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $\phi = 0.00005t^6 - 0.004t^5 + 0.1156t^4 - 1.5009t^3 + 8.0428t^2 - 12.561t + 46.598 \dots \dots \dots (43)$

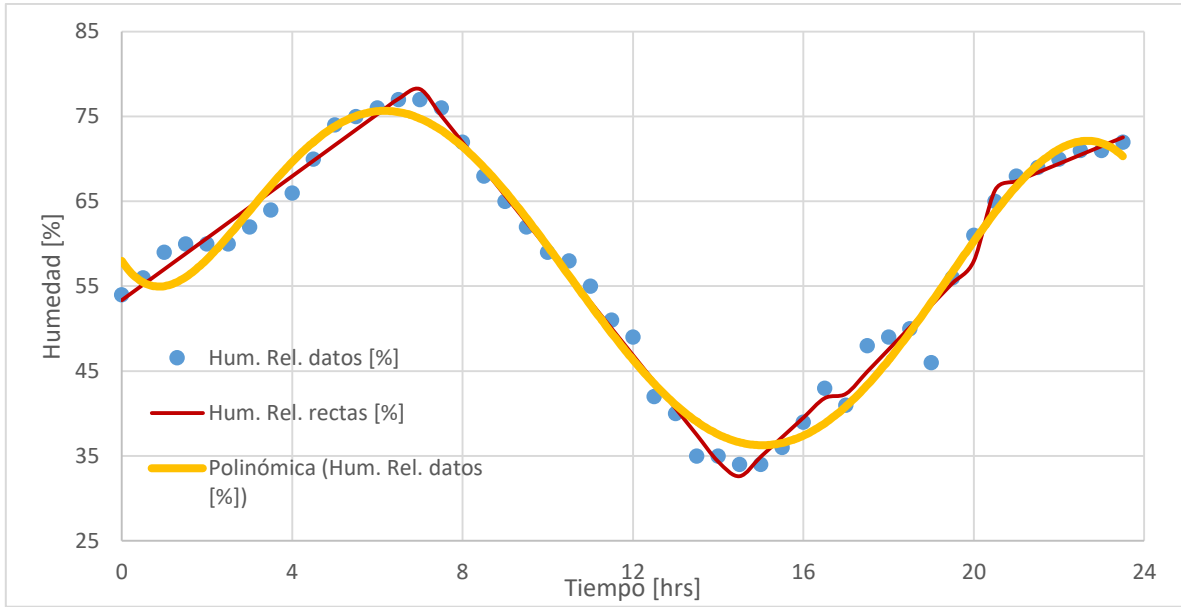


Figura 23. Humedad relativa el 21 de marzo de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $\phi = 0.00002t^6 - 0.0018t^5 + 0.0621t^4 - 0.9302t^3 + 5.4552t^2 - 7.5641t + 57.977$ (44)

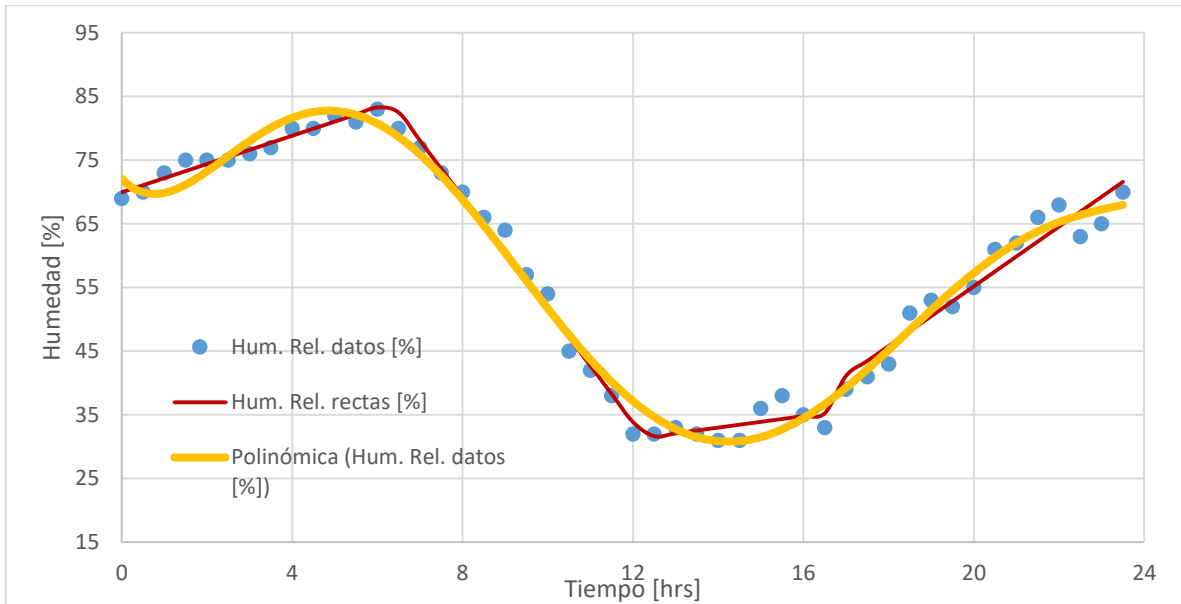


Figura 24. Humedad relativa el 21 de junio de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $\phi = 0.00004t^6 - 0.0031t^5 + 0.0906t^4 - 1.153t^3 + 5.6407t^2 - 6.7655t + 72.061$ (45)

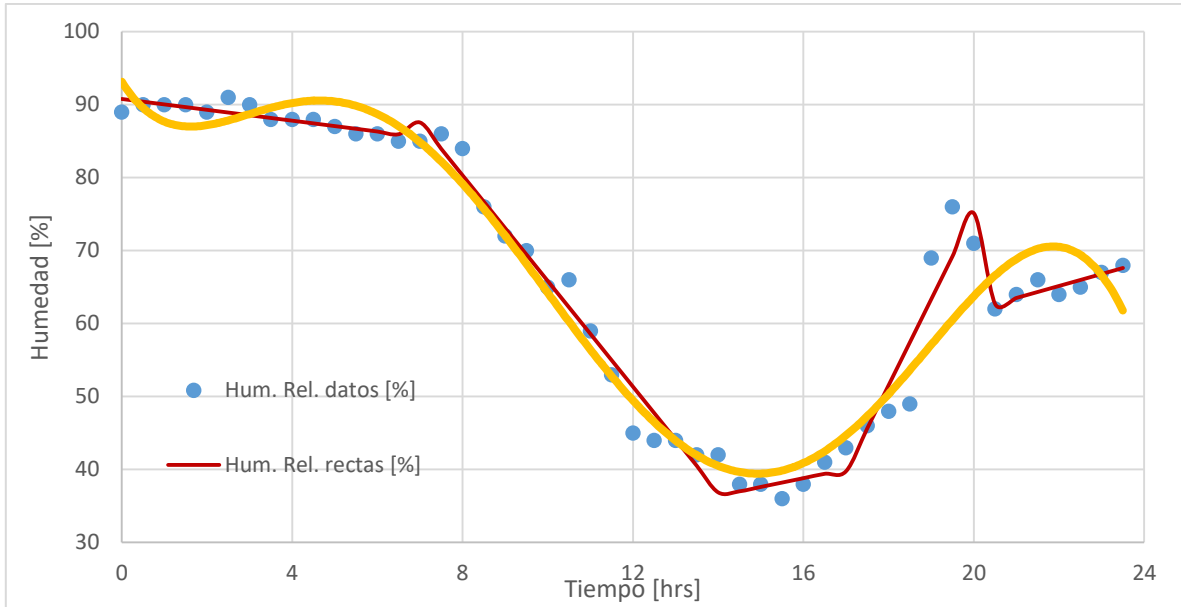


Figura 25. Humedad relativa el 21 de septiembre de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $\phi = 0.00001t^6 - 0.0014t^5 + 0.0504t^4 - 0.7596t^3 + 4.4286t^2 - 9.1812t + 93.133 \dots \dots \dots (46)$

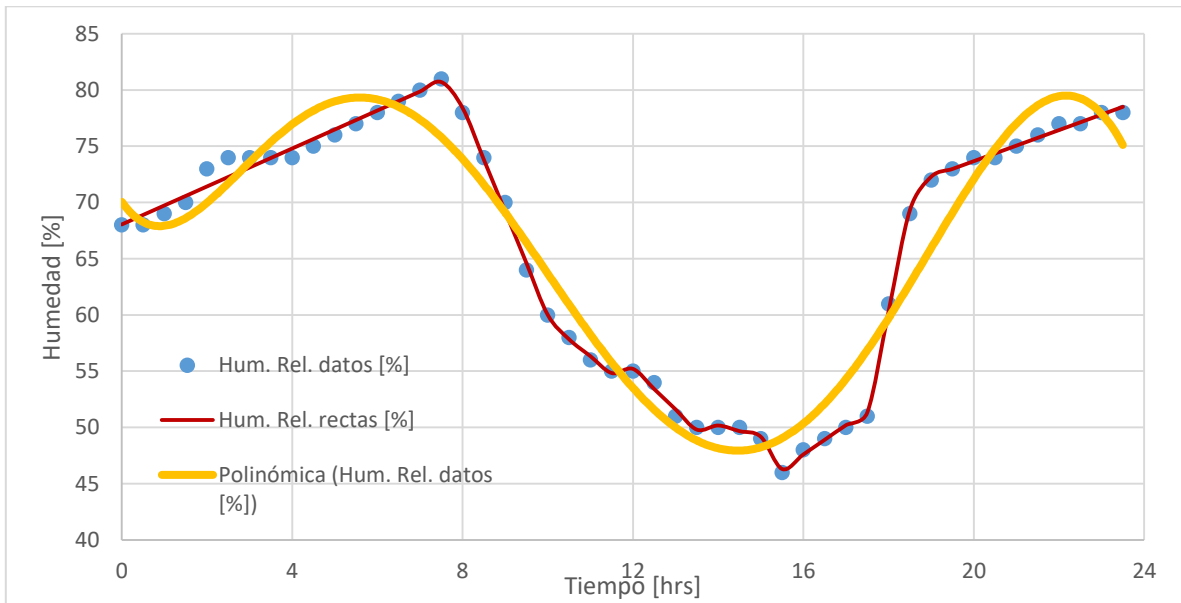


Figura 26. Humedad relativa el 21 de diciembre de 2019 en CU.

Ecuación polinómica: $\phi = 0.00001t^6 - 0.0014t^5 + 0.0473t^4 - 0.6872t^3 + 3.8349t^2 - 5.3124t + 70.043 \dots \dots \dots (47)$

Como podemos observar a partir de las gráficas, la forma polinómica se aproxima mejor a los datos obtenidos por la estación meteorológica, por lo que fue seleccionada para modelar el comportamiento de la humedad relativa en la ecuación de la energía de la alberca. La ecuación polinómica es de grado 6 por lo que su estructura es de la siguiente manera:

$$\phi = qt^6 - st^5 + ut^4 - wt^3 + xt^2 - yt + z \dots\dots\dots (48)$$

Donde los coeficientes q, s, u, w, x, y, z van a variar dependiendo del día en el que se realice el estudio y t es el tiempo en el que se quiere conocer la humedad relativa en el día tomando en cuenta que los minutos se deben dar en valor numérico, es decir, la media hora sería 0.5. Los valores van de 0 a 23.9 ya que 24 se consideraría como el valor 0 del siguiente día.

A continuación, se presenta en una gráfica 4 días distintos del año con sus datos meteorológicos y su aproximación polinómica.

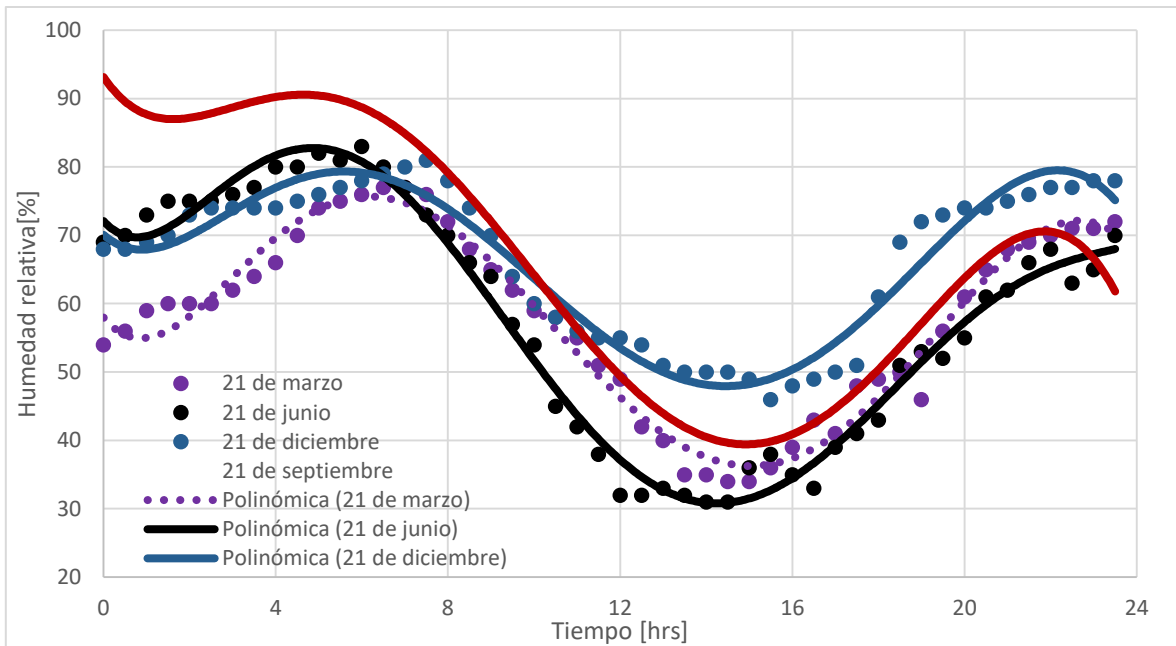


Figura 27. Humedad relativa en diferentes días de 2019 en CU.

5.2. Acoplamiento de términos estacionarios en el balance transitorio de energía

Los modelos expuestos en diversos artículos de investigación para representar las pérdidas y ganancias de calor en la alberca consideran valores constantes de las variables atmosféricas (temperatura, humedad relativa y velocidad). Sin embargo, requieren un acoplamiento adecuado al balance transitorio de energía. Una forma de realizar el acoplamiento de las pérdidas y ganancias de calor es mediante la implementación de variables atmosféricas (temperatura y humedad relativa) en función del tiempo, como se presentó en la sección 5.1. La velocidad del viento está presente indirectamente en el coeficiente convectivo de la corriente de aire. Por consiguiente, se requiere un método iterativo para compensar el valor supuesto de la velocidad del viento.

Es por ello que a continuación se presenta la ecuación de energía sustituyendo las ecuaciones polinómicas de las variables atmosféricas para poder realizar el proceso iterativo y calcular las pérdidas y ganancias de calor en la alberca.

$$\rho V \frac{cdT}{dt} = r_t * H(t) - 1.01 * \left\{ -[3.1 + (4.1 * V)] * (T - (-at^6 + bt^5 - dt^4 + et^3 - ft^2 + gt + j)) - \left\{ (0.280 + 0.784 * (kt^6 + lt^5 - mt^4 + nt^3 - ñt^2 + ot - p)) \left[\frac{(P - (qt^6 - st^5 + ut^4 - wt^3 + xt^2 - yt + z) * P_\infty)^{0.695}}{h_{fg}} \right] A_{sup} * 1.9 - 21(\rho_\infty - \rho) + 5.3N^* \right\} - \varepsilon\sigma(-at^6 + bt^5 - dt^4 + et^3 - ft^2 + gt + j)^4 \right\} + \dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s \dots\dots\dots (49)$$

Para comprender mejor el proceso iterativo que se llevará a cabo en MATLAB se propone un diagrama de flujo para detectar la metodología y los pasos a seguir en el cálculo.

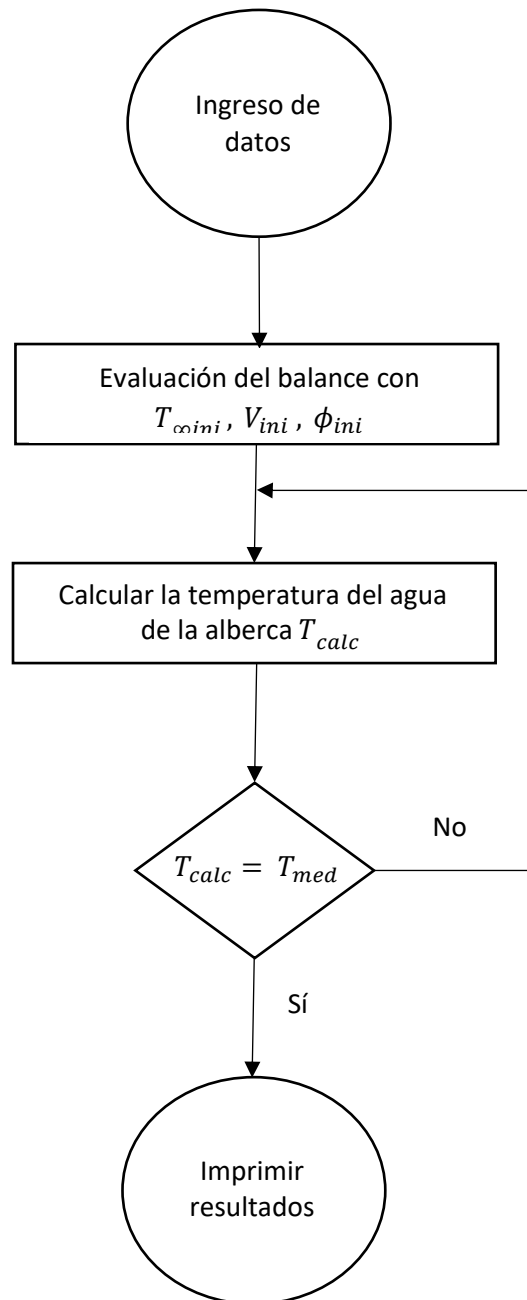


Figura 28. Diagrama de flujo de la metodología para evaluar el balance de energía en MATLAB

Ingresamos los datos de la alberca, posteriormente para la evaluación del balance proponemos valores iniciales de las condiciones atmosféricas y calculamos la temperatura del agua de la alberca, para comprobar que la temperatura calculada es la que se encuentra en la alberca. Si la temperatura calculada y la medida son iguales, ahí termina el proceso iterativo, de lo contrario, se vuelve a evaluar con nuevos valores de condiciones atmosféricas hasta encontrar la igualdad en las temperaturas.

5.3. Conclusiones

El planteamiento de un programa de ahorro de energía en el sistema de calentamiento del agua requiere que el fenómeno sea modelado en estado transitorio para identificar los intervalos de tiempo donde las pérdidas de calor son mayores. En el caso de albercas al aire libre, en las madrugadas se presenta la mayor pérdida de calor por efecto de la evaporación del agua debido a la disminución de la temperatura del aire y a que la radiación solar no está presente.

Las condiciones atmosféricas del medio ambiente (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) juegan un papel importante en la transferencia de energía (calentamiento/enfriamiento) en albercas a la intemperie y al considerar su variación a lo largo del tiempo puede aproximarse mejor a las condiciones reales. Un análisis por intervalos de tiempo cortos permite identificar los cambios de energía y realizar propuestas para disminuir las pérdidas de energía. Por consiguiente, la metodología propuesta permite detectar las variaciones de la temperatura del agua al considerar los cambios que hay en las condiciones atmosféricas a lo largo del día. Una ligera variación de la temperatura del agua parece insignificante, pero conlleva una gran variación en la energía. Este efecto puede ser despreciado al considerar la ecuación como estacionaria o al no acoplar bien los términos en la ecuación transitoria.

5.4. Trabajos futuros

El trabajo de tesis plantea una metodología para acoplar los términos estacionarios de las ganancias y pérdidas de calor en el balance transitorio de energía. El trabajo pendiente es el siguiente:

Desarrollar un experimento donde podamos controlar las condiciones climatológicas y los parámetros de una alberca a escala para validar las predicciones del balance de energía.

Resolver la ecuación de la energía en Matlab ya que, al tomar la variación de los parámetros atmosféricos, ajustarlas a una ecuación polinómica de grado 6 y realizar un proceso iterativo, resolver la ecuación en un software será más viable.

Plantear un programa de ahorro de energía con base en los resultados obtenidos, además de incorporar propuestas de buenas prácticas como el cubrir las albercas, ente otras.

Referencias

- Almanza, R., & Lara, J. (1994). Energy requirements for a swimming pool through a water atmosphere energy balance. *Solar Energy, Vol.53, No.1*, 37-39.
- Annaratone, D. (2008). *Steam Generators: Description and Design*. Milano Italy: Springer.
- Asdrubali, F. (2009). A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools. *Energy and Buildings*, 311 - 319.
- Bataineh, K. M. (2015). Transient analytical model of a solar-assisted indoor swimming pool heating system. *Journal of Energy Engineering, ASCE* , 1-11.
- Bernhard, M., Marc, O., Quilichini, E., & Castaing-Lasvignottes, J. (2019). Sensitivity analysis of an outdoor swimming pool under dynamic conditions. *Procedia Manufacturing 35* , 124-129.
- Buonomano, A., De Luca, G., Figaj, R., & Vanoli, L. (2015). Dynamic simulation and thermo-economic analysis of a PhotoVoltaic/Thermal collector heating system for an indoor-outdoor swimming pool. *Energy Conversion and Management Vol. 99*, 176-192.
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica*. New York, U.S.A: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. McGrawHill.
- Chan, W. W., & Lam, J. C. (2003). Energy-saving Supporting Tourism Sustainability A Case Study of Hotel Swimming Pool Heat Pump. *Journal of Sustainable Tourism Vol. 11, No.1*, 1-10.
- Chandra, L. &. (2018). *Concentrated Solar Thermal Energy Technologies: Recent Trends and Applications*. India: Springer.
- Ciuman, P., & Lipska, B. (2018). Experimental validation of the numerical model of air, heat and moisture flow in an indoor swimming pool. *Building and Environment 145*, 1-13.
- Czarnecki. (1978). *Swimming Pool Heating by Solar Energy*. Highett, Victoria: Division of Mechanical Engineering Technical Report No. TR19.
- Delgado, J. &. (2020). Dynamic simulation model and empirical validation for estimating thermal energy demand in indoor swimming pools. *Energy Efficiency*, 1-18.
- Dongellini, M., Falcioni, S., Martelli, A., & Morini, G. L. (2015). Dynamic simulation of outdoor swimming pool solar heating. *Energy Procedia 81 EL SEVIER*, 1-10.
- Dorantes, R., García, G., Salazar, C., Oviedo, H., González, H., Alanis, R., . . . Martín-Dominguez, I. R. (2014). Thermal and hydraulic design of a solar collector field for a primary school pool. *Energy Procedia 57 EL SEVIER*, 2515-2524.
- Duffie, J. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

- Garay Martínez, R., Arregi Goikolea, B., Gomis Paya, I., Bonnamy, P., Raji, S., & Lopez, J. (2017). Performance assessment of an unglazed solar thermal collector for envelope retrofitting. *Energy Procedia 115 EL SEVIER*, 361-368.
- Goncalves, R., Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. C. (2019). Analysis of swimming pool solar heating using the utilizability method. *Energy Reports ELSEVIER*, 717-724.
- Govaer, D., & Zarmi, Y. (1981). Analytical Evaluation of Direct Solar Heating of Swimming Pools. *Solar Energy Vol 27 No.6*, 529-533.
- Govind, & Sodha, M. S. (1983). Thermal Model of Solar Swimming Pools. *Energy Convers. Mgmt Vol. 23, No.3*, 171-175.
- Grassi, W. (2018). *Heat Pumps "Fundamentals and Applications"*. Pisa, Italy: Springer.
- Hidalgo, M. R., P.A. Rodríguez, A., Lecuona, A., Gutiérrez, G., Urueta, & Ventas., R. (2011). Flat plate thermal solar collector efficiency; transient behavior Under working conditions Part II: Model Application and design contributions. *Applied Thermal Engineering, Elsevier; 31*, 14-15.
- Inan, M., & Atayilmaz, S. (2017). Experimental investigation of evaporation from a horizontal free water surface. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences* , 119 - 131.
- Incropera, F. P. (1996). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. USA: John Wiley & Sons.
- Jiménez, S., Carrillo, V., & Alvarado, M. (2015). Swimming pool heating systems: a review of applied models. *TECCIENCIA, Vol 10 No.19*, 17-26.
- Jordaan, M., & Narayanan, R. (2019). A numerical study on various heating options applied to swimming pool for energy saving. *Energy Procedia 160 EL SEVIER*, 131-138.
- Kaci, K., Merzouk, M., Kasbadji Merzouk, N., El Ganaoui, M., Sami, S., & Djedjig, R. (2017). Dynamic simulation of hybrid-solar water heated olympic swimming pool. *Energy Procedia 139 EL SEVIER*, 750-757.
- Karwa, R. (2017). *Heat and Mass Transfer*. India: Springer.
- Kreith, F., & Manglik, R. M. (2011). *Principles of Heat Transfer*. Stanford CT USA: Cengage Learning.
- Kulacki, A., F., Archarya, S., Chudnovsky, Y., Machado Cotta, R., Devireddy, R., . . . Mostaghimi, J. & (2018). *Handbook of Thermal Science and Engineering*. Minneapolis, MN, USA: Springer.
- Kumar, N., & Arakeri, J. H. (2015). Natural Convection Driven Evaporation from a Water Surface. *Procedia IUTAM 15*, 108-115.
- Lovell, D., Rickerby, T., & al., e. (2019). Thermal performance prediction of outdoor swimming pools. *Building and Environment 160*, 1-11.
- Lugo, S., Morales, L., Best, R., Gómez, V., & García-Valladares, O. (2019). Numerical simulation and experimental validation of an outdoor-swimming pool solar heating system in warm climates. *Solar Energy Vol.189*, 45-56.

- Mancic, M. V., Zivkovic, D. S., & Milosavljevic, P. M. (2014). Mathematical Modelling and Simulation of the Thermal Performance of a Solar Heated Indoor Swimming Pool. *Thermal Science Vol.18, No.3*, 999-1010.
- Martynenko, O., & Khramtsov, P. (2005). *Free-Convective Heat Transfer "With Many Photographs of Flows and Heat Exchange"*. Heidelberg: Springer.
- Nouanegue, H. F., Sansregret, S., Le Lostec, B., & Daoud, A. (2011). Energy model validation of heated outdoor swimming pools in cold weather. *Proceedings of Building Simulation*, 1-6.
- Oosthuizen, P. H. (2018). *Natural Convective Heat Transfer from Horizontal and Near Horizontal Surfaces*. Kingston, ON Canada: Springer.
- Orozco, C., Acosta, R., & Montoya, J. (2011). Optimización del aislamiento térmico de una cubierta transparente de un secador híbrido de Guadua angustifolia. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 1-9.
- Poós, T., & Varju, E. (2017). Dimensionless evaporation rate from free water surface at tubular artificial flow. *Energy Procedia* 112, 366-373.
- Poós, T., & Varju, E. (2020). Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 153, 1-10.
- Reda, F. (2017). *Solar Assisted Ground Source Heat Pump Solutions "Effective Energy Flows Climate Management"*. Espoo, Finland: Springer.
- Rohwer, C. (1931). *Evaporation from Free Water Surfaces*. Washington, D.C USA: Bureau of Agriculture Engineering.
- Ruiz, E., & Martínez, P. J. (2010). Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model. *Solar Energy Vol.84*, 116-123.
- Salgado, P., Dorantes, R., Orellán, G., López, A., Jiménez, M., González, H., & Ramírez, J. (2013). Transient thermal rating in a flat-plate solar heating system of a public olympic pool. *Revista Mexicana de Física S 59*, 173-178.
- Shah, M. (2018). Improved model for calculation of evaporation from water pools. *Science and Technology for the Build Environment*, 1064-1074.
- Shah, M. M. (2014). Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces. *ASHRAE Transactions, Volume 120 Part 2*, 3-17.
- Shah, R. K. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Sharma, S. (2011). *Calculation of heat losses from Nit-Rourkelas swimming pool and a study on a evaporative losses using Matlab*. Rourkela: National Institute of Technology Rourkela.
- Tang, R., & Etzion, Y. (2004). Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface. *Building and Environment* 39, 77- 86.
- Wark Jr., K. &. (2001). *Termodinámica*. USA: McGraw_Hill.

- Woolley, J., Harrington, C., & Modera, M. (2011). Swimming pools as heat sinks for air conditioners: Model design and experimental validation for natural thermal behavior of the pool. *Building and Environment*, 187 - 195.
- Zuccari, F., Santiangeli, A., & Orecchini, F. (2017). Energy analysis of swimming pools for sport activities: cost effective solutions for efficiency improvement. *Energy Procedia 126 EL SEVIER*, 123-130.

ANEXOS

A.1. Simulación en TRNSYS

En este apartado se encuentra la simulación en TRNSYS. A continuación, presento algunos ejemplos de proyectos:

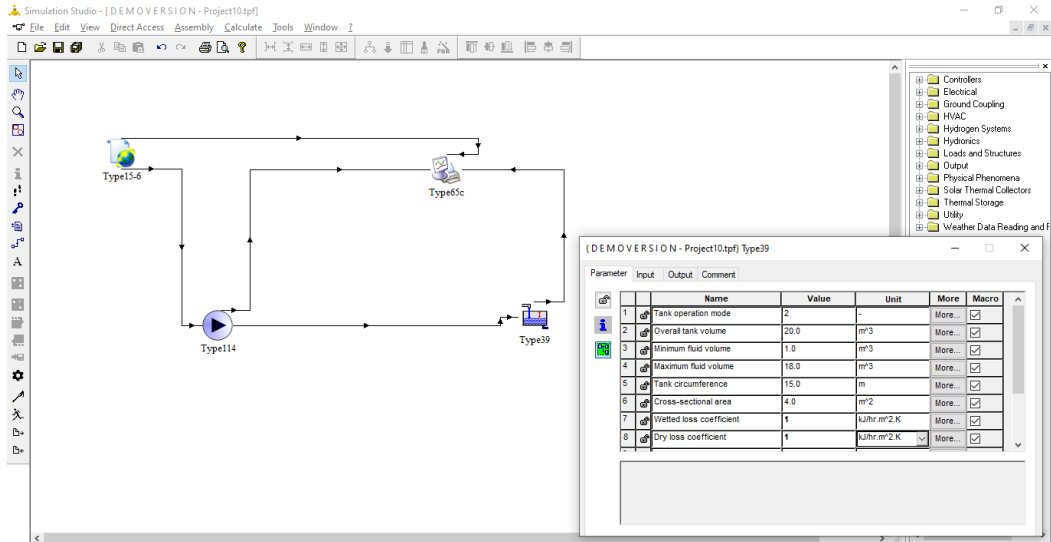
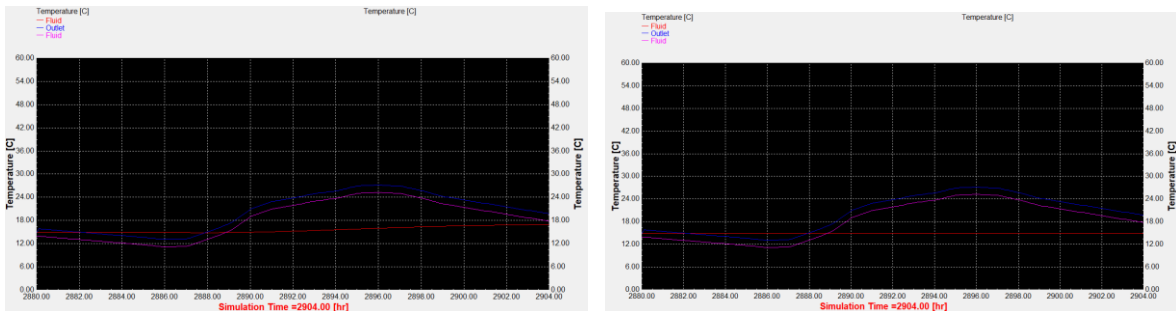


Figura 29. Software TRNSYS



Figuras 30. Gráficas en TRNSYS

En el primer proyecto realizado se utilizaron cuatro componentes, para el sistema una bomba de alimentación y un tanque de almacenamiento de agua, para analizarlo la base de datos meteorológica de Ciudad Universitaria y una graficadora para mostrar los resultados. El análisis se hizo para todo un día completo (1° de mayo). La diferencia entre ambos gráficos es que el componente del tanque tiene dentro de varios parámetros, agregar constante de pérdidas de calor para la parte húmeda como para la parte seca del reservorio, por lo que los parámetros a variar fueron esas constante de pérdidas, mostrando resultados muy similares entre ellas

a pesar de variar las constantes de manera significativa, lo que arrojó la primera duda de si en realidad el programa hacía el análisis de manera transitoria considerando en cada momento la variación de las pérdidas o si reflejaba el valor constante como un promedio general sin importar la variación de la temperatura ambiente con respecto al tiempo.

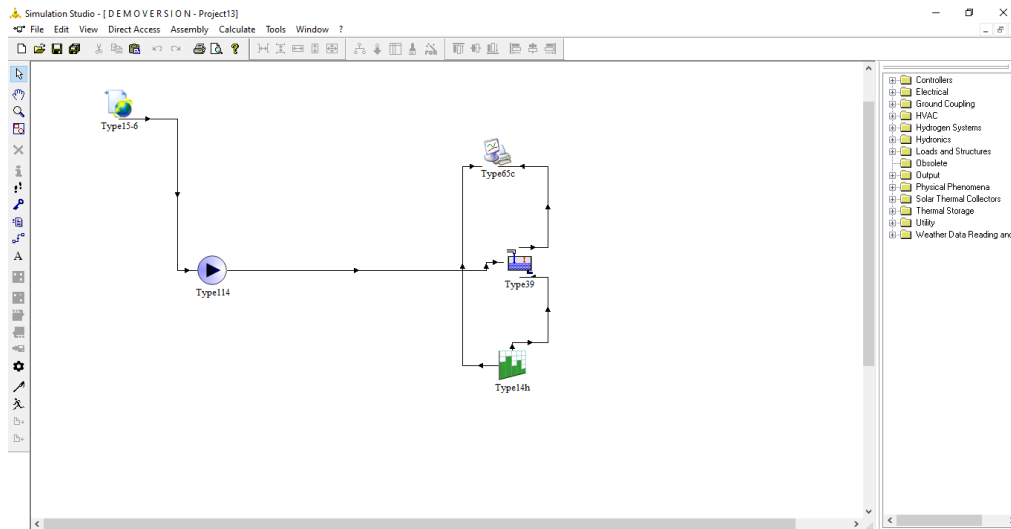


Figura 31. Proyecto 2 en TRNSYS con bloque de tiempo

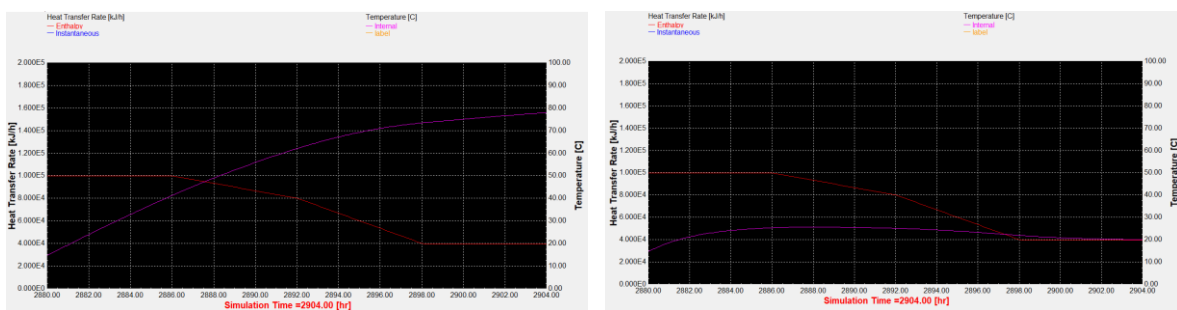


Figura 32. Graficas del proyecto 2 en TRNSYS

En este segundo proyecto, se utilizaron los mismos cuatro componentes anteriores, pero se agregó un bloque para forzar un comportamiento en un intervalo de tiempo determinado, algo que en muchos artículos publicados donde se apoyaban del software utilizaban para las albercas. En las gráficas podemos ver en la línea roja como esta va variando su pendiente a lo largo del tiempo y esto es porque de manera manual se pueden establecer periodos de operación lo que fuerza a valores que nosotros queramos que varíen lo hagan como deseamos, este bloque es muy útil para poder agregar registros de valores que estamos muy seguros de cómo operan en la realidad. Sin embargo, si no estamos seguros y agregamos estos bloques podemos caer en la incertidumbre si es algo que ocurre realmente en nuestro fenómeno o estamos idealizando el sistema. La diferencia entre las gráficas está dada de nuevo por la variación en los valores de las constantes de pérdida de calor en el tanque de almacenamiento en la parte húmeda y seca del mismo.

A.2. Consumo de combustible

En este apartado se presenta la siguiente tabla donde se desglosan los consumos energéticos en las instalaciones de la alberca para abastecer las dos calderas de gas lp:

Tabla 7. Consumo de gas lp para las calderas de la AOU.

ENERO 2016					FEBRERO 2016					MARZO 2016					ABRIL 2016										
NÚM. FACTURA	FECHA DE FACTURACIÓN	FECHA DE CARGA	LÍMITE POR CARGA	LÍMITE CARGA TOTAL	MÓNTO	NÚM. FACTURA	FECHA DE FACTURACIÓN	FECHA DE CARGA	LÍMITE POR CARGA	LÍMITE CARGA TOTAL	MÓNTO	NÚM. FACTURA	FECHA DE FACTURACIÓN	FECHA DE CARGA	LÍMITE POR CARGA	LÍMITE CARGA TOTAL	MÓNTO	NÚM. FACTURA	FECHA DE FACTURACIÓN	FECHA DE CARGA	LÍMITE POR CARGA	LÍMITE CARGA TOTAL	MÓNTO		
4355	11-01-16	05-01-16	4750	18 000.00	\$134 100.00	4354	03-02-16	02-02-16	7120	24800.00	\$165 432.00	4353	03-03-16	02-03-16	12400	12400	\$66 191.00	4756	11-04-16	03-04-16	3020	9 770.00	\$72 407.40		
4356	11-01-16	07-01-16	5020			4355	03-02-16	03-02-16	3030			4357	03-03-16	03-03-16	10400	10400	\$76 143.00								
4357	11-01-16	09-01-16	7200			4356	03-02-16	03-02-16	3070			4358	03-03-16	03-03-16	3200										
4358	11-01-16	11-01-16	7400	20 690.00	\$154 177.70	4357	03-02-16	11-02-16	5320	13 810.00	\$102 684.00	4359	03-03-16	11-03-16	1410	1410	\$66 170.00	4758	11-04-16	11-04-16	11 420.00	11 420.00	\$85 070.00		
4359	11-01-16	13-01-16	6700			4358	03-02-16	13-02-16	3360			4360	03-03-16	13-03-16	1000										
4360	11-01-16	15-01-16	6020	26 110.00	\$194 519.30	4359	03-02-16	15-02-16	4200			4361	03-03-16	15-03-16	1200	1200	\$56 244.00	4759	11-04-16	04-04-16	3300.00	3300.00	\$24 437.30		
4361	11-01-16	17-01-16	5910			4360	03-02-16	17-02-16	4200	13 800.00	\$101 300.00	4362	03-03-16	17-03-16	1200				4760	11-04-16	04-04-16	6 272.00	6 272.00	\$47 020.00	
4362	11-01-16	19-01-16	7200			4361	03-02-16	19-02-16	4200			4363	03-03-16	19-03-16	1000				4761	11-04-16	06-04-16	4810	4810	\$34 364.90	
4363	11-01-16	21-01-16	5220	6 202.00	\$46 923.90	4362	03-02-16	21-02-16	4200			4364	03-03-16	21-03-16	1200				4762	11-04-16	08-04-16	6 020.00	6 020.00	\$44 337.30	
4364	11-01-16	23-01-16	8300	16 800.00	\$126 867.00	4363	03-02-16	23-02-16	12310	13 771.00	\$102 093.30	4365	03-03-16	23-03-16	1000				4763	11-04-16	10-04-16	3400	3 400.00	\$25 360.00	
4365	11-01-16	25-01-16	5910			TOTAL						4366	03-03-16	25-03-16	2300	2300	\$88 519.00	TOTAL							
TOTAL				\$1 620.00	\$46 923.90	TOTAL						TOTAL							TOTAL					\$26 307.00	\$276 190.60
MAYO 2016					JUNIO 2016					JULIO 2016					AGOSTO 2016										
4366	05-05-16	03-05-16	7400	7 400.00	\$55 132.00	4370	02-06-16	02-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5009	01-07-16	01-07-16	8000	8000	\$54 300.00	5008	04-08-16	03-08-16	3100	10000	\$74 903.00		
4367	05-05-16	05-05-16	6000	2 800.00	\$19 210.00	4371	02-06-16	02-06-16	4000	4 800.00	\$36 000.00	5010	01-07-16	01-07-16	8000	8000	\$55 740.00	5009	04-08-16	03-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4368	05-05-16	07-05-16	5100	6 510.00	\$48 580.00	4372	02-06-16	07-06-16	5450	6600.00	\$49 500.00	5011	01-07-16	07-07-16	8000	8000	\$57 600.00	5010	04-08-16	05-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4369	05-05-16	09-05-16	3200		\$23 520.00	4373	02-06-16	09-06-16	2200	2 800.00	\$20 800.00	5012	01-07-16	09-07-16	8000	8000	\$58 400.00	5011	04-08-16	07-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4370	05-05-16	11-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4374	02-06-16	11-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5013	01-07-16	11-07-16	8000	8000	\$59 200.00	5012	04-08-16	09-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4371	05-05-16	13-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4375	02-06-16	13-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5014	01-07-16	13-07-16	8000	8000	\$59 600.00	5013	04-08-16	11-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4372	05-05-16	15-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4376	02-06-16	15-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5015	01-07-16	15-07-16	8000	8000	\$60 000.00	5014	04-08-16	13-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4373	05-05-16	17-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4377	02-06-16	17-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5016	01-07-16	17-07-16	8000	8000	\$60 400.00	5015	04-08-16	15-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4374	05-05-16	19-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4378	02-06-16	19-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5017	01-07-16	19-07-16	8000	8000	\$60 800.00	5016	04-08-16	17-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4375	05-05-16	21-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4379	02-06-16	21-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5018	01-07-16	21-07-16	8000	8000	\$61 200.00	5017	04-08-16	19-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4376	05-05-16	23-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4380	02-06-16	23-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5019	01-07-16	23-07-16	8000	8000	\$61 600.00	5018	04-08-16	21-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4377	05-05-16	25-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	4381	02-06-16	25-06-16	2000	2 800.00	\$20 800.00	5020	01-07-16	25-07-16	8000	8000	\$62 000.00	5019	04-08-16	23-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4378	05-05-16	27-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	TOTAL						5021	01-07-16	27-07-16	8000	8000	\$62 400.00	5020	04-08-16	25-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4379	05-05-16	29-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	TOTAL						5022	01-07-16	29-07-16	8000	8000	\$62 800.00	5021	04-08-16	27-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
4380	05-05-16	31-05-16	4000	8000.00	\$58 400.00	TOTAL						5023	01-07-16	31-07-16	8000	8000	\$63 200.00	5022	04-08-16	29-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
TOTAL				\$6 670.00	\$48 580.00	TOTAL						5024	01-07-16	31-07-16	8000	8000	\$63 600.00	5023	04-08-16	31-08-16	1800	10000	\$74 903.00		
SEPTIEMBRE 2016					OCTUBRE 2016					NOVIEMBRE 2016															
5178	12-09-16	08-09-16	1800	7400	\$60 817.00	5208	10-10-16	08-10-16	2000	8000	\$53 612.00	5302	09-11-16	08-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5184	24-09-16	23-09-16	1800	7400	\$52 414.00		
5179	12-09-16	10-09-16	1800			5209	10-10-16	10-10-16	2000			5303	09-11-16	10-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5185	24-09-16	25-09-16	1800	7400	\$52 414.00		
5180	12-09-16	12-09-16	1800			5210	10-10-16	12-10-16	2000			5304	09-11-16	12-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5186	24-09-16	27-09-16	1800	7400	\$52 414.00		
5181	12-09-16	14-09-16	1800			5211	10-10-16	14-10-16	2000			5305	09-11-16	14-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5187	24-09-16	29-09-16	1800	7400	\$52 414.00		
5182	12-09-16	16-09-16	1800			5212	10-10-16	16-10-16	2000			5306	09-11-16	16-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5188	24-09-16	30-09-16	1800	7400	\$52 414.00		
5183	12-09-16	18-09-16	1800			5213	10-10-16	18-10-16	2000			5307	09-11-16	18-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5189	24-09-16	01-10-16	1800	7400	\$52 414.00		
5184	12-09-16	20-09-16	1800			5214	10-10-16	20-10-16	2000			5308	09-11-16	20-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5190	24-09-16	03-10-16	1800	7400	\$52 414.00		
5185	12-09-16	22-09-16	1800			5215	10-10-16	22-10-16	2000			5309	09-11-16	22-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5191	24-09-16	05-10-16	1800	7400	\$52 414.00		
5186	12-09-16	24-09-16	1800			5216	10-10-16	24-10-16	2000			5310	09-11-16	24-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5192	24-09-16	07-10-16	1800	7400	\$52 414.00		
5187	12-09-16	26-09-16	1800			5217	10-10-16	26-10-16	2000			5311	09-11-16	26-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5193	24-09-16	09-10-16	1800	7400	\$52 414.00		
5188	12-09-16	28-09-16	1800			5218	10-10-16	28-10-16	2000			5312	09-11-16	28-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5194	24-09-16	11-10-16	1800	7400	\$52 414.00		
5189	12-09-16	30-09-16	1800			5219	10-10-16	30-10-16	2000			5313	09-11-16	30-11-16	1800	3000	\$14 000.00	5195	24-09-16	13-10-16	1800	7400	\$52 414.00		
5190	12-09-16	01-10-16	1800			5220	10-10-16	01-11-16	2000			5314	09-11-16	01-12-16	1800	3000	\$14 000.00	TOTAL							
5191	12-09-16	03-10-16	1800			5221	10-10-16	03-11-16	2000			5315	09-11-16	03-12-16	1800	3000	\$14 000.00	TOTAL							
5192	12-09-16	05-10-16	1800			5222	10-10-16	05-11-16	2000																

A.3. Tabla de coeficientes convectivos y ecuación de (Ruiz & Martínez, 2010).

En este apartado se encuentra la ecuación propuesta por (Ruiz & Martínez, 2010) para obtener el valor del coeficiente convectivo con base en la velocidad del viento, la cual, obtuvieron al basarse en el estándar australiano de 1989 y que se encuentra en el presente documento como la ecuación (3). También, se puede evaluar las pérdidas de calor por convección utilizando un valor dentro de la tabla tomando en cuenta si tenemos convección libre o forzada:

$$h = 3.1 + 4.1 * V$$

Tabla 8. Coeficientes convectivos adaptado de (Orozco et.al., 2011)

Medio	Coficiente de transferencia de calor h [W/m²°C]
Gases (convección libre)	2 a 25
Gases (convección forzada)	25 a 250
Líquidos (convección libre)	50 a 1000
Líquidos (convección forzada)	300 a 6000
Vapor (en condensación)	50 a 20 000