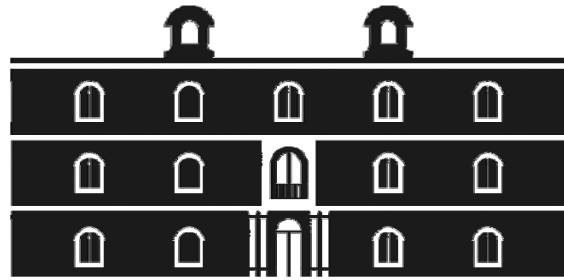




Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Modelado dinámico de una piscina climatizada asistida con energía solar

Titulación: Master en Energías Renovables
Intensificación:

Alumno/a: José Pablo delgado Marín

Director/a/s: José Ramón García Cascales

Cartagena, 14 de junio de 2013

ÍNDICE

ÍNDICE	2
SÍMBOLOS	4
FIGURAS.....	6
1. RESUMEN	9
2. INTRODUCCIÓN.....	10
3. CARACTERÍSTICAS DE LAS PISCINAS CLIMATIZADAS	11
3.1. NORMATIVA DE APLICACIÓN.....	16
3.1.1. NORMATIVA NIDE	16
3.1.2. REGLAMENTO DE INSTALACIONES TÉRMICAS EN EDIFICIOS	18
3.1.3. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN	20
3.1.4. REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES HIGIÉNICO-SANITARIAS	21
4. BALANCE ENERGÉTICO EN UNA PISCINA CLIMATIZADA.....	22
4.1. PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN DEL AGUA DE LA PISCINA.....	23
4.2. PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN DE CALOR	24
4.3. PÉRDIDAS POR RENOVACIÓN DEL AGUA DE LA PISCINA	25
4.4. BALANCE ENERGÉTICO EN EL VASO DE LA PISCINA	26
5. MODELADO DEL SISTEMA.....	27
5.1. INTRODUCCIÓN.....	27
5.2. MODELADO CON TRNSYS.....	27
5.2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE TRNSYS	28
5.2.2. DEFINICIÓN DE SISTEMAS EN TRNSYS	29
5.2.3. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS.....	29
5.2.4. CREACIÓN DE UN NUEVO COMPONENTE	30
6. MODELADO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN	37
6.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS	37
6.1.1. COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA PISCINA - TRNbuild Type 56.....	37
6.1.2. COMPORTAMIENTO DEL VASO DE LA PISCINA – Type 201	38

6.1.3. CALDERA – Type 6.....	38
6.1.4. CONTROL PID – Type 23.....	39
6.1.5. DEFINICIÓN DE VALORES DE USO HORARIO – Types 14a y 14h.....	39
6.1.6. SUPERFICIE DE CAPTACIÓN SOLAR – Type 1b.....	39
6.1.7. BOMBA DE CIRCULACIÓN – Type 3b.....	40
6.1.8. INTERCAMBIADOR DE CALOR – Type 5b	40
6.1.9. REGISTRO DE DATOS – Type 93	40
6.1.10. INTEGRADOR – Type 24	41
6.1.11. REGISTRO DE DATOS EN ARCHIVO – Type 25c.....	41
6.1.12. VISUALIZADOR DE RESULTADOS EN PANTALLA – Type 65d	41
6.2. MODELADO FINAL DE LA INSTALACIÓN	42
6.2.1. MODELADO SIN INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	42
6.2.2. MODELADO CON INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	46
7. RESULTADOS.....	49
7.1. VALIDACIÓN DEL MODELO	55
7.2. ANÁLISIS CON INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA.....	57
8. CONCLUSIONES	62

SÍMBOLOS

HR	Humedad relativa del aire (%)
k	Conductividad térmica (W/m^2K)
M	Masa de agua contenida en el vaso de la piscina (kg)
\dot{m}	Gasto másico de agua total evaporada en la piscina (kg/s)
\dot{m}_w	Gasto másico de agua evaporada desde la superficie del agua de la piscina (kg/s)
\dot{m}_s	Gasto másico de agua evaporada desde la playa de la piscina (kg/s)
\dot{m}_p	Gasto másico de agua evaporada desde el cuerpo de las personas mojadas (kg/s)
\dot{m}_{cald}	Gasto másico de agua aportada por la caldera (kg/s)
\dot{m}_{renov}	Gasto másico de agua extraída del vaso de la piscina para renovación (kg/s)
P	Pérdidas térmicas totales en el vaso de la piscina (kW)
P_{ev}	Pérdidas térmicas por evaporación en el vaso de la piscina (kW)
P_{cv}	Pérdidas térmicas por convección en el vaso de la piscina (kW)
P_{rad}	Pérdidas térmicas por radiación en el vaso de la piscina (kW)
P_{cond}	Pérdidas térmicas por conducción en el vaso de la piscina (kW)
p_w	Presión parcial del vapor de agua a la temperatura del vaso de la piscina (Pa)
p_{ro}	Presión parcial del vapor de agua a la temperatura de rocío del aire ambiente (Pa)
p_s	Presión parcial del vapor de agua a la temperatura superficial del suelo (Pa)
p_{35}	Presión parcial del vapor de agua a la temperatura media de la superficie del cuerpo humano – 35°C (Pa)
r_w	Calor latente de vaporización del agua a la temperatura del vaso de la piscina (kJ/kg)
r_s	Calor latente de vaporización del agua a la temperatura superficial del suelo (kJ/kg)
r_{35}	Calor latente de vaporización del agua a la temperatura media de la superficie del cuerpo humano (kJ/kg)
S_w	Superficie de la lámina de agua del vaso de la piscina (m^2)
S_s	Superficie del suelo mojado alrededor de la piscina (playa mojada) (m^2)
S_p	Superficie del cuerpo de los bañistas mojados (m^2)

t	Tiempo (s)
t	Temperatura, en °C
t_{wm}	Temperatura media del agua del vaso de la piscina, en °C
t_{wa}	Temperatura del agua de reposición (de la red pública), en °C
t_i	Temperatura del agua del vaso al inicio de un lapso de tiempo, en °C
t_f	Temperatura del agua del vaso al final de un lapso de tiempo, en °C
T	Temperatura, en K
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco, en K
V	Velocidad del aire en contacto con la piscina (m/s)
ω	Coeficiente de velocidad del aire

FIGURAS

Figura 3.1. Esquema de funcionamiento de una piscina con skimmers

Figura 3.2. Esquema de la instalación en una piscina desbordante con canal perimetral

Figura 3.3. Profundidad de las piscinas para uso de salto

Figura 3.4. Dimensiones de las piscinas según normativa NIDE

Figura 3.5. Imágenes de manta térmica para piscinas

Figura 3.6. Requerimientos mínimos de aporte con energía solar para el calentamiento de piscinas, según CTE-HE4

Figura 4.1. Resumen de las pérdidas de calor en el vaso de una piscina

Figura 5.1. Nuevo componente.

Figura 5.2. Información general del nuevo componente.

Figura 5.3. Variables del nuevo componente.

Figura 5.4. Subrutina del Type.

Figura 5.5. Definición de las entradas, salidas y parámetros en el modelo.

Figura 5.6. Definición del valor inicial de las salidas.

Figura 5.7. Introducción del modelo matemático

Figura 5.8. Designación de las variables asociadas a las salidas

Figura 5.9. Detalle de las variables utilizadas en el type 201

Figura 5.10. Detalle de los cálculos utilizados en el type 201

Figura 6.1. Conjunto generado por TRNbuild para evaluar el comportamiento energético del edificio

Figura 6.2. Componente Piscina

Figura 6.3. Componente caldera

Figura 6.4. Componente control PID

Figura 6.5. Componentes para definición de valores de uso horario

Figura 6.6. Superficie de captación solar térmica

Figura 6.7. Bomba de circulación

Figura 6.8. Intercambiador de calor

Figura 6.9. Registro de datos

Figura 6.10. Elemento integrador

Figura 6.11. Registro de datos en archivo

Figura 6.12. Visualizador en pantalla de los resultados

Figura 6.13. Esquema de la instalación de la piscina climatizada sin instalación solar térmica

Figura 6.14. Definición de parámetros en la Control Card

Figura 6.15. Definición de valores en el componente Piscina

Figura 6.16. Definición de valores en el componente Type14a (Bañistas)

Figura 6.17. Definición de valores en el componente Type6-2 (Caldera ACS)

Figura 6.18. Definición de valores en el componente Type14h (Temperatura agua de red)

Figura 6.19. Definición de valores en el componente Type6 (Caldera piscina)

Figura 6.20. Definición de valores en el componente Type23 (Control PID caldera piscina)

Figura 6.21. Esquema de la instalación de la piscina climatizada con instalación solar térmica

Figura 6.22. Definición de valores en el componente Type1b (Captadores solares)

Figura 6.23. Definición de valores en el componente Type3b (Bombas circuitos primario y secundario)

Figura 6.24. Definición de valores en el componente Type5b (Bombas Intercambiador de calor)

Figura 7.1. Evolución de la temperatura del agua de la red (°C)

Figura 7.2. Evolución del número de bañistas un día tipo

Figura 7.3. Evolución del número de bañistas una semana tipo

Figura 7.4. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) durante la primera semana del año

Figura 7.5. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) al cabo del año

Figura 7.6. Detalle de los picos de potencia suministrada por la caldera del vaso de la piscina (kJ/h)

Figura 7.7. Evolución de la temperatura del vaso de la piscina al cabo del año

Figura 7.8. Detalle de la evolución de la temperatura del vaso de la piscina

Figura 7.9. Evolución de la temperatura del vaso de la piscina en el proceso de calentamiento

Figura 7.10. Evolución del funcionamiento de la caldera durante el proceso de calentamiento

Figura 7.11. Comparativa entre valores registrados y resultado del modelado en TRNSYS

Figura 7.12. Comparativa entre valores registrados y resultado del modelado en TRNSYS (kWh/año)

Figura 7.13. Comparativa de producción y consumo para distintos tamaños de instalación solar térmica

Figura 7.14. Aporte de energía solar en función del tamaño de la superficie de captación

Figura 7.15. Producción específica de energía en función del tamaño de la superficie de captación

Figura 7.16. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) durante la primera semana del año

Figura 7.17. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) al cabo del año

Figura 7.18. Detalle de los picos de potencia suministrada por la caldera del vaso de la piscina (kJ/h)

Figura 7.19. Evolución de la temperatura del vaso de la piscina al cabo del año

Figura 7.20. Detalle de la evolución de la temperatura del vaso de la piscina (época estival e invernal)

1. RESUMEN

Conocer el comportamiento energético del vaso de una piscina climatizada no es tarea fácil. En él se dan todas las formas de transferencia de calor de forma simultánea: conducción, convección y radiación además de evaporación y el efecto que producen los propios bañistas. Esta complejidad hace que exista un gran desconocimiento a la hora de dimensionar los sistemas de generación térmica en estas instalaciones, dejando muchas veces en manos de un indeseado sobredimensionado de las mismas su garantía de funcionamiento. Esta estrategia de dimensionado nunca es recomendable, ya que camina en sentido opuestos a las tendencias actuales de eficiencia energética.

En este trabajo se ha desarrollado un sistema de simulación dinámica para evaluar el comportamiento térmico del vaso de una piscina climatizada. Para ello se ha utilizado como base el programa de simulación de transitorios TRNSYS. El sistema permite evaluar la energía requerida para mantener la temperatura exigida en el agua del vaso (26°C en nuestro caso), hora a hora, durante todo el año o periodos de tiempo definidos. Los aspectos que se tienen en cuenta en el proceso de cálculo, y que pueden ser modificados, son los siguientes:

- Condiciones ambientales del lugar.
- Características térmicas de los cerramientos del edificio.
- Condiciones ambientales en el interior del edificio de la piscina.
- Características de la piscina: dimensiones, playa, temperatura, tasa de renovación del agua, etc.
- Cadencia del número de bañistas hora a hora.
- Temperatura del agua de la red de suministro.
- Características de las calderas (rendimiento, potencia y caudal).

El método ha sido validado contrastando los resultados obtenidos con los datos registrados en piscinas reales.

De esta forma se obtiene una potente herramienta de cálculo que permite conocer el funcionamiento de la piscina climatizada y conocer su demanda energética incluso en la etapa de diseño de la misma, facilitando sobremanera el correcto dimensionado de sus sistemas térmicos.

2. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, con el desarrollo de la sociedad del bienestar, se han implantado en los distintos municipios de la Región de Murcia una serie de instalaciones deportivas que incluyen piscinas climatizadas. Salvo casos excepcionales en los que el tamaño de la piscina es de 50x25 m (dimensiones para competiciones olímpicas), en la mayoría de los casos, las piscinas son de dimensiones semiolímpicas (25x12,5 m).

Estas instalaciones son muy intensivas en demanda energética. Su demanda se divide en dos fuentes de energía final principales:

- Energía eléctrica: para la alimentación de las deshumectadoras que mantienen constante la humedad existente en el aire ambiente, así como para los sistemas de iluminación, bombeos y otros pequeños equipos.
- Energía térmica: para mantener la temperatura del vaso que está permanentemente perdiendo calor con el entorno, para calentar el agua de aportación de la red en el proceso de renovación permanente del agua del vaso como lo requiere sanidad (mínimo 2,5% del volumen total cada día), y para la producción del agua caliente sanitaria utilizada en las duchas.

En el primer caso la fuente de energía está clara, y la eficiencia en este caso dependerá de los equipos consumidores y de su estrategia de funcionamiento.

Sin embargo, en el segundo caso, la demanda no sólo es muy alta (rondando los 800.000 kWh/año), sino que en la mayoría de los casos existe un desconocimiento a priori de la cantidad de energía que va a demandar la instalación y, por consiguiente, de su coste. Este hecho ha provocado que algunas de las piscinas climatizadas realizadas en la región hayan visto comprometida su viabilidad debido a los altos costes energéticos, y haya tenido que cesar su actividad.

A la hora de evaluar dicha demanda, se puede optar por el método tradicional, que evalúa las pérdidas, y que permite un dimensionado de la potencia térmica necesario, o bien se puede utilizar un método de simulación dinámica, que analiza el comportamiento de la instalación, hora a hora, durante el transcurso de un año completo.

El programa de simulación empleado en este trabajo es TRNSYS, creado por Universidad de Wisconsin (Madison, EE.UU.) para la simulación dinámica en estados transitorios. La adaptación del problema de las piscinas a este software ha requerido la programación de un módulo específico que analice el comportamiento térmico del vaso de una piscina, y que también ha sido objeto del presente trabajo.

3. CARACTERÍSTICAS DE LAS PISCINAS CLIMATIZADAS

La característica fundamental de una piscina, es sin duda sus dimensiones, que son las que determinan su capacidad de agua, y como consecuencia, el aforo del vaso, de tal manera que en los momentos de máxima concurrencia de bañistas se disponga como mínimo de 2 m² de lámina de agua por cada uno de ellos.

Las partes básicas de una piscina son las siguientes:

- **Vaso:** cubierta de fábrica recubierta de gres, gresite, pintura o prefabricada en poliéster, etc, que sirve de recipiente para el agua.
- **Playa:** zona exterior al vaso, que lo rodea, y donde los bañistas pueden reposar.
- **Sumidero de fondo:** desagüe situado en la parte más profunda del vaso de la piscina, el grupo motobomba aspira directamente de la piscina por él, y también sirve para un desagüe rápido.
- **Rebosadero:** canaleta alrededor de toda, o de parte del perímetro de la piscina, a donde desborda el agua de la piscina y por un colector va al vaso de compensación o depósito regulador.
- **Vaso de compensación:** almacena el agua que desborda por la canaleta del rebosadero, recibe el agua de renovación, el grupo de bombeo desde él aspira el agua para filtrarla y devolverla a la piscina.
- **Skimmer:** abertura de plástico, en los muros de la piscina y a la altura de la superficie del agua, para la aspiración por ellos, se conectan varios desde el grupo de bombeo. Se colocan en la piscina frente al viento dominante (en el caso de piscinas exteriores).
- **Toma para la barredera:** boquilla con tapa sumergida 15 cm bajo la superficie del agua para conectar en ella la manguera del limpiafondos manual, que envía el agua al equipo de filtración.
- **Grupo de bombeo:** formada por una o varias bombas, se encarga de recircular toda el agua de la piscina en un tiempo prefijado, aspirándola del fondo, de skimmer o vaso de compensación, reuniéndola en un colector, junto con la de la barredera, la impulsa hacia los filtros y después a la piscina.
- **Filtro:** recipiente metálico o poliéster y fibra de vidrio, lleno de material filtrante (filtrado activo), retiene las partículas flotantes en el agua. Una batería de 5 válvulas, o una válvula selectora, sirve para realizar las operaciones de filtrado, lavado y enjuague de filtro. Puede haber más de uno por piscina.
- **Contadores de agua:** uno mide el agua que entra cada día en la piscina, otro mide el agua que es recirculada cada día para saber si la instalación cumple los requisitos de renovación y recirculación que ordena Sanidad (piscinas públicas).

- **Impulsión:** conjunto de tuberías que se ramifican bajo el fondo de la piscina o en sus muros, devuelven el agua a la piscina filtrada y desinfectada. También pueden servir para conducir el agua de llenado de la piscina procedente de la red de aguas local.
- **Desinfección:** Método químico para el tratamiento y desinfección del agua.
- **Sistema de acondicionamiento térmico:** Representa toda la instalación térmica que es capaz, inicialmente de llevar la temperatura del agua de todo el vaso hasta la demandada para su actividad específica, y posteriormente de mantenerla estable en ese nivel térmico. Normalmente este sistema está compuesto por una o más calderas, intercambiadores de calor, bombas, etc.

Existe gran diversidad de piscinas, tanto en cuanto a su forma como al tipo de uso y ubicación. Según el Reglamento Técnico-Sanitario de Piscinas, de Murcia en su Artículo 7, clasifica las piscinas en:

- **Infantiles o de "chapoteo":** se destinan a usuarios menores de seis años. Su emplazamiento será independiente del de adultos y estará situado a una distancia mínima de metros de ellas; en las instalaciones existentes a la entrada del presente Decreto, estará separado de aquél por elementos constructivos u ornamentales adecuados, de forma que impida que los niños puedan acceder fácilmente a los otros vasos. Su funcionamiento será autónomo. Su profundidad máxima será de 0.40 m. y el suelo no ofrecerá pendientes superiores al 6%.
- **De recreo y polivalentes:** tendrán una profundidad mínima de un metro, que podrá ir aumentando progresivamente (con pendiente máxima del 6 % al 10 %) hasta llegar a 1,40 m., debiendo quedar señalizada esta profundidad y a partir de este punto podrá aumentar progresivamente hasta un límite máximo de tres metros.
- **Deportivas y de competición:** tendrán las características determinadas por los organismos correspondientes o las normas internacionales para la práctica del deporte.

Otra clasificación que se puede hacer es en función del método empleado para extraer el agua del vaso y proceder a su tratamiento termo-químico. Para ello existen dos sistemas bien diferenciados:

- **Piscina con skimmers o espumaderas:** La piscina típica es aquella en la que el agua contenida es depurada al ser aspirada en su superficie, empleando unos skimmers o espumaderas (figura 3.1), y el agua del fondo es aspirada por un sumidero en una proporción del 50% respectivamente. Este tipo de piscinas, son las que han predominado hasta estos últimos años en una proporción aproximada del 95%, debido ello a que son fáciles de construir y que es el sistema apto para todos los tipos constructivos de vaso (hormigón, liner, fibra de vidrio, etc.). Los inconvenientes de este tipo de piscinas, son relativos a su estructura y sistema de funcionamiento, ya que al tener que estar el nivel del agua a unos 10-15cms por debajo del nivel superior o playas, implica que cualquier tipo de suciedad caída al agua, si no es recogida en breve tiempo, se hundirá al fondo, generando acumulaciones de suciedad, que se traduce en gasto energético, de agua y de productos químicos para su tratamiento. También hemos de controlar el nivel del agua (si no se instala un nivelador automático), ya que el nivel

debe mantenerse siempre en la mitad de la abertura de los skimmers para que la piscina tenga un buen funcionamiento.

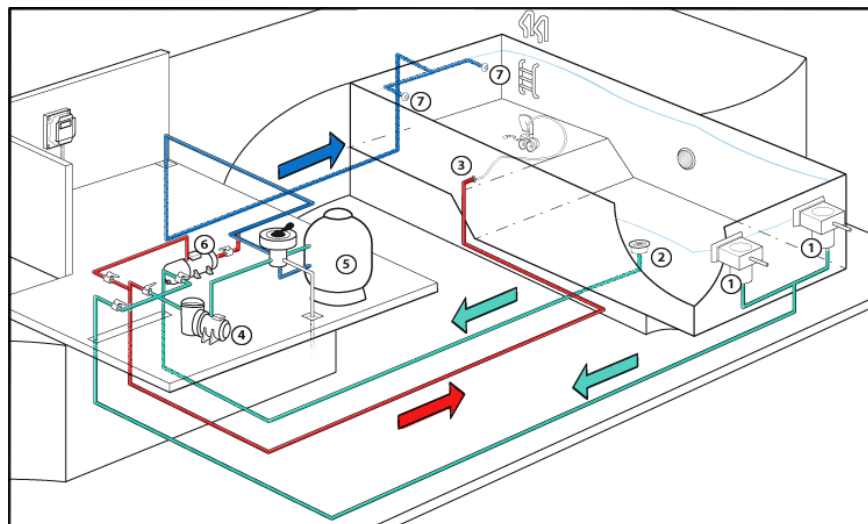


Figura 3.1. Esquema de funcionamiento de una piscina con skimmers. 1 Skimmer; 2 Sumidero; 3 Toma de limpieza; 4 Bomba de filtración; 5 Filtro; 6 Bomba de sobrepresión (opcional); 7 Boquillas de impulsión

- **Piscinas desbordantes con canal perimetral:** Si tenemos un recipiente con agua hasta el borde, y le ingresamos más agua, inevitablemente se desborda. En una piscina, el agua que se desborda se canaliza hacia el sistema de filtrado que nuevamente lo envía hacia la piscina, comenzando el ciclo nuevamente. Las piscinas desarrolladas para funcionar con lo que llamamos desborde finlandés ó sistema desbordante, se caracterizan porque la suciedad se retira de la lámina de agua sin contaminar el volumen ni mucho menos llegar al fondo. La recogida del agua se realiza a través de un canal perimetral que permite que esa agua pase de nuevo al sistema de filtrado. El Sistema de Filtrado se puede programar de forma tal que funcione en cortos lapsos (15 minutos) varias veces al día, asegurando agua perfectamente limpia. Permiten controlar absolutamente todo y no solamente liberarlo de las tareas de mantenimiento, sino que se racionalizan los consumos a lo que estrictamente necesita la piscina (figura 3.2). Resumiendo, las piscinas desbordantes, requieren de un equipo de filtración de gran tamaño (a veces hasta el doble que el de una piscina de similar tamaño con Skimmers). Pero cuentan con la ventaja de que el entretenimiento para la limpieza de fondos es muy bajo si los impulsores se colocan en el fondo, y la calidad del agua obtenida es muy superior. También requieren de un cuidadoso estudio de la hidráulica, para evitar que las bonanzas del sistema no sean deficientes.

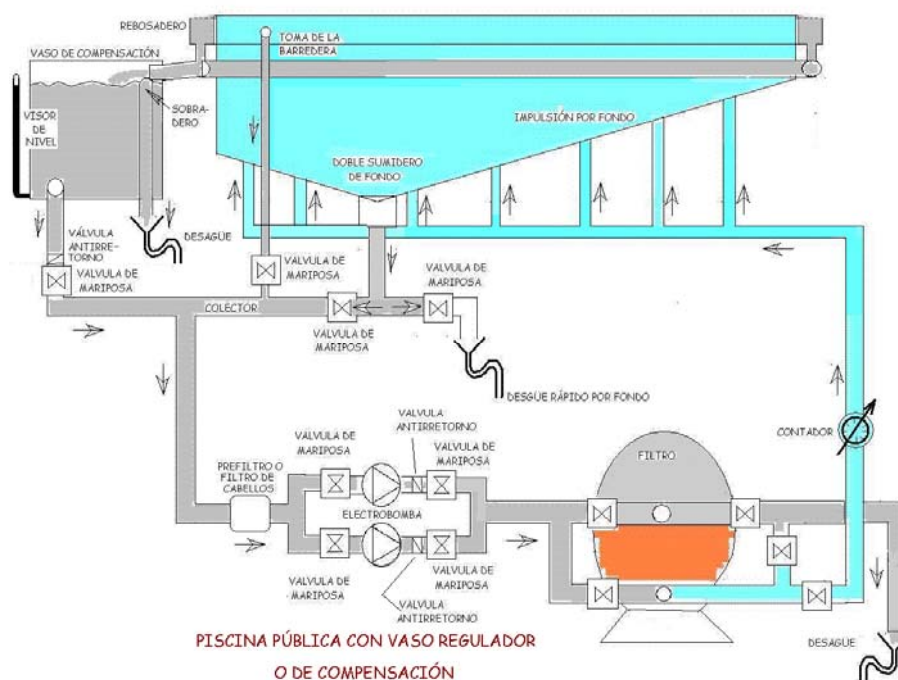


Figura 3.2. Esquema de la instalación en una piscina desbordante con canal perimetral

En las piscinas privadas el diseño de la piscina se determina en función al espacio disponible y a su integración en el entorno. Es importante tener en cuenta la topografía del terreno, vegetación y armonía del paisaje, además, como es natural, del gusto del propietario.

Las piscinas pueden diseñarse de las formas más variadas, siempre y cuando no existan recodos, ángulos y obstáculos que dificulten la circulación del agua, y su limpieza, la vigilancia de la lámina o puedan resultar peligrosos para los usuarios.

Para centrarnos en el tema se puede hacer la siguiente clasificación en función de su forma:

- **Regular:** cuadrada, rectangular, redonda, ovalada, etc
- **Irregular**

No existe ninguna forma que sea mejor que otra, todo depende del uso concreto que se quiera dar. Debemos puntualizar que el tamaño de una piscina se refiere a sus dimensiones, es decir, a su perímetro visible, y en cuanto el volumen consiste en el cubaje que la piscina puede albergar.

En las piscinas públicas, no existen normas sobre el tamaño de las piscinas salvo las establecidas por los organismos de competición nacionales e internacionales de natación y de saltos (Federación, Consejo Superior de Deportes, Comité Olímpico Internacional).

Con relación a las piscinas públicas las dimensiones dependerán del aforo, del número máximo de usuarios potenciales de la misma, aunque nunca puedan coincidir todos ellos

simultáneamente en el baño. Puede considerarse al respecto un coeficiente de 0,3 entre el aforo y el máximo de bañistas simultáneos.

En cuanto a la profundidad de la piscina, en primer lugar hay que indicar que para la práctica de la natación no es necesaria una excesiva profundidad, bastará situarla entre 1 y 1,5 m, pero esto dependerá del tipo de fondo que tenga la piscina. Para piscinas de fondo uniforme, es decir, constante la profundidad media aconsejable está situada entre 1,50 y 1,60 m con lo cual en todo momento se puede "hacer pie". Otro tipo de fondo es el llamado "fondo de rampa" que se inicia en el 0,5 m hasta llegar a los 1,80 ó 2 m en la zona de máxima profundidad.

El llamado "fondo de cuchara" es parecido al anterior pero con mayor ángulo de inclinación, existiendo en la mitad de su recorrido un escalón que hace decaer súbitamente la profundidad.

A continuación se presentan unas orientaciones en función al tipo de piscina:

- **Piscinas de chapoteo:** La profundidad máxima del vaso será de 30 cm y la pendiente superficial del fondo no superará el 6 % en ninguna de las líneas rectas que puedan apoyarse en el.
- **Piscinas de recreo:** Entre 1 m y 1,40 m en la zona profunda, medida suficiente para la natación de adultos. Mayor profundidad no aporta ventajas e incrementa costes.
- **Piscinas de competición:** Se aplicará lo dispuesto por los organismos rectores deportivos o normas internacionales.
- **Piscinas de foso:** La profundidad en la vertical del borde de las palancas será la siguiente, según la altura de las mismas:

Altura de la palanca vertical ó trampolín	Profundidad en vertical desde el borde
0,50 m	2,20 m
1,00 m	3,00 m
3,00 m	3,50 m
5,00 m	3,80 m
6,50 m	4,00 m
7,50 m	4,20 m
10,00 m	4,50 m

Figura 3.3. Profundidad de las piscinas para uso de salto

- **Piscinas polivalentes:** El nivel irá aumentando desde 1 a 1,40 m en la zona de aguas someras. Luego aumentará más rápidamente hasta un máximo de 2,20 m en vasos con salto mínimo o la profundidad necesaria, según la tabla anterior, para permitir saltos desde la altura que se proyecte.

Para el fondo del vaso se aplicará lo dispuesto en cada normativa vigente, por regla general disponen que tendrá una pendiente mínima del 2 % y máxima del 10 % en profundidades menores de 1,60 m. En ningún caso las pendientes podrán ser superiores al 35 %. El cambio de nivel, pendiente deberá estar debidamente señalizado para el usuario, así como las profundidades existentes en todos los tramos.

3.1. NORMATIVA DE APLICACIÓN

La normativa de aplicación para el caso de las piscinas climatizadas son, fundamentalmente, los siguientes:

- Normativa sobre Instalaciones Deportivas y de Esparcimiento (NIDE). Normas reglamentarias y norma de proyecto.
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE-2007). RD 1027/2007.
- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico sobre Ahorro de Energía. Contribución Solar Mínima. CTE-DB-HE4.
- Reglamento sobre condiciones higiénico-sanitarias de las piscinas de uso colectivo de la Región de Murcia. Decreto 58/1992.

3.1.1. NORMATIVA NIDE

La normativa sobre Instalaciones Deportivas y de Esparcimiento (NIDE) es la norma básica sobre la que hay que partir a la hora de diseñar una piscina que posteriormente pueda ser utilizada para entrenamiento o competición en las distintas especialidades representadas por la Real Federación Española de Natación, y que son las siguientes:

- Natación
- Natación sincronizada
- Saltos
- Water-polo
- Piscinas de Chapoteo
- Piscinas de Enseñanza
- Piscinas Polivalentes
- Piscinas de Recreo

Esta norma define aspectos relacionados con la forma y dimensiones del vaso, las playas o andenes, nivel de iluminación e incluso características térmicas del agua. En este sentido, determina los siguientes valores de temperatura:

- Los vasos para uso deportivo de natación, natación sincronizada, waterpolo y saltos, tendrán el agua a una temperatura de $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (Real Federación Española de Natación)
- Los vasos polivalentes tendrán el agua a una temperatura de $26^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Los vasos de recreo tendrán el agua a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Los vasos de enseñanza tendrán el agua a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, no obstante es recomendable que pueda llegar a 28°C
- Los vasos de chapoteo tendrán el agua a una temperatura de $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, no obstante es recomendable que pueda llegar a 28°C

- Los vasos especiales tendrán la temperatura adecuada a su finalidad.

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS	VASOS DE NATACION						
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
Longitud (m)	25,00	25,00	25,00	25,00	50,00	50,00	50,00
Anchura (m)	12,50	16,50	21,00	25,00	16,50	21,00	25,00
Profundidad mínima (m)	1,80 2,00 ^(*)	1,80 2,00 ^(*)	1,80 2,00 ^(*)	2,00	1,80 2,00 ^(*)	1,80 2,00 ^(*)	2,00
Profundidad máxima (m) ^(*)	2,25	2,25	2,25	2,25	2,50	2,50	2,50
Nº calles	6	8	8	8	6	8	8
Ancho calles (m)	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Bandas exteriores (m)	2 x 0,25		2 x 0,50	2 x 2,50	2 x 0,75	2 x 0,50	2 x 2,50
Nivel	Entrenamiento Competiciones Locales y Regionales		Competiciones Nacionales (R.F.E.N.)	Campeonatos del Mundo (25 m)	Entrenamiento	Competiciones Nacionales (R.F.E.N.)	Campeonatos del Mundo, JJ. OO.

^(*) valor recomendado

Figura 3.4. Dimensiones de las piscinas según normativa NIDE

Por otro lado, también establece que el aire ambiente de toda piscina cubierta que incluya un vaso de natación, debe estar constantemente a una temperatura entre 2°C y 3°C superior a la del agua de dicho vaso, por razones técnicas y fisiológicas, con un máximo de 28°C.

La humedad relativa debe estar comprendida entre el 55% y 70% siendo recomendable utilizar como valor de diseño el 60%. El mantenimiento de la humedad relativa del ambiente dentro de los límites indicados puede lograrse por medio de una bomba de calor, enfriando, deshumedeciendo y calentando el aire al mismo tiempo. En el sistema de ventilación se dispondrán recuperadores del calor del aire expulsado.

El uso de energías convencionales para estos fines debe restringirse a suplementar el calor necesario para el aire mínimo de ventilación y las pérdidas por transmisión. El uso de recuperadores o bombas de calor es obligatorio para piscinas cubiertas de capacidad mayor de 80 m³ o cuya superficie de lamina de agua sea mayor de 50 m² (esto según RITE).

3.1.2. REGLAMENTO DE INSTALACIONES TÉRMICAS EN EDIFICIOS

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) está publicado por el Real Decreto 1027/2007 y sus modificaciones correspondientes a los reales decretos 1826/2009 y 238/2013.

El RITE determina que la temperatura del agua de una piscina, salvo las de usos terapéuticos, se mantendrá entre 24 y 30 °C. La temperatura a mantener debería variar con el uso, es decir, con la actividad metabólica de los bañistas. Para actividades deportivas de entrenamiento y competición, el agua debería estar entre 24 y 25 °C y uno o dos grados más para actividades de recreo, enseñanza y chapoteo.

En piscinas privadas debería mantenerse una temperatura de 26 a 27 °C, aunque, con frecuencia, se pida mantener una temperatura de hasta 30 °C. La tolerancia de temperatura en el espacio, horizontal y verticalmente, no debe ser mayor que $\pm 1,5$ °C.

Con el fin de evitar el desagradable efecto de la estratificación de temperatura, el agua caliente debe inyectarse en la piscina desde la parte baja de las paredes de la misma, o desde el fondo.

Se recuerda que, con sistemas de depuración por skimmers, las boquillas de impulsión del agua tratada se sitúan cerca de la superficie, de tal manera que se haga un barrido de la lámina de agua, con el fin de arrastrar las impurezas superficiales hacia los. Por tanto, la red de distribución de agua caliente debe ser independiente de la de tratamiento sanitario (filtración y tratamientos químicos o físicos).

El RITE también menciona que la temperatura del aire de las piscinas cubiertas debe ser de 2 a 3°C mayor que la del agua, para compensar el efecto de enfriamiento que provoca la evaporación del agua de un cuerpo mojado, con un mínimo de 26 °C y un máximo de 28 a 29 °C. Por tanto, es evidente que estas condiciones son incompatibles con temperaturas del agua mayores que 27 °C.

Condiciones interiores de 30 °C o más con el 60% de humedad relativa son inaceptables desde el punto de vista del bienestar e, incluso, sanitario.

La humedad relativa se mantendrá por debajo del 60 al 65%, con el fin de evitar condensaciones sobre las paredes en contacto con el exterior.

El RITE indica, en el apartado 1.1.4.2.2, la calidad mínima de aire a mantener en diferentes tipos de recinto:

IDA 2 Oficinas, residencias (estudiantes y ancianos), locales comunes de edificios hoteleros, salas de lecturas, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y similares, piscinas y similares

Para piscinas climatizadas indica un caudal mínimo de aire de ventilación igual a 2,5 l/s por m² de superficie de la lámina de agua y de la playa, al que se debe añadir, en su caso, el caudal necesario para controlar la humedad relativa. Las piscinas deberán mantenerse en depresión, con respecto a los locales contiguos, entre 20 y 40 Pa.

Las piscinas se ponen en temperatura al comienzo de la temporada; la puesta en marcha puede durar hasta tres días. Esto es importante porque determina la potencia de la caldera a instalar. Como posteriormente se verá a lo largo de este trabajo, la potencia requerida para mantener las condiciones térmicas del vaso es relativamente pequeña, pero incompatible con esta condición de calentar el vaso en no más de tres días.

Durante toda la temporada, tanto la temperatura del agua como, en su caso, la del ambiente deben mantenerse constantes, debido a la gran inercia térmica de todo el sistema.

Cuando la piscina esté a régimen pero no esté en uso, la lámina de agua estará protegida con una barrera térmica (manta térmica). Esta obligación debe entenderse para piscinas cubiertas, para las que se permite el uso de energías convencionales, y es muy recomendable también para las piscinas al aire libre, aún cuando para su calentamiento se deban emplear solamente energías renovables o residuales.



Figura 3.5. Imágenes de manta térmica para piscinas

El circuito de distribución de calor para el calentamiento del agua y la climatización de la piscina debe ser independiente de otras instalaciones térmicas.

Para el calentamiento del agua de piscinas al aire libre sólo podrán emplearse fuentes de energía renovables (energía solar o biomasa). Está terminantemente prohibido el uso de energía convencional, aunque sea con un equipo bomba de calor.

3.1.3. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico sobre Ahorro de Energía. Contribución Solar Mínima. CTE-DB-HE4.

Para piscinas cubiertas, el CTE, en la sección HE 4, exige una contribución solar mínima del 30 hasta el 70%, según la zona climática (de I a V).

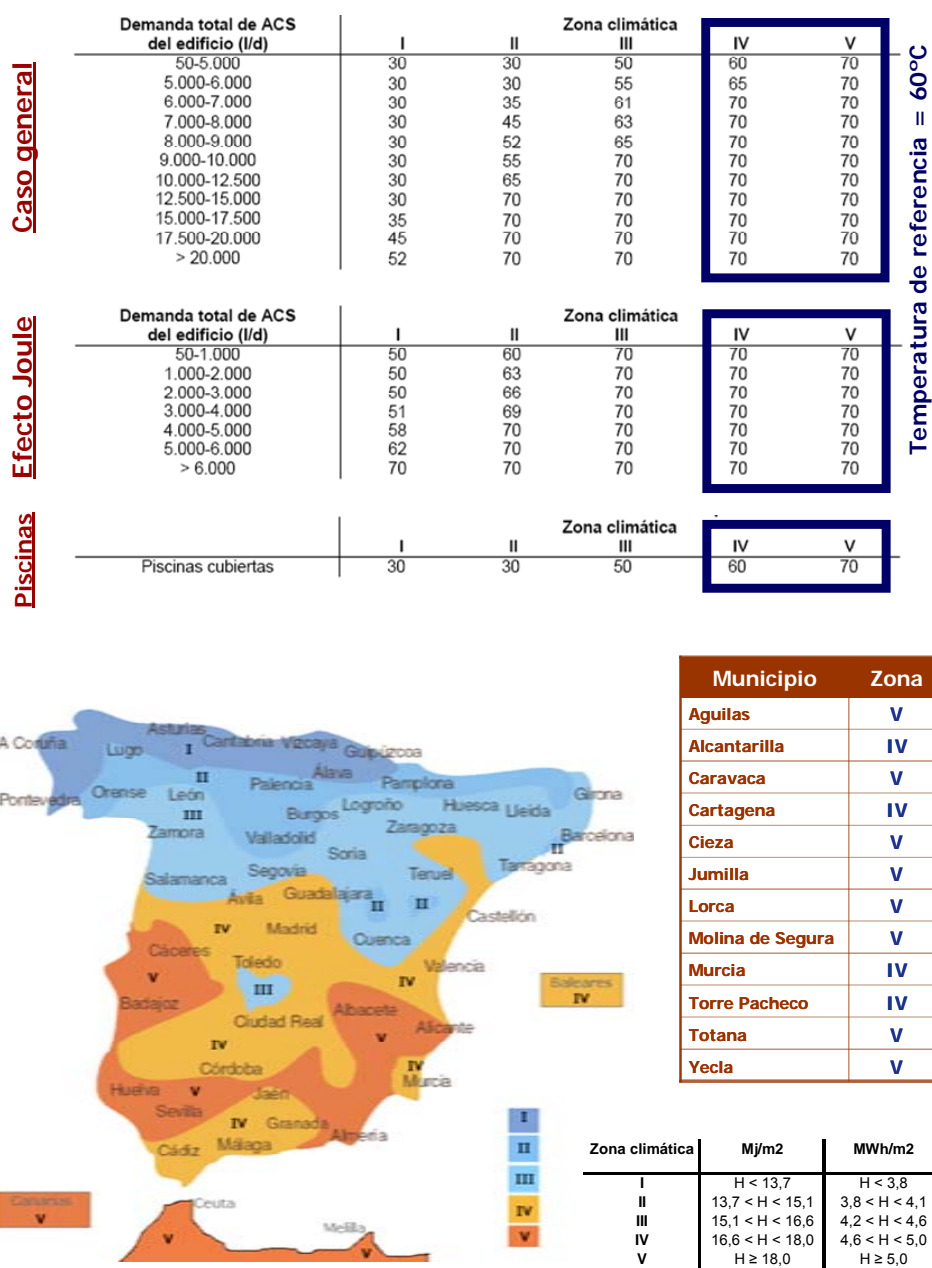


Figura 3.6. Requerimientos mínimos de aporte con energía solar para el calentamiento de piscinas, según CTE-HE4

El documento determina también los casos en los que está justificado no alcanzar los niveles de aporte solar solicitados. En tal caso, el promotor deberá diseñar sistemas de eficiencia energética o apoyo con otras energías renovables que compensen esa reducción de aporte solar. Estos casos son:

- cuando se cubra ese aporte energético de agua caliente sanitaria mediante el aprovechamiento de energías renovables, procesos de cogeneración o fuentes de energía residuales;
- cuando el cumplimiento de este nivel de producción suponga sobrepasar los criterios de cálculo que marca la normativa de aplicación;
- cuando el emplazamiento no cuente con suficiente acceso al sol;
- en rehabilitación de edificios, cuando existan limitaciones no subsanables derivadas de la configuración previa del edificio;
- en edificios de nueva planta, cuando existan limitaciones no subsanables derivadas de la normativa urbanística aplicable;
- cuando así lo determine el órgano competente que deba dictaminar en materia de protección histórico-artística.

3.1.4. REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES HIGIÉNICO-SANITARIAS

Reglamento sobre condiciones higiénico-sanitarias de las piscinas de uso colectivo de la Región de Murcia. Decreto 58/1992, que modifica el RD 52/1989.

Este reglamento determina que las piscinas cubiertas dispondrán de las instalaciones necesarias que aseguren la renovación constante de aire en el recinto, manteniendo una humedad relativa media del aire comprendida entre 65% y 75%. En estas piscinas, el agua de los vasos tendrá una temperatura que estará comprendida entre 24 y 30°C, y la temperatura ambiente será sensiblemente similar a la del agua, tolerándose desviaciones de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

El agua de abastecimiento de los vasos tendrá que proceder preferentemente de la red de distribución de agua potable. En el caso de que el agua tuviera otra procedencia, su utilización requerirá, necesariamente, la autorización de la Dirección General de Salud. El aporte de agua nueva será realizado una vez al día como mínimo, en una cantidad de al menos un 2,5% de su capacidad. Esto supone que cada 40 días, la suma de las aportaciones diarias de agua nueva no podrá ser inferior al volumen de agua del vaso.

4. BALANCE ENERGÉTICO EN UNA PISCINA CLIMATIZADA

En general en una piscina cubierta el agua y el aire interior se enfrían y debemos calentarlos para garantizar unas condiciones satisfactorias de confort en el interior. El aire se enfría fundamentalmente por el proceso de deshumectación: es necesario mantener su humedad relativa en los términos que marca la legislación, pero siempre hay un aporte de humedad por el agua evaporada del vaso de la piscina. El proceso de deshumectación consiste en hacer pasar un cierto caudal del aire interior a través de una batería fría, lo que hace condensar parte de su humedad, a la vez que el aire se enfría. Por este motivo es necesario volverlo a calentar para devolverlo a la temperatura ambiente. Además, dado que el RITE exige que exista una renovación continua de parte de este aire, en la época invernal también será necesario calentar el aire que entra desde el exterior.

En cuanto al agua del vaso de la piscina, podemos encontrar diversas razones por las que el agua pierde calor y es necesario calentarla de forma permanente:

- Por la evaporación del agua de la piscina
- Por las pérdidas por transmisión de calor
- Por la renovación continua del agua que exige la normativa

En este capítulo se va a realizar una evaluación pormenorizada de estas pérdidas con el fin de evaluar la demanda energética del vaso de la piscina.

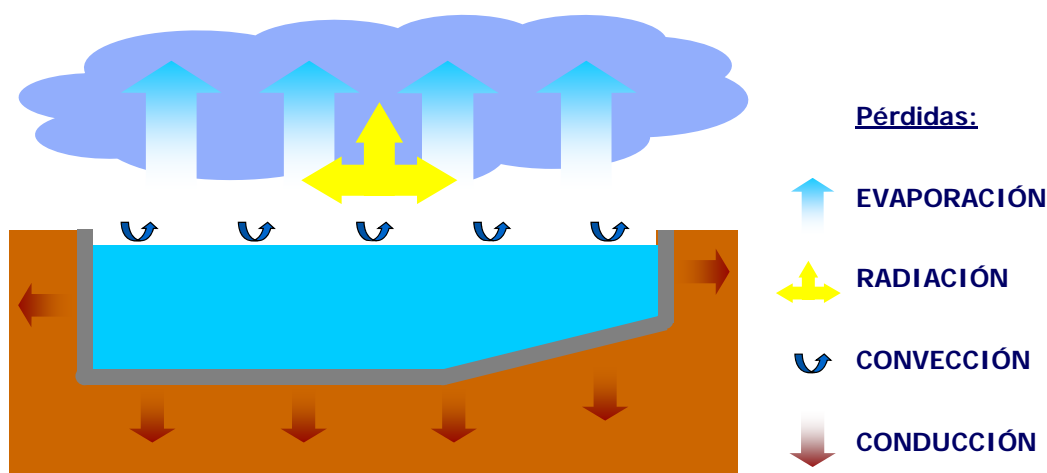


Figura 4.1. Resumen de las pérdidas de calor en el vaso de una piscina

4.1. PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN DEL AGUA DE LA PISCINA

El agua del vaso de la piscina se evapora, pasando al aire ambiente, desde tres superficies distintas:

- Desde la lámina de agua del propio vaso de la piscina
- Desde el suelo mojado de las playas (superficie que circunda el vaso de la piscina)
- Desde el cuerpo de los bañistas recién salidos del agua (por evaporación y arrastre)

La denominada "playa mojada" alrededor de la piscina se forma como consecuencia del arrastre de agua por parte de los bañistas que salen del vaso y de las salpicaduras provocadas por los que se están bañando. Su superficie estimada es proporcional al número de bañistas.

Para su evaluación se va a utilizar el método definido por ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers). Este método se apoya en una ecuación empírica definida por Carrier en 1918.

Inicialmente es necesario conocer las cantidades de agua que se evaporan a través de los tres mecanismos mencionados anteriormente. En el caso del agua evaporada desde la superficie del agua de la piscina:

$$\dot{m}_w = \omega \cdot \frac{P_w - P_{ro}}{r_w} \cdot S_w$$

Donde:

$$\omega = \frac{88,75 + 78,15 \cdot V}{1000}$$

En piscinas interiores, la velocidad del aire suele fijarse en 0,2 m/s. El agua evaporada desde el suelo mojado alrededor de la piscina (playa mojada):

$$\dot{m}_s = \omega \cdot \frac{P_s - P_{ro}}{r_s} \cdot S_s$$

El agua evaporada desde la superficie del cuerpo de los bañistas:

$$\dot{m}_p = \omega \cdot \frac{P_{35} - P_{ro}}{r_{35}} \cdot S_p$$

De forma que las pérdidas totales de agua por evaporación son la suma de las tres anteriores:

$$\dot{m} = \dot{m}_w + \dot{m}_s + \dot{m}_p$$

Todos los gastos máxicos se encuentran en kg/s. Las presiones parciales de vapor pueden ser calculadas a partir de la siguiente expresión:

$$p = \frac{HR}{100} \cdot \exp\left(-\frac{5800,2206}{T_{BS}} + 1,3914993 - 0,04860239 \cdot T_{BS} + 4,1764768 \cdot 10^{-5} \cdot T_{BS}^2 - 1,4452093 \cdot 10^{-8} \cdot T_{BS}^3 + 6,5459673 \cdot \ln(T_{BS})\right)$$

Para determinar el calor latente de vaporización del agua, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$r = 347 \cdot (374,15 - t)^{1/3} - 2$$

Y el punto de rocío del aire ambiente se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$t_{RO} = 1,1689 \cdot (\ln(p))^2 - 1,8726 \cdot \ln(p) - 35,957$$

4.2. PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN DE CALOR

Durante el funcionamiento de la piscina, el agua pierde calor debido también a la transmisión de calor entre ésta y el ambiente o las paredes del vaso. Estas pérdidas, expresadas todas ellas en kW, las podemos calcular mediante las siguientes expresiones:

- Pérdidas por la evaporación del agua: La evaporación del agua produce dos tipos de pérdidas: el efecto de refrigeración sobre el vaso que produce la propia evaporación del agua, y el calentamiento del agua de reposición para compensar esa pérdida de fluido en el vaso:

$$P_{ev} = \frac{\dot{m}}{1000} [r + 4,186 \cdot (t_{wm} - t_{wa})]$$

Donde t_{wm} y t_{wa} representan, respectivamente, la temperatura media del agua en la piscina y la temperatura del agua de renovación (temperatura del agua de la red).

- Pérdidas por convección de la lámina de agua hacia el aire del ambiente: Se trata del intercambio de calor del vaso con el aire ambiente.

$$P_{cv} = 0,003181 \cdot V^{0,8} \cdot (t_{ws} - t_{BS}) \cdot S_w$$

Donde t_{ws} es la temperatura superficial del agua de la piscina, y t_{BS} es la temperatura de bulbo seco del aire ambiente.

- Pérdidas por radiación de la superficie de la lámina de agua hacia los cerramientos del recinto.

$$P_{rad} = 0,00567 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{t_{ws} + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{RM} + 273,15}{100} \right)^4 \right] \cdot S_w$$

Donde t_{RM} es la temperatura radiante media de los cerramientos del local, y ε emitancia media de la lámina de agua (estimada en 0,87).

- Pérdidas por conducción a través de las paredes del vaso de la piscina que, eventualmente, pueden estar en contacto con el aire. En el caso de que el vaso de la piscina esté excavado sobre el suelo, sus paredes no estarían en contacto con el aire y estas pérdidas serían despreciables.

$$P_{cond} = k \cdot \frac{t_{wm} - t_{BS}}{1000} \cdot S_p$$

La potencia necesaria para suplir estas pérdidas será la suma de ellas:

$$P = P_{ev} + P_{cv} + P_{rad} + P_{cond}$$

4.3. PÉRDIDAS POR RENOVACIÓN DEL AGUA DE LA PISCINA

El órgano competente en materia de condiciones higiénico-sanitarias se encargará de verificar el cumplimiento de la constante renovación del agua del vaso de la piscina (ver apartado 3.1.4). Esta agua retirada será repuesta por agua proveniente de la red de abastecimiento, y por lo tanto a una temperatura inferior a la del vaso. Este hecho representará una pérdida en sí misma que hay que tener en cuenta en el balance energético del vaso.

En este sentido, se ha supuesto que el proceso de renovación del agua se realiza de forma continua a lo largo de todo el día, mediante el vaciado de la parte correspondiente hora a hora. Este modo se asemeja bastante a lo que ocurre en la realidad en el procedimiento de operación de la piscina.

De esta forma, se puede estimar la pérdida de temperatura en el vaso por efecto de esta renovación, cada lapso de tiempo, mediante la siguiente expresión:

$$(M - \dot{m}_{renov} \cdot t) \cdot t_{wm} + \dot{m}_{renov} \cdot t \cdot t_{wa} = M \cdot t_f$$

Siendo M la masa del agua contenida en el vaso de la piscina; \dot{m}_{renov} el gasto másico de agua extraída del vaso para cumplir con el porcentaje de renovación diaria requerida.; t_f temperatura al final del lapso de tiempo del vaso de la piscina; y t el lapso de tiempo.

4.4. BALANCE ENERGÉTICO EN EL VASO DE LA PISCINA

Las pérdidas analizadas en los apartados anteriores serán compensadas mediante el aporte energético de una caldera, de manera que en cada instante se puede determinar la temperatura del agua del vaso mediante la siguiente expresión:

$$(M - \dot{m}_{cald} \cdot \dot{t}) \cdot t_i + \dot{m}_{cald} \cdot \dot{t} \cdot t_{cald} = M \cdot t_f$$

Siendo M la masa del agua contenida en el vaso de la piscina; \dot{m}_{cald} el gasto másico de agua caliente aportada desde la caldera; t_i la temperatura inicial en un lapso de tiempo del vaso de la piscina; t_f temperatura al final del lapso de tiempo del vaso de la piscina; y t el lapso de tiempo.

5. MODELADO DEL SISTEMA

5.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, es fundamental que los diseñadores de instalaciones y equipos termoenergéticos tengan a su disposición de herramientas potentes y fiables para el cálculo y optimización de sistemas. El avance en los últimos años de la potencia de cálculo de los ordenadores y de los métodos numéricos hacen posible la resolución de problemas en otras épocas inabordables.

Los sistemas termoenergéticos se caracterizan por exhibir una dependencia no lineal con las características meteorológicas. El uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y de simulaciones transitorias constituye el complemento ideal a la siempre necesaria experimentación. El análisis de sistemas altamente complejos como pueda ser una instalación solar térmica completa para un edificio de viviendas puede realizarse de manera rápida con un software de simulación dinámica como TRNSYS. La simulación dinámica es órdenes de magnitud más rápida y órdenes de magnitud más económica que la experimentación, en la que pequeños cambios en el sistema pueden significar costes de tiempo y económicos elevados.

Con la potencia de cálculo de los ordenadores actuales, el estudio de sistemas complejos con la simulación detallada vía técnicas de discretización finitas es altamente costoso en tiempo y requiere el uso de computadoras de última generación, mientras que una simulación dinámica al nivel de TRNSYS puede realizarse en ordenadores personales. El análisis al detalle que permiten las técnicas CFD, aunque útil y necesario para ciertos problemas, no tiene mucho sentido cuando se pretende el análisis de sistemas completos donde hay un número grande de parámetros.

5.2. MODELADO CON TRNSYS

La primera versión pública de TRNSYS data del año 1975, y es un programa originalmente desarrollado para el estudio de sistemas con energía solar, aunque en la actualidad es una potente herramienta que permite la resolución transitoria de cualquier tipo de sistema.

Este programa además permite la descripción de edificios a través del módulo TRNbuild. Se ejemplifican aquellos aspectos básicos de TRNSYS con casos que se relacionan con la eficiencia energética y el uso de las energías renovables, especialmente la energía solar térmica.

5.2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE TRNSYS

TRNSYS es un *solver* de ecuaciones algebraicas y diferenciales que incorpora una librería con los más comunes sistemas termoenergéticos y diseñado especialmente para simulaciones transitorias.

TRNSYS adopta una estructura modular para la resolución de sistemas de componentes, donde cada uno de los componentes se describe mediante una subrutina que en la nomenclatura que utiliza TRNSYS recibe el nombre de **TYPE**. Esta técnica modular permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos. Desde un punto de vista práctico, es abordar la resolución de pequeños problemas en vez de un gran problema. Cada *type* o subrutina contiene el modelo de un componente del sistema.

Por ejemplo, la subrutina *Type 201*, es un modelo detallado para realizar el balance energético del vaso de la piscina, de acuerdo con los cálculos detallados en el apartado 4. Especificando los parámetros (valores independientes del tiempo) y las variables de entrada y salida (valores dependientes del tiempo), el modelo calcula las variables de salida dependientes del tiempo. Estos valores de salida calculados pueden ser usados como variables de entrada para otros modelos.

La librería standard de TRNSYS incluye la mayoría de componentes comúnmente encontrados en los sistemas termoenergéticos (desde equipamientos HVAC hasta edificios en forma detallada, desde controladores y sistemas de regulación hasta colectores solares), así como subrutinas de componentes que permiten tratar datos meteorológicos y otras funciones de carácter transitorio. TRNSYS también dispone de subrutinas que permiten el tratamiento y dar formato de salida a los resultados de las simulaciones. El usuario debe crear para simular un sistema un fichero de entrada para el ejecutable de TRNSYS que consiste en una descripción de los componentes que constituyen el sistema y sus interconexiones. El ejecutable de TRNSYS resuelve los componentes del sistema e itera para cada instante de tiempo hasta que el sistema de ecuaciones converge.

Las simulaciones son de carácter transitorio y pueden realizarse en los rangos de espacios de tiempo especificados por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado. La modularidad del programa permite al usuario tener tantos elementos, (bombas, refrigeradores, colectores solares, etc.), como sea necesario, en cualquier configuración.

Ya que los modelos de los componentes están escritos en FORTRAN, el usuario puede fácilmente modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería standard.

Existe una librería de componentes de libre acceso cuyos códigos fuentes los autores ponen al servicio de la comunidad científica. También existen librerías de componentes que comercializan los distribuidores de TRNSYS, desde bombas de calor y sistemas geotérmicos hasta modelos detallados de colectores solares, controladores o piscinas.

Pero TRNSYS no es simple y llanamente un solver de ecuaciones. El paquete completo de TRNSYS incluye además de los códigos fuente de las subrutinas y el programa ejecutable, de la misma forma que permite la edición de ficheros e incorpora en un solo programa las acciones necesarias para construir, ejecutar y analizar una simulación en TRNSYS.

A diferencia de muchas herramientas de simulación presentes en el mercado hoy en día, TRNSYS permite al usuario describir completamente y visualizar todas las interacciones entre componentes del sistema. Mediante una interface basada en iconos gráficos, el usuario directamente define los componentes de su sistema y los conecta.

Mediante esta interfaz gráfica tiene la capacidad de definir los parámetros y variables de entrada de cada uno de los componentes del sistema y de crear el fichero de entrada para que el ejecutable TRNSYS pueda realizar la simulación. Se han desarrollado dos plataformas gráficas para la creación de los esquemas de sistemas.

Una plataforma, desarrollada en el Solar Energy Research Center de Suecia, responde al nombre de PRESIM. La otra plataforma, que responde al nombre de SIMULATION STUDIO, ha sido desarrollada en Francia por el Centre Scientifique et Technique du Bâtiment y corresponde con la utilizada en las simulaciones de este proyecto. Ambas plataformas realizan funciones similares y responden a la necesidad de tener una herramienta visual para la creación de sistemas complejos. Ambas utilizan el mismo código fuente e incluyen las mismas utilidades y la pantalla de visualización de resultados On-line.

5.2.2. DEFINICIÓN DE SISTEMAS EN TRNSYS

Para realizar la simulación de un sistema solar en TRNSYS con componentes de la librería standard, podemos imaginarnos las subrutinas o types de TRNSYS como cajas negras que necesitan dos tipos de información para funcionar: los parámetros del componente en sí y las variables de entrada. Algunas de las variables de entrada de un componente pueden ser variables de salida de otro componente del sistema. Por tanto, también se deben definir las conexiones entre variables de salida de un componente y variables de entrada de otro componente.

5.2.3. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS

En TRNSYS, los edificios se tratan como cualquier otro componente: requieren una serie de parámetros y variables de entrada con el objetivo de calcular las variables de salida. Sin embargo, existen varios modelos que difieren en su complejidad.

El más sencillo es un modelo que define una simple capacitancia térmica del edificio para poder realizar cálculos sencillos de calentamiento y refrigeración. El modelo más complejo es el modelo multi-zona que se define en el Type 56 de TRNSYS.

El modelo multi-zona dispone de un preprocesador para usar introducir las características del edificio. En TRNbuild, el usuario crea un edificio especificando las zonas térmicas que componen el edificio y describe los atributos de cada zona, las interacciones entre zonas, perfiles de ocupación, ganancias internas, sistemas de refrigeración y calefacción, etc. Una interface de windows guía al usuario en la creación de nuevos edificios y permite escoger entre bases de datos el tipo de materiales, tipos de cerramientos, ventanas, etc. Este modelo es extremadamente versátil y ha sido ampliamente testado y comparado con otros programas de simulación de edificios con buenos resultados.

5.2.4. CREACIÓN DE UN NUEVO COMPONENTE

En el menú principal de TRNSYS se pinchará sobre *File* → *New* y dentro del cuadro de diálogo que aparece, se elegirá la opción *New Component*, como puede observarse en la Figura 5.1.

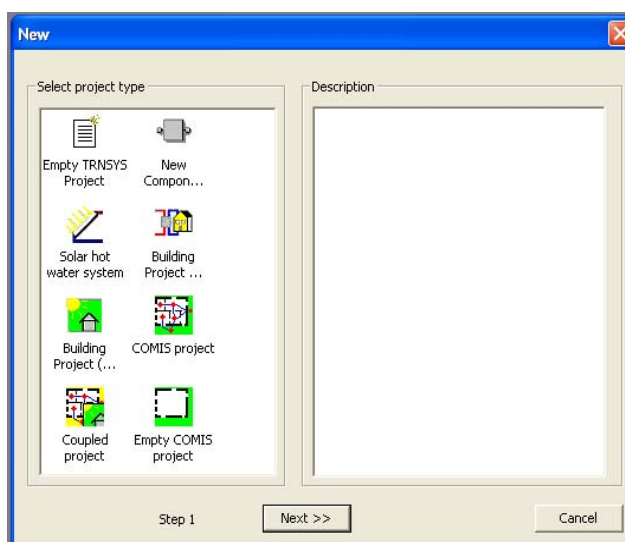


Figura 5.1. Nuevo componente.

En la información general del nuevo componente pueden introducirse datos tales como nombre del componente, autor, organización, etc. Es importante en este punto elegir el número de *type*, ya que será el nombre del nuevo componente. Se le asignará un valor entre 151 y 250 para no tener problemas con componentes ya existentes en la librería principal de TRNSYS (esta información puede consultarse en el apartado 8.3.2. del manual de TRNSYS 16). También puede elegirse un icono para el componente. Consultar Figura 5.2.

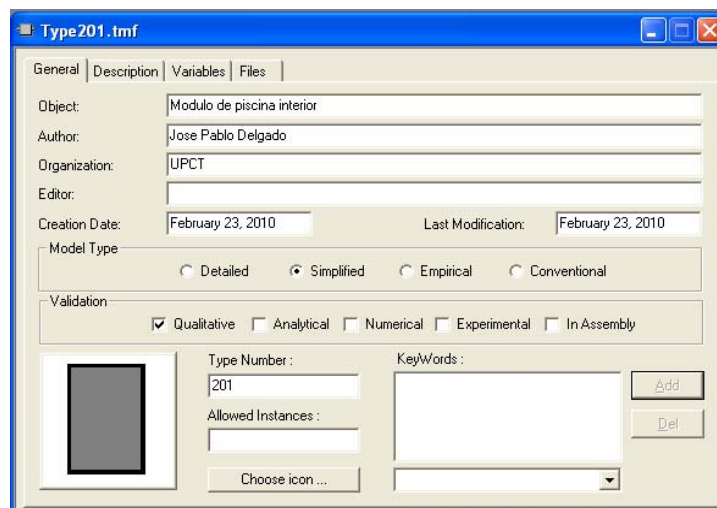


Figura 5.2. Información general del nuevo componente.

En la pestaña *Description*, puede introducirse una descripción sobre el nuevo componente y sus características especiales. El siguiente paso es definir las variables, esto es, los inputs, outputs y parameters. A las que daremos nombre, elegiremos dimensiones, valores de defecto, etc. Para ello es necesario pinchar sobre la pestaña *Variables* y a continuación sobre el botón *Variables* (Inputs, Outputs, Parameters, Derivatives).

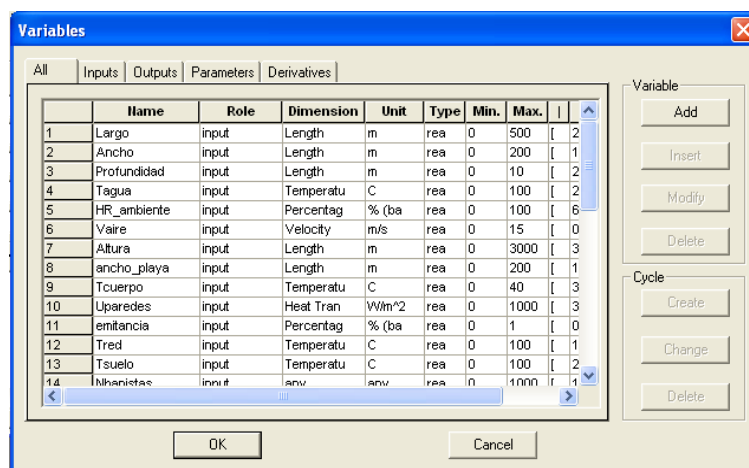


Figura 5.3. Variables del nuevo componente.

Una vez creado el nuevo componente en el Simulation Studio, habrá que pinchar sobre el menu *File* → *Export as...* → *Fortran* y darle el nombre deseado (type201, por ejemplo). De esta forma se abrirá el llamado *Developer Studio* de *Compaq Visual Fortran*, donde se habrá creado un espacio de trabajo o *Workspace* con el nombre del nuevo componente.

Una vez en este punto, se abrirá el esqueleto del modelo pinchando sobre éste, dentro de la carpeta *Source Files*.

```

Compaq Visual Fortran - [Type201.f90]
File Edit View Insert Project Build Tools Window Help
-----
C TRNSYS access functions (allow to access TIME etc.)
  USE TrnsysConstants
  USE TrnsysFunctions
-----
C REQUIRED BY THE MULTI-DLL VERSION OF TRNSYS
  !DEC$ATTRIBUTES DLEXPOR :: TYPE201 !SET THE CORRECT TYPE NUMBER HERE
-----
C TRNSYS DECLARATIONS
  !REQUIRES THE USER TO DEFINE ALL VARIABLES BEFORE USING THEM
  IMPLICIT NONE
  DOUBLE PRECISION XIN !THE ARRAY FROM WHICH THE INPUTS TO THIS TYPE WILL BE RETRIEVED
  DOUBLE PRECISION TIME !THE ARRAY WHICH WILL BE USED TO STORE THE OUTPUTS FROM THIS TYPE
  DOUBLE PRECISION TIME !THE CURRENT SIMULATION TIME - YOU MAY USE THIS VARIABLE BUT DO NOT SET IT!
  DOUBLE PRECISION PAR !THE ARRAY FROM WHICH THE PARAMETERS FOR THIS TYPE WILL BE RETRIEVED
  DOUBLE PRECISION STORED !THE STORAGE ARRAY FOR HOLDING VARIABLES FROM TIMESTEP TO TIMESTEP
  DOUBLE PRECISION T !AN ARRAY CONTAINING THE RESULTS FROM THE DIFFERENTIAL EQUATION SOLVER
  DOUBLE PRECISION DTDT !AN ARRAY CONTAINING THE DERIVATIVES TO BE PASSED TO THE DIFF EQ. SOLVER
  INTEGER*4 INFO(15) !THE INFO ARRAY STORES AND PASSES VALIABLE INFORMATION TO AND FROM THIS TYPE
  INTEGER*4 NP,N1,NOUT,ND !VARIABLES FOR THE MAXIMUM NUMBER OF PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
  INTEGER*4 NPAB,NIN,NDER !VARIABLES FOR THE CORRECT NUMBER OF PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
  INTEGER*4 IUNIT,ITYPE !THE UNIT NUMBER AND TYPE NUMBER FOR THIS COMPONENT
  INTEGER*4 ICTRL !AN ARRAY FOR HOLDING VALUES OF CONTROL FUNCTIONS WITH THE NEW SOLVER
  INTEGER*4 NSTORED !THE NUMBER OF VARIABLES THAT WILL BE PASSED INTO AND OUT OF STORAGE
  CHARACTER*J OCHECK !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT VARIABLE TYPES FOR THE OUTPUTS
  CHARACTER*J YCHECK !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT VARIABLE TYPES FOR THE INPUTS
-----
C
C USER DECLARATIONS - SET THE MAXIMUM NUMBER OF PARAMETERS (NP), INPUTS (N1),
C OUTPUTS (NOUT), AND DERIVATIVES (ND) THAT MAY BE SUPPLIED FOR THIS TYPE
  !PARAMETER (NP=0,N1=22,NOUT=15,ND=0,NSTORED=0)
-----
C
C REQUIRED TRNSYS DIMENSIONS
  DIMENSION XIN(N1), OUT(NOUT), PAR(NP), YCHECK(NI), OCHECK(NOUT),
  !STORED(NSTORED), T(ND), DTDT(ND)
  INTEGER NITEMS
-----
C
C ADD DECLARATIONS AND DEFINITIONS FOR THE USER-VARIABLES HERE
-----

```

Figura 5.4. Subrutina del Type.

```

Compaq Visual Fortran - [Type201.f90]
File Edit View Insert Project Build Tools Window Help
-----
C INPUTS
  DOUBLE PRECISION Largo
  DOUBLE PRECISION Ancho
  DOUBLE PRECISION Profundidad
  DOUBLE PRECISION Tapas
  DOUBLE PRECISION BR_ambiente
  DOUBLE PRECISION Aire
  DOUBLE PRECISION Altura
  DOUBLE PRECISION ancho_playa
  DOUBLE PRECISION Towerpo
  DOUBLE PRECISION Uparedes
  DOUBLE PRECISION estaciona
  DOUBLE PRECISION Teraso
  DOUBLE PRECISION Mbanistas
  DOUBLE PRECISION Ti
  DOUBLE PRECISION Tint
  DOUBLE PRECISION Ipared
  DOUBLE PRECISION Tcold
  DOUBLE PRECISION scold
  DOUBLE PRECISION Excavada
  DOUBLE PRECISION Ratio_renovation
  DOUBLE PRECISION Tactano
  DOUBLE PRECISION w
  DOUBLE PRECISION Pambiente
  DOUBLE PRECISION Taab
  DOUBLE PRECISION Pstapas
  DOUBLE PRECISION rtapas
  DOUBLE PRECISION Psteraso
  DOUBLE PRECISION rteraso
  DOUBLE PRECISION Pstacuerpo
  DOUBLE PRECISION scuerpo
  DOUBLE PRECISION Sw
  DOUBLE PRECISION Sp
  DOUBLE PRECISION av
  DOUBLE PRECISION as
  DOUBLE PRECISION ap
  DOUBLE PRECISION atotal
  DOUBLE PRECISION aresp
  DOUBLE PRECISION a
  DOUBLE PRECISION b
  DOUBLE PRECISION c
  DOUBLE PRECISION d
  DOUBLE PRECISION e
-----

```

Figura 5.5. Definición de las entradas, salidas y parámetros en el modelo.

En el código fuente que ha generado Fortran habrá que introducir algunas modificaciones, como corregir el nombre de la subrutina, introducir el modelo matemático que defina el comportamiento del nuevo componente y definir las variables de salida, entrada y parámetros utilizados en el modelo, y de la misma forma las variables utilizadas en el código, aparte de esto

debemos indicar el valor inicial de las salidas, entradas y parámetros del modelo Ver estas modificaciones en las Figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8.

```

ITYPE=INFO(2)
C CHECK THE PARAMETERS FOR PROBLEMS AND RETURN FROM THE SUBROUTINE IF AN ERROR IS FOUND
C IF(...) CALL TYPECK(-4,INFO,0,"BAD PARAMETER #",0)
C PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL VALUES OF THE OUTPUTS HERE
C
C   NV   OUT(1)=0
C   AS   OUT(2)=0
C   AP   OUT(3)=0
C   ATOTAL OUT(4)=0
C   ARESP   OUT(5)=0
C   PTEMP   OUT(6)=0
C   PTEMP   OUT(7)=0
C   PRAD   OUT(8)=0
C   PTEMP   OUT(9)=0
C   PTEMP   OUT(10)=0
C   TI     OUT(11)=26
C   ARESP   OUT(12)=0
C   ARESP   OUT(13)=0
C PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL STORAGE VARIABLES HERE
C NITEMS=0
C STORED(1)=.
C PUT THE STORED ARRAY IN THE GLOBAL STORED ARRAY
C CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
C RETURN TO THE CALLING PROGRAM
C RETURN 1
C ENDDIF
    
```

Figura 5.6. Definición del valor inicial de las salidas.

```

C ADD YOUR COMPONENT EQUATIONS HERE. BASICALLY THE EQUATIONS THAT WILL
C CALCULATE THE OUTPUTS BASED ON THE PARAMETERS AND THE INPUTS. REFER TO
C CHAPTER 3 OF THE TRENYS VOLUME 1 MANUAL FOR DETAILED INFORMATION ON
C WRITING TRENYS COMPONENTS.
C
C TEMPERATURAS
C Tagua=26.d0
C Taab=Ta+273.15d0
C Ts=Tagua
C Tsuelo=Tagua-4.d0
C
C AMBIENTE
C a=5800.22064d0
C b=1.39149934d0
C c=0.948802394d0
C d=0.000041764768d0
C e=0.000000144520934d0
C f=6.5459673d0
C Pambiente=RR_ambiente/100.d0*EXP(-a/Taab+b-c*Taab+d*Taab**2-e*Taab**3+f*LOG(Taab))
C
C AGUA
C Tagua=Tagua+273.15d0
C Poutagua=EXP(-a/Tagua+b-c*Tagua+d*Tagua**2.d0-e*Tagua**3.d0+f*LOG(Tagua))
C w=(80.75d0+75.15d0*Taire)/1000.d0
C ragua=347.d0*(374.15d0-Tagua+273.15d0)**0.33333333d0-2.d0
C Sw=Largo*Ancho
C w**w*(Pambiente-Poutagua)/ragua*Sw/1000
C
C SERIELO
C Tsuelo=Tsuelo+273.15d0
C Patsuelo=EXP(-a/Tsuelo+b-c*Tsuelo+d*Tsuelo**2.d0-e*Tsuelo**3.d0+f*LOG(Tsuelo))
C rsuelo=347.d0*(374.15d0-Tsuelo+273.15d0)**0.33333333d0-2.d0
C Sw=2.d0*ancho_playa*(0.0376d0+(20.7576d0**2.d0*ancho_playa)/Sw-899.5d0/Sw**2.d0)*Sw
C w**w*(Pambiente-Patsuelo)/rsuelo*Sw/1000
C
C IF (Nbanistas .EQ. 0) THEN
C   w=0
C ENDDIF
C
C CUBRPO
    
```

Figura 5.7. Introducción del modelo matemático

```

C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','SEVERE',IUNIT,ITYPE)
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','FATAL',IUNIT,ITYPE)
C
C
C SET THE OUTPUTS FROM THIS MODEL IN SEQUENTIAL ORDER AND GET OUT
C
C av
C OUT(1)=av
C as
C OUT(2)=as
C sp
C OUT(3)=sp
C stotal
C OUT(4)=stotal
C sresp
C OUT(5)=sresp
C Fwvap
C OUT(6)=Fwvap
C Fcovv
C OUT(7)=Fcovv
C Prad
C OUT(8)=Prad
C Pcond
C OUT(9)=Pcond
C Ptotal
C OUT(10)=Ptotal
C Tf
C OUT(11)=Tf
C asinres
C OUT(12)=asinres
C arenov
C OUT(13)=arenov
C
C EVERYTHING IS DONE - RETURN FROM THIS SUBROUTINE AND MOVE ON
C RETURN 1
C END
    
```

Figura 5.8. Designación de las variables asociadas a las salidas

Una vez modificado el código el siguiente paso es crear la librería del componente. Es necesario hacerlo en ambas configuraciones: *Debug* y *Release*.

Desde el menú principal *Build* → *Rebuild All* se generará la librería externa para este componente. Por defecto *Developer Studio* nos generará la librería en *Win32Debug*.

Para cambiar la configuración basta con pinchar sobre el menú principal *Build* → *Set Active Configuration* → *Win32Release*. Por último, se repite la misma operación desde el menú principal (*Build* → *Rebuild All*).

De esta forma ya tenemos las dos librerías creadas: una en configuración *Debug* y otra en configuración *Release*.

Una vez comprobado que no existan errores en la creación de la dll, hay que volver de nuevo al *Simulation Studio* de TRNSYS. Se seleccionará la última pestaña del cuadro de diálogo que se abrió para crear el nuevo componente, *Files*, y pinchando sobre *Browse* se buscará el código creado. Finalmente el componente se guarda desde el menú principal de TRNSYS: *File* → *Save*. Para que este nuevo type aparezca en la interfaz *Simulation Studio*, es necesario salvarlo en *Trnsys16_1/Studio/Proformas*, dentro de la carpeta deseada.

Para comprobar si el componente ha sido creado con éxito, basta con abrir el *Simulation Studio* de TRNSYS, crear un nuevo proyecto, arrastrar el nuevo componente sobre la interfaz y ejecutar la simulación. Un cuadro de diálogo informará de que el nuevo componente se ha creado con éxito.

Variable	Descripción	Entrada/Salida	Dimensiones	Unidades	Tipo	Min	Max	Valor Inicial
Largo	Dimensiones del vaso	input	Length	m	real	0	500	25
Ancho	Dimensiones del vaso	input	Length	m	real	0	200	12.5
Profundidad	Dimensiones del vaso	input	Length	m	real	0	10	2
Tagua	Temperatura del agua del vaso	input	Temperature	C	real	0	100	26
HR_ambiente	Humedad relativa ambiente	input	Percentage	%(base 100)	real	0	100	65
Vaire	Velocidad del aire ambiente	input	Velocity	m/s	real	0	15	0.2
Altura	Cota sobre nivel del mar	input	Length	m	real	0	3000	300
ancho_playa	Ancho de la playa	input	Length	m	real	0	200	1.5
Tcuerpo	Temperatura cuerpo humano	input	Temperature	C	real	0	40	35
Uparedes	U paredes edificio piscina	input	Heat Transfer Coeff.	W/m^2.K	real	0	1000	3.3
emitancia	Emitancia superficie agua vaso	input	Percentage	%(base 1)	real	0	1	0.87
Tred	Temperatura agua red abastecimiento	input	Temperature	C	real	0	100	12
Tsuelo	Temperatura suelo playas	input	Temperature	C	real	0	100	22
Nbanistas	Número de bañistas	input	any	any	real	0	1000	15
Ti	Temperatura inicial en un lapso tiempo	input	Temperature	C	real	-Inf	+Inf	26
Tint	Temperatura ambiente	input	Temperature	C	real	-Inf	+Inf	29
Tpared	Temperatura radiante media paredes	input	Temperature	C	real	-Inf	+Inf	28
Tcald	Temperatura del agua de la caldera	input	Temperature	C	real	-Inf	+Inf	35
mcald	Gasto máscico de la caldera	input	Flow Rate	kg/hr	real	-Inf	+Inf	15
Excavada	Vaso enterrado	input	Dimensionless	-	boolean	0	1	1
Ratio_renovacion	% de renovación del agua del vaso	input	Dimensionless	-	real	0	100	2.5
Tsotano	Temperatura del sótano	input	Temperature	C	real	-20	60	26
mw	Agua evaporada desde el vaso	output	Flow Rate	kg/s	real	-Inf	+Inf	0
ms	Agua evaporada desde la playa	output	Flow Rate	kg/s	real	-Inf	+Inf	0
mp	Agua evaporada desde los bañistas	output	Flow Rate	kg/s	real	-Inf	+Inf	0
mtotal	Agua evaporada total	output	Flow Rate	kg/s	real	-Inf	+Inf	0
mresp	Agua aportada por respiración de bañistas	output	Flow Rate	kg/s	real	-Inf	+Inf	0
Pevap	Pérdidas térmicas por evaporación	output	Power	kW	real	-Inf	+Inf	0
Pconv	Pérdidas térmicas por convección	output	Power	kW	real	-Inf	+Inf	0
Prad	Pérdidas térmicas por radiación	output	Power	kW	real	-Inf	+Inf	0
Pcond	Pérdidas térmicas por conducción	output	Power	kW	real	-Inf	+Inf	0
Ptotal	Pérdidas térmicas totales	output	Power	kW	real	-Inf	+Inf	0
Tf	Temperatura final en un lapso de tiempo	output	Temperature	C	real	-Inf	+Inf	26
msinres	Agua aportada sin la respiración	output	Flow Rate	kg/s	real	-Inf	+Inf	0
mrenov	Agua extraída para renovación	output	Flow Rate	kg/hr	real	0	+Inf	0

Figura 5.9. Detalle de las variables utilizadas en el type 201

C TEMPERATURAS

```
Tamb=Tint+273.15d0
Ti=Tagua
Tsuelo=Tagua-4.d0
```

C AMBIENTE

```
a=5800.2206d0
b=1.3914993d0
c=0.04860239d0
d=0.000041764768d0
e=0.000000014452093d0
f=6.5459673d0
Pambiente=HR_ambiente/100.d0*EXP(-a/Tamb+b-c*Tamb+d*Tamb**2-e*Tamb**3+f*LOG(Tamb))
```

C AGUA

```
Tagua=Tagua+273.15d0
Psatagua=EXP(-a/Tagua+b-c*Tagua+d*Tagua**2.d0-e*Tagua**3.d0+f*LOG(Tagua))
w=(88.75d0+78.15d0*Vaire)/1000.d0
ragua=347.d0*(374.15d0-Tagua+273.15d0)**0.33333333d0-2.d0
Sw=Largo*Ancho
mw=w*(Pambiente-Psatagua)/ragua*Sw/1000
```

C SUELO

```
Tsuelo=Tsuelo+273.15d0
Psatsuelo=EXP(-a/Tsuelo+b-c*Tsuelo+d*Tsuelo**2.d0-e*Tsuelo**3.d0+f*LOG(Tsuelo))
rsuelo=347.d0*(374.15d0-Tsuelo+273.15d0)**0.33333333d0-2.d0
Ss=2.d0*ancho_playa*(0.0376d0+(28.7576d0+2.d0*ancho_playa)/Sw-899.5d0/Sw**2.d0)*Sw
ms=w*(Pambiente-Psatsuelo)/rsuelo*Ss/1000

IF (Nbanistas .EQ. 0) THEN
ms=0
ENDIF
```

```

C      CUERPO

Tcuerpo=35+273.15
Pstatcuerpo=EXP(-a/Tcuerpo+b-c*Tcuerpo+d*Tcuerpo**2-e*Tcuerpo**3+f*LOG(Tcuerpo))
rcuerpo=347*(374.15-Tcuerpo+273.15)**0.33333333-2
Sp=Nbanistas*1.7
IF (Nbanistas.EQ.0) THEN
    mp=0.d0
ELSE
    mp=w*(Pambiente-Pstatcuerpo)/rcuerpo*Sp/1000
ENDIF

C      TOTALES

msinres=ABS(mw+ms+mp)
mresp=Nbanistas*100/3600
mtotal=msinres+mresp

C      PERDIDAS

Pevap=msinres*(ragua+4.186d0*(Tagua-273.15d0-Tred))
Pconv=0.003181d0*Vaire**0.8d0*(Tagua-Tamb)*Sw
IF (Pconv.LT.0) THEN
    Pconv=0.d0
ENDIF

Prad=0.00567d0*emitancia*((Tagua)/100.d0)**4.d0-
((Tpared+273.15)/100.d0)**4.d0)*Sw
IF (Prad.LT.0) THEN
    Prad=0.d0
ENDIF

Sparedes=2.d0*(Largo+Ancho)*Profundidad
Pcond=Uparedes*(Tagua-Tamb)/1000.d0*Sparedes
IF (Pcond.LT.0) THEN
    Pcond=0.d0
ENDIF

C      Piscina excavada

IF (Excavada.EQ.1) THEN
    Pcond=0.d0
ENDIF

C      PERDIDAS TOTALES

Ptotal=Pevap+Pconv+Prad+Pcond

C      CALCULO TEMPERATURA DEL VASO

V=Largo*Ancho*Profundidad*1000.d0
Tf=((V-mcald)*Ti+mcald*Tcald)/V

Tf=Tf-Ptotal*3600.d0/V/4.185d0

C      RENOVACION

mrenov=V*Ratio_renovacion/100/24
Tf=(Tf*(V-mrenov)+Tred*mrenov)/V
    
```

Figura 5.10. Detalle de los cálculos utilizados en el type 201

6. MODELADO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN

6.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS

6.1.1. COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA PISCINA - TRNbuild Type 56

La herramienta TRNbuild permite evaluar el comportamiento térmico de una edificación (ver apartado 5.2.3). En el caso propuesto, se utiliza este componente para analizar el comportamiento del edificio que contiene el vaso de la piscina. Mediante un sencillo formulario se definen las dimensiones del edificio (en este caso 25x47 m), el número de espacios (dos: uno para el vaso y otro para vestuarios), características de los cerramientos, acristalamientos, etc. El sistema genera un conjunto de elementos que permiten evaluar el edificio (figura 6.1). Entre estos elementos es de destacar la unidad de datos meteorológicos, que también será utilizada para proveer información sobre la radiación solar incidente sobre los captadores solares térmicos.

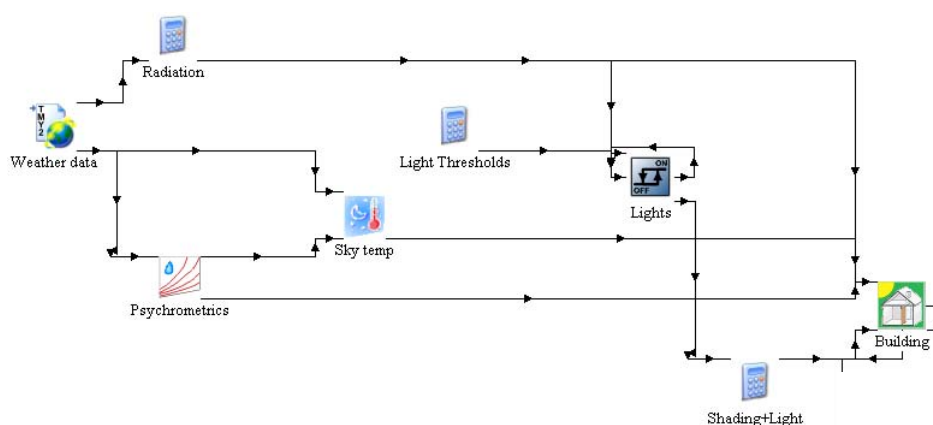


Figura 6.1. Conjunto generado por TRNbuild para evaluar el comportamiento energético del edificio

Hay dos aspectos tenidos en cuenta en esta definición del edificio, que son necesarios mencionar: el primero de ellos es que se asume que la humedad del ambiente permanece constante debido, fundamentalmente, al funcionamiento en continuo de la deshumectadora, que retira de forma continua la humedad aportada al ambiente desde el vaso. El segundo aspecto se refiere a la temperatura ambiente, que también se supone constante por acción de la misma deshumectadora.

6.1.2. COMPORTAMIENTO DEL VASO DE LA PISCINA – Type 201

Se trata del componente creado para este trabajo, según se define en el apartado 5.2.4. El componente evalúa la variación de temperatura en el vaso de la piscina como resultado de sus pérdidas térmicas y de la renovación del agua del vaso, así como del aporte de calor facilitado por la caldera.



Figura 6.2. Componente Piscina

6.1.3. CALDERA – Type 6

El componente toma un cierto caudal del vaso de la piscina y le eleva la temperatura hasta la temperatura de consigna, devolviéndola de nuevo al vaso. También se utiliza para calentar el agua de las duchas. Una característica especial de estas calderas es que contienen en su interior la bomba de circulación, por lo que no es necesaria incorporarla aparte.

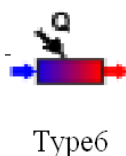


Figura 6.3. Componente caldera

6.1.4. CONTROL PID – Type 23

Este componente simula el funcionamiento de un controlador proporcional, integral y derivativo. Será utilizado para dar la señal de control a las calderas empleadas.

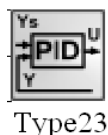


Figura 6.4. Componente control PID

6.1.5. DEFINICIÓN DE VALORES DE USO HORARIO – Types 14a y 14h

Estos componentes permiten la definición de ciertos valores que van cambiando en función de la hora del día y del año. Son utilizados para definir la cadencia de bañistas que entran a la piscina cada hora, así como para introducir la temperatura del agua de la red de abastecimiento que es necesaria para los cálculos energéticos, ya que esta temperatura varía en el transcurso del año.

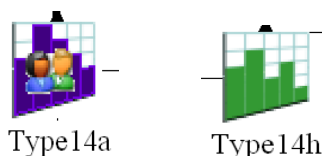


Figura 6.5. Componentes para definición de valores de uso horario

6.1.6. SUPERFICIE DE CAPTACIÓN SOLAR – Type 1b

Se trata de la superficie formada por captadores solares térmicos que aportarán energía térmica al vaso de la piscina. El comportamiento energético de los captadores viene definido por su curva de rendimiento y por los valores de caudal y temperatura a la entrada. También requiere del nivel de radiación incidente que se obtiene del componente de datos meteorológicos (ver apartado 6.1.1).



Type1b

Figura 6.6. Superficie de captación solar térmica

6.1.7. BOMBA DE CIRCULACIÓN – Type 3b

Se trata de una bomba de circulación definida por el caudal de impulsión y las características del fluido (en nuestro caso, agua). Son utilizadas únicamente en los circuitos primario y secundario de la instalación solar térmica. Las calderas no requieren bomba de circulación externa, pues la contienen en su interior (ver apartado 6.1.3).

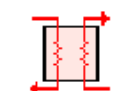


Type3b

Figura 6.7. Bomba de circulación

6.1.8. INTERCAMBIADOR DE CALOR – Type 5b

Se utilizará intercambiador de calor (de placas) para conectar los circuitos primario y secundario de la instalación solar térmica.



Type5b

Figura 6.8. Intercambiador de calor

6.1.9. REGISTRO DE DATOS – Type 93

Este componente registra en memoria valores de las variables de un periodo de cálculo para ser utilizadas en periodos posteriores



Figura 6.9. Registro de datos

6.1.10. INTEGRADOR – Type 24

Este componente integra (suma) un valor resultado del cálculo a lo largo de todo el periodo analizado (normalmente el año completo). Da como resultado el valor acumulado en cada instante. Es utilizado para conocer el consumo de energía al cabo del año.



Figura 6.10. Elemento integrador

6.1.11. REGISTRO DE DATOS EN ARCHIVO – Type 25c

El componente registra los valores de las variables asignadas, para cada periodo de tiempo, en un archivo de texto editable.



Type25c

Figura 6.11. Registro de datos en archivo

6.1.12. VISUALIZADOR DE RESULTADOS EN PANTALLA – Type 65d

El componente representa gráficamente los valores de las variables asignadas, en cada intervalo de tiempo, formando gráficas que permiten comprender el modelo.



Figura 6.12. Visualizador en pantalla de los resultados

6.2. MODELADO FINAL DE LA INSTALACIÓN

6.2.1. MODELADO SIN INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

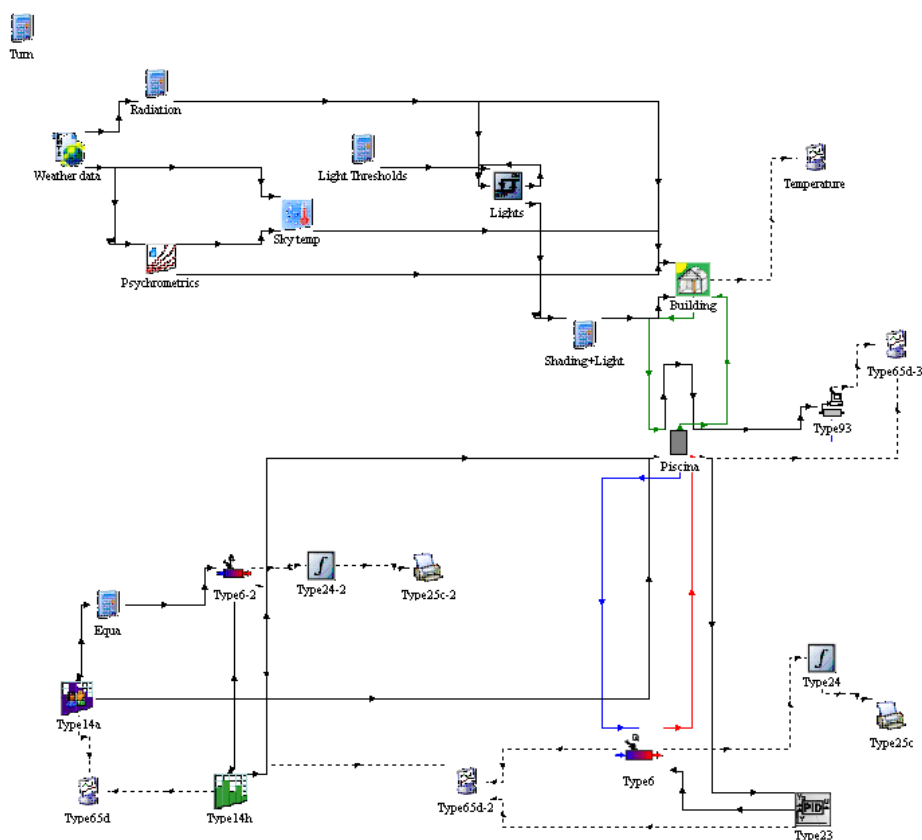


Figura 6.13. Esquema de la instalación de la piscina climatizada sin instalación solar térmica

El proceso de modelado de la instalación en TRNSYS se basa en la incorporación de los distintos componentes y en su conexión permitiendo el intercambio de las variables que definen el comportamiento térmico. En este sentido, como se puede observar en la figura 6.13, este conexionado se ha representado de distintas formas y colores para sus distintos usos y aplicaciones. Esto es:

- Negro continuo: se trata de conexiones que permiten transferir información (o control) de unos componentes sobre otros.
- Negro a trazos: se trata de extracción de variables para su representación u obtención de resultados.
- Verde: balance de humedad entre el agua evaporada del vaso de la piscina y la humedad que existe en el ambiente.
- Azul: agua fría que se extrae del vaso de la piscina para ser calentada.
- Rojo: agua calentada por la caldera que se aporta al vaso de la piscina.

Un aspecto importante es la definición de los parámetros y valores iniciales de los distintos componentes. Además, el propio proyecto requiere de la definición de valores de control, que vienen determinados por la *Control Card*. En ella se definen los instantes inicial y final del proceso de cálculo, así como valores relativos a la convergencia de los procesos de iteración. Todos estos valores son los que se representan en las figuras 6.14 a 6.20.

Es necesario mencionar el proceso de cálculo para el calentamiento del agua de las duchas: Cada bañista (que entran a la piscina a turnos cada hora) requiere de una media de 22 litros de agua a 60°C (CTE-HE4). El modelo utiliza una ecuación para conocer los litros de agua caliente necesarias cada hora. Ese será el agua que caliente la caldera.

Simulation start time	0	hr
Simulation stop time	8760	hr
Simulation time step	1	hr
Solution method	0	-
The minimum relaxation factor	1	-
The maximum relaxation factor	1	-
Equation solver	0	-
Equation trace	1	-
Debug mode	1	-
Tolerance integration	0.01	dimensionless
Tolerance convergence	0.01	dimensionless
Tolerance values	0	-
Before 'WARNING'	500	-
Before 'ERROR'	500	-
Before 'TRACE'	30	-
Diff. equation algorithm	1	-
Number of characters	72	dimensionless
List card	0	-
Map card	1	-
Deck file name	BuildingProject.dck	-
Write Trnsed commands	1	-
Write Studio commands to deck	0	-
Automatically launch plugin	1	-
Deck comment style	2	-

Figura 6.14. Definición de parámetros en la Control Card

Largo	25	m
Ancho	12.5	m
Profundidad	2	m
Tagua	12	C
HR_ambiente	65	% (base 100)
Vaire	0.2	m/s
Altura	300	m
ancho_playa	1.5	m
Tcuerpo	35	C
Uparedes	3.3	W/m^2.K
emitancia	0.87	% (base 1)
Tred	12	C
Tsuelo	22	C
Nbanistas	15	any
Ti	26	C
Tint	29	C
Tpared	28	C
Tcald	35	C
mcald	0	kg/hr
Excavada	1	-
Ratio_renovacion	2.5	-
Tsotano	26	C

Figura 6.15. Definición de valores en el componente Piscina

Initial value of time	0	hr
Initial number of people	0	-
Time at point-1	7	hr
Occupancy at point -1	0	-
Time at point-2	8	hr
Occupancy at point -2	25	-
Time at point-3	13	hr
Occupancy at point -3	15	-
Time at point-4	16	hr
Occupancy at point -4	30	-
Time at point-5	22	hr
Occupancy at point -5	0	-

Figura 6.16. Definición de valores en el componente Type14a (Bañistas)

Maximum heating rate	150	kW
Specific heat of fluid	4.19	kJ/kg.K
Overall loss coefficient for heater during operation	0.0	kJ/hr.K
Efficiency of auxiliary heater	0.85	-
Inlet fluid temperature	20.0	C
Fluid mass flow rate	100.0	kg/hr
Control Function	1	-
Set point temperature	60.0	C
Temperature of surroundings	20.0	C

Figura 6.17. Definición de valores en el componente Type6-2 (Caldera ACS)

Initial value of time	0	hr
Initial value of function	8	any
Time at point-1	372	hr
Value at point -1	8	any
Time at point-2	1080	hr
Value at point -2	9	any
Time at point-3	1788	hr
Value at point -3	11	any
Time at point-4	2520	hr
Value at point -4	13	any
Time at point-5	3252	hr
Value at point -5	14	any
Time at point-6	3984	hr
Value at point -6	15	any
Time at point-7	4716	hr
Value at point -7	16	any
Time at point-8	5460	hr
Value at point -8	15	any
Time at point-9	6192	hr
Value at point -9	14	any
Time at point-10	6924	hr
Value at point -10	13	any
Time at point-11	7656	hr
Value at point -11	11	any
Time at point-12	8388	hr
Value at point -12	8	any
Time at point-13	8760	hr
Value at point -13	8	any

Figura 6.18. Definición de valores en el componente Type14h (Temperatura agua de red)

Maximum heating rate	120	kW
Specific heat of fluid	4.19	kJ/kg.K
Overall loss coefficient for heater during operation	0.0	kJ/hr.K
Efficiency of auxiliary heater	0.85	% (base 1)
Inlet fluid temperature	20.0	C
Fluid mass flow rate	5	kg/s
Control Function	0	-
Set point temperature	30	C
Temperature of surroundings	20.0	C

Figura 6.19. Definición de valores en el componente Type6 (Caldera piscina)

Setpoint	26	any
Controlled variable	0	any
On / Off signal	1	-
Minimum control signal	0	any
Maximum control signal	1	any
Threshold for non-zero output	0	any
Gain constant	1	any
Integral time	1	hr
Derivative time	0	hr
Tracking time for anti-windup	-1	hr
Fraction of ySet for proportional effect	1	-
Fraction of ySet for derivative effect	1	-
High-frequency limit on derivative	10	-

Figura 6.20. Definición de valores en el componente Type23 (Control PID caldera piscina)

6.2.2. MODELADO CON INSTALACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

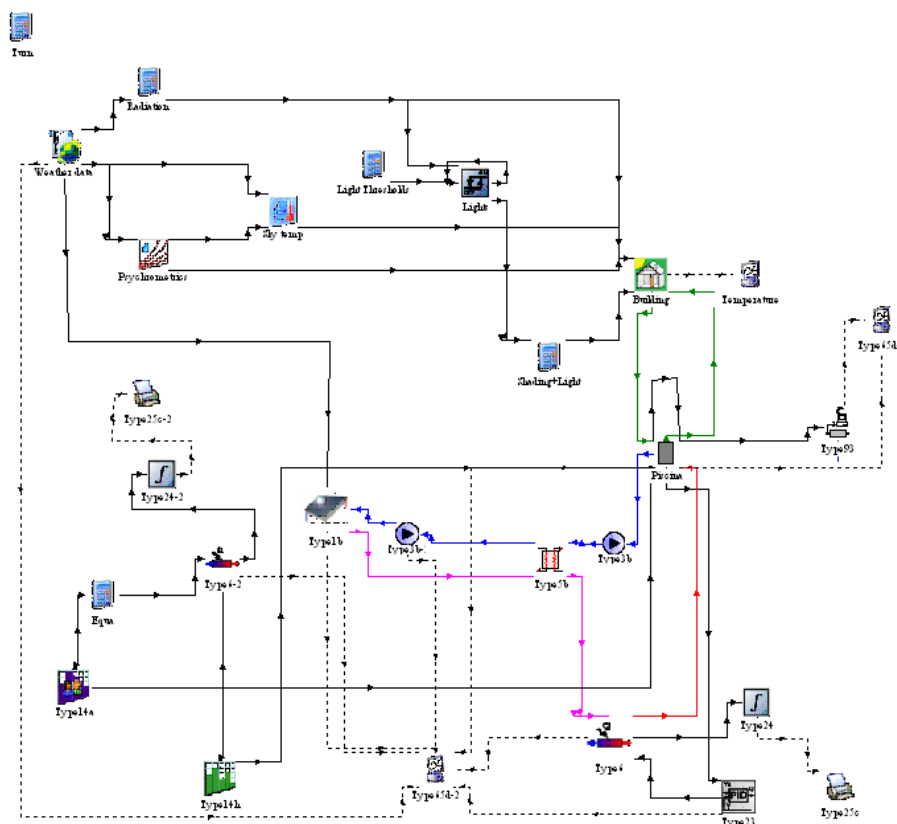


Figura 6.21. Esquema de la instalación de la piscina climatizada con instalación solar térmica

En este caso, la instalación está basada en el modelado anterior, pero se ha incluido una instalación solar térmica para aportar energía al calentamiento del vaso. Esta instalación está conectada en serie con la caldera, de forma que el agua fría proveniente del vaso pasa primero por la instalación solar y posteriormente por la caldera. Así, sólo en el caso en que la radiación solar no sea suficiente para calentar el agua, entrará en funcionamiento la caldera.

Esta instalación está compuesta de un circuito primario, que une los captadores con el intercambiador de calor, mediante una bomba, y de un circuito secundario, que conecta el vaso de la piscina con el intercambiador de calor y la caldera.

En las figuras 6.22 a 6.24 Se describen los parámetros de los componentes adicionales que se han añadido en esta instalación.

Number in series	1	-
Collector area	300	m ²
Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K
Efficiency mode	3	-
Tested flow rate	0.011111	kg/s.m ²
Intercept efficiency	0.80	-
Efficiency slope	4.5	W/m ² .K
Efficiency curvature	0.013889	W/m ² .K ²
Optical mode 2	2	-
Inlet temperature	20.0	C
Inlet flowrate	18000	kg/hr
Ambient temperature	10.0	C
Incident radiation	0.	kJ/hr.m ²
Total horizontal radiation	0.0	kJ/hr.m ²
Horizontal diffuse radiation	0.0	kJ/hr.m ²
Ground reflectance	0.2	-
Incidence angle	45.0	degrees
Collector slope	40	degrees

Figura 6.22. Definición de valores en el componente Type1b (Captadores solares)

Maximum flow rate	18000	kg/hr
Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K
Maximum power	2000	W
Conversion coefficient	0.05	-
Power coefficient	0.5	-
Inlet fluid temperature	20.0	C
Inlet mass flow rate	18000	kg/hr
Control signal	1.0	-

Figura 6.23. Definición de valores en el componente Type3b (Bombas circuitos primario y secundario)

Counter flow mode	2	-
Specific heat of hot side fluid	4.19	kJ/kg.K
Specific heat of cold side fluid	4.19	kJ/kg.K
Not used	0	-
Overall heat transfer coefficient of exchanger	10000	W/K

Figura 6.24. Definición de valores en el componente Type5b (Bombas Intercambiador de calor)

7. RESULTADOS

Los parámetros de entrada más importantes para el funcionamiento de la piscina son la temperatura del agua de la red y el número de bañistas que, en cada turno horario, hacen uso de la misma. Para definir ambos parámetros se hace uso de una función escalonada, programada en el componente *Type14*. En el caso de la temperatura del agua de la red, se han toma valores estándar definidos por Censolar para la región de Murcia. Hemos de decir que estos valores son conservadores, es decir, que la temperatura del agua de la red suele ser algo superior a lo que interpreta este autor. Evolución de esta temperatura, hora a hora, al cabo del año puede verse representada en la figura 7.1.

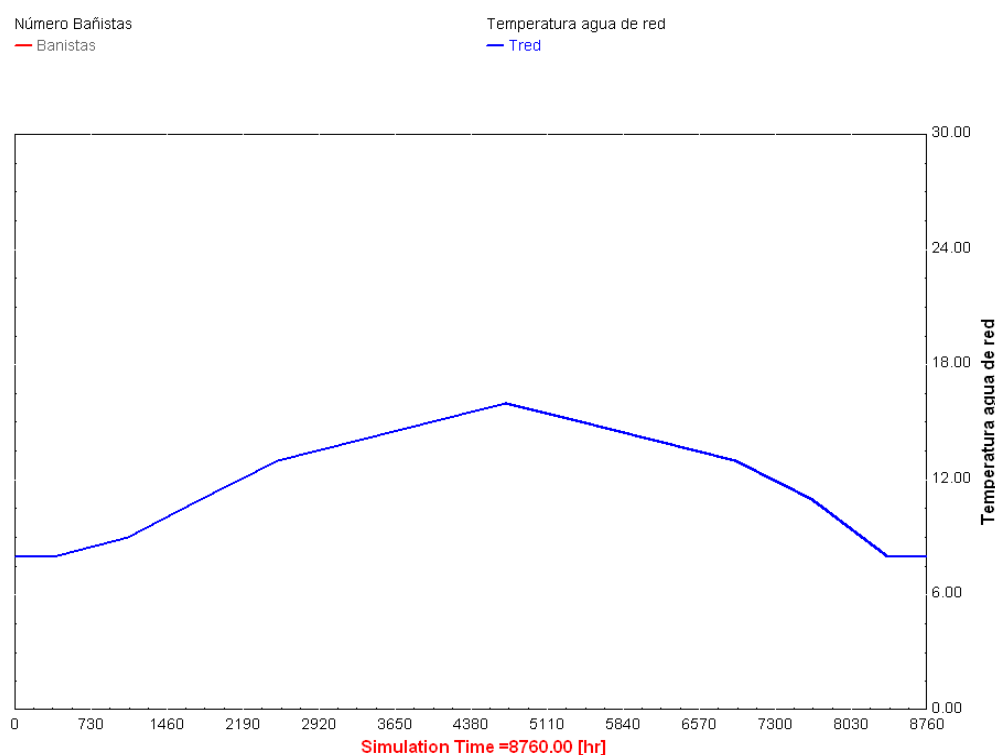


Figura 7.1. Evolución de la temperatura del agua de la red (°C)

En cuanto a la evolución del número de bañistas cada hora, se ha introducido un valor medio fruto de la información facilitada por empresas operadoras de piscinas climatizadas semiolímpicas. Este perfil de ocupación se ajusta a lo representado en la figura 7.2. En cualquier caso, este nivel de ocupación no debería de ser igual todos los días del año, sino que el servicio de la piscina no estará disponible al menos los días festivos. Esto es difícil de

programar mediante una función repetitiva, como lo es la del *Type 14*, pero al menos sí que se pueden excluir los domingos, quedando la evolución de la ocupación durante una semana tal y como se representa en la figura 7.3.

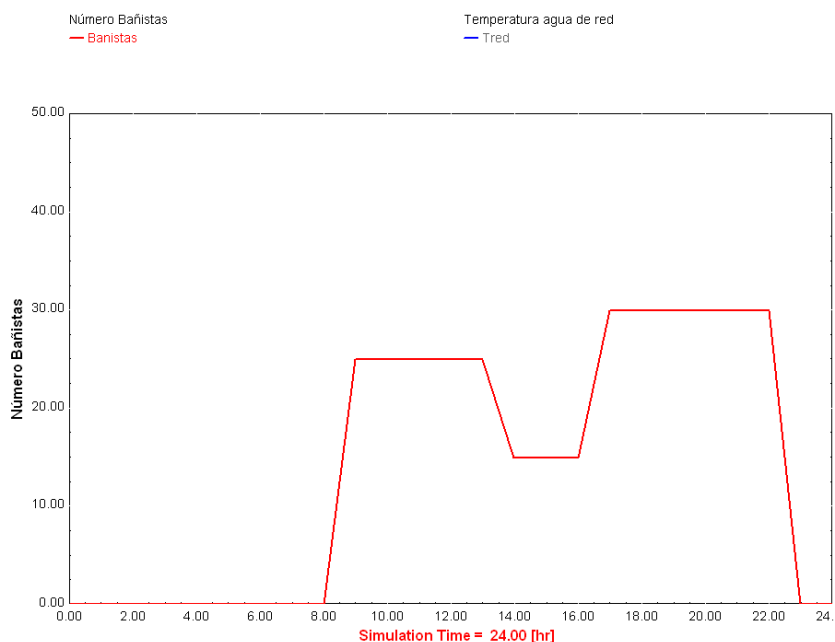


Figura 7.2. Evolución del número de bañistas un día tipo

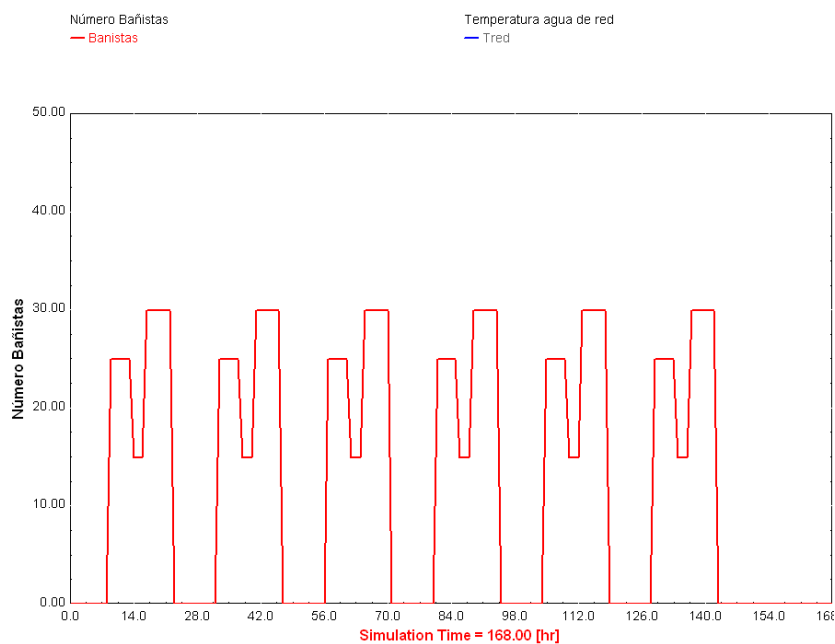


Figura 7.3. Evolución del número de bañistas una semana tipo

El objetivo fundamental de la implementación en TRNSYS de este modelo para piscinas no es otro que el de conocer, en cada instante, la potencia o la energía suministrada para mantener caliente el vaso de la piscina (hay que recordar que se ha determinado el intervalo de cálculo en una hora). La temperatura de consigna del vaso serán 26°C, como establece la norma.

En este sentido, la energía demandada hora a hora (kJ/h) por el vaso, durante la primera semana del año será la representada en la figura 7.4. Al cabo del año, esta evolución será la representada en la figura 7.5. Un detalle de los picos de potencia, se pueden observar en la figura 7.6.

Estos picos de potencia son valiosos para determinar la potencia de la caldera que hay que instalar en cada caso. En nuestro caso, la caldera instalada ofrece una potencia máxima de 150 kW, pero como se puede ver en los picos máximos, en ningún caso se superan los 390.000 kJ/h (108,3 kW). Como se puede observar en la figura 7.5, estos máximos de potencia requerida se suelen dar en épocas invernales. Igual ocurre en el caso del calentamiento del agua para las duchas (ver figura 7.4)

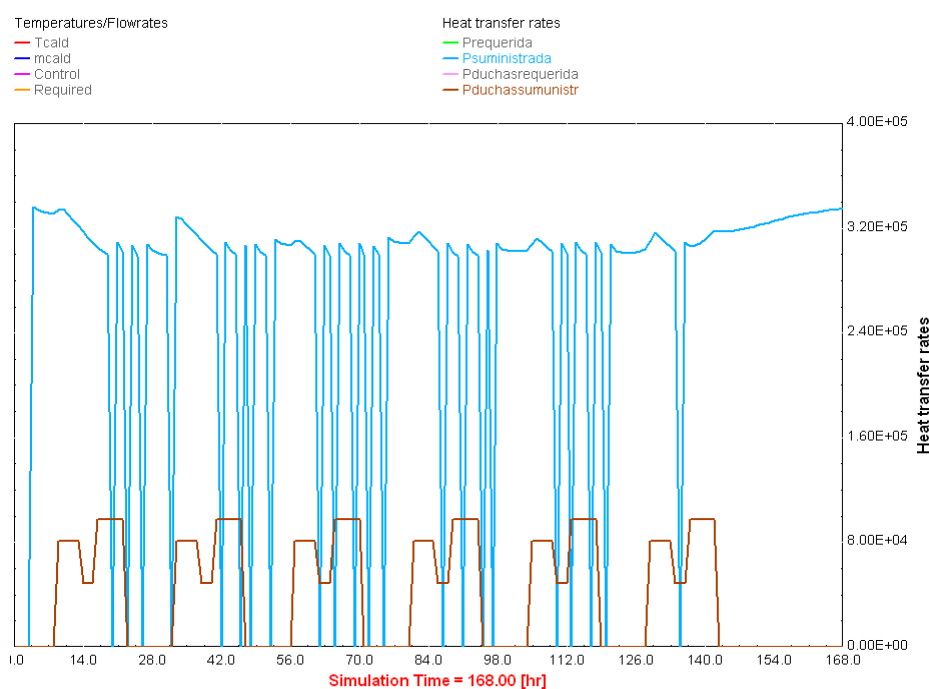


Figura 7.4. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) durante la primera semana del año

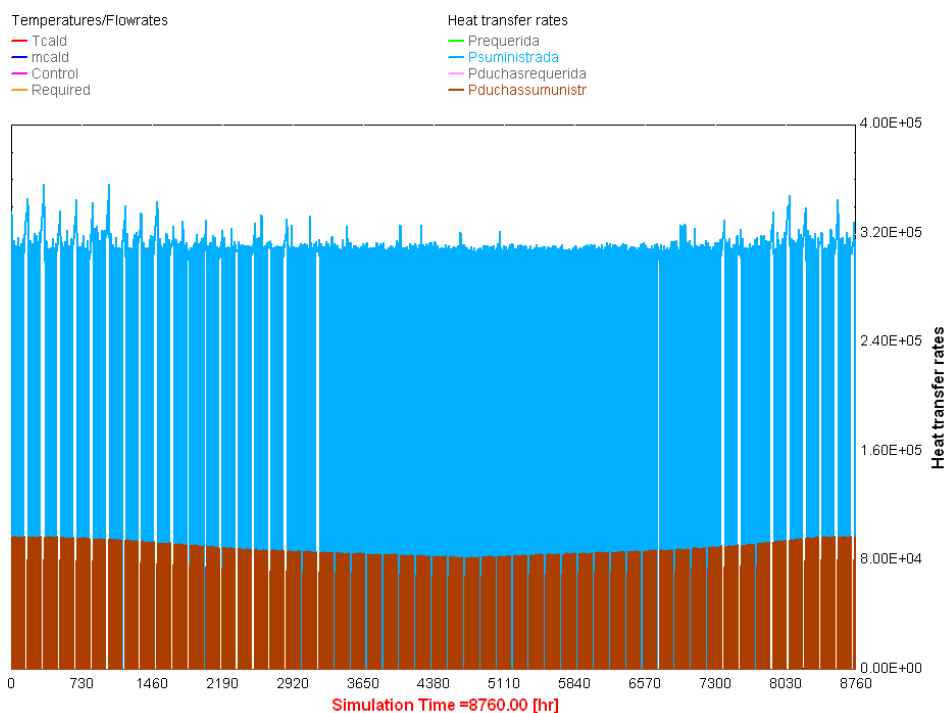


Figura 7.5. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) al cabo del año

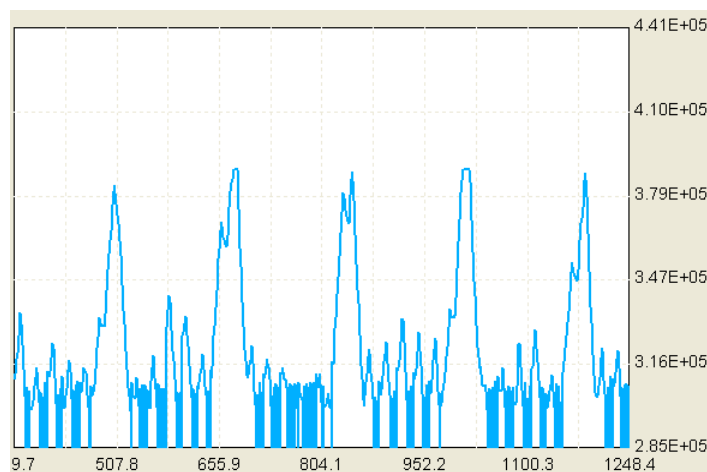


Figura 7.6. Detalle de los picos de potencia suministrada por la caldera del vaso de la piscina (kJ/h)

De esta forma, se consigue mantener la temperatura del vaso de la piscina en el entorno de los 26°C que requiere la norma. La evolución anual de esta temperatura puede observarse en la figura 7.7. Un detalle de esta evolución está representado en la figura 7.8.

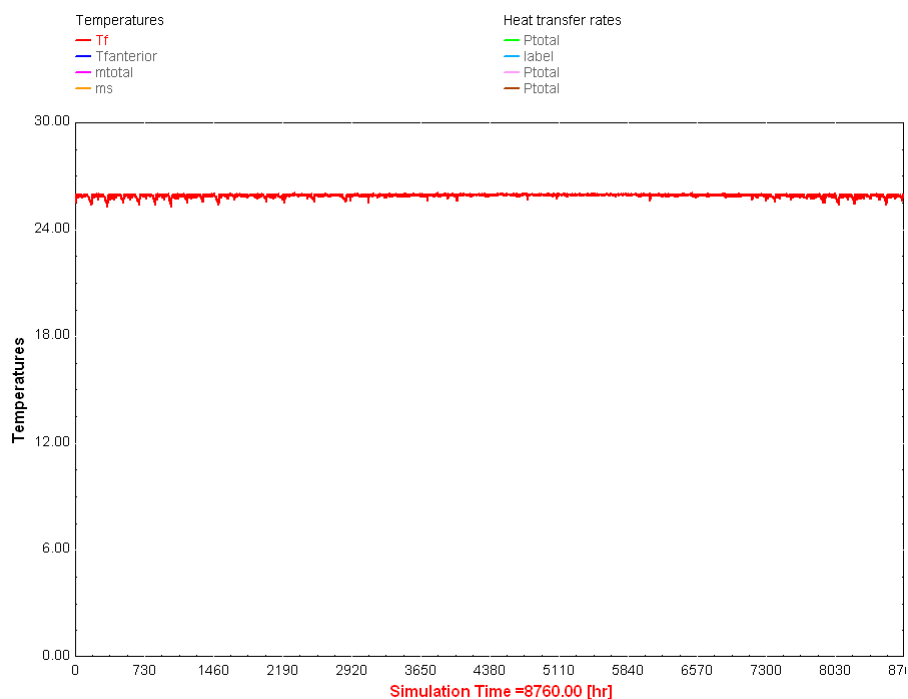


Figura 7.7. Evolución de la temperatura del vaso de la piscina al cabo del año

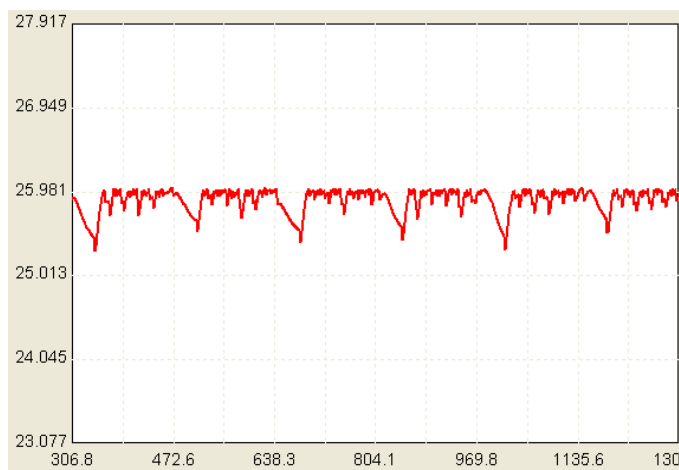


Figura 7.8. Detalle de la evolución de la temperatura del vaso de la piscina

Otra de las posibilidades que ofrece el modelo diseñado consiste en conocer el tiempo requerido para el calentamiento del vaso. Es habitual que, tras una parada de descanso en la piscina (como podría ser durante el mes de agosto), la caldera tenga que funcionar a plena carga durante varios días para poder llevar la temperatura del vaso a consigna (26°C).

Se ha realizado un ensayo suponiendo que la temperatura inicial del vaso es de 8°C. En ese caso, si analizamos físicamente el problema, será necesaria la energía suficiente para elevar la

temperatura de toda la masa de agua. Teniendo en cuenta la potencia máxima de la caldera (150 kW ó 540.000 kJ/h), se podría estimar el tiempo requerido para el calentamiento del vaso. Los cálculos serían:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q = 625000 \text{ kg} \cdot 4,185 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (26 - 8) \text{ K}$$

$$Q = 4,708 \cdot 10^7 \text{ kJ}$$

$$t = \frac{4,708 \cdot 10^7 \text{ kJ}}{540000 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}} = 87,185 \text{ h}$$

Es decir, teóricamente se requerirán algo más de 87 horas para conseguir dicho calentamiento. Si analizamos gráficamente el problema, la evolución de la temperatura del vaso será tal y como aparece en la figura 7.9. Se puede observar que el tiempo de calentamiento rondaría las 70 horas. También se puede observar en la figura 7.10, el comportamiento de la caldera durante este proceso de calentamiento. Esta diferencia puede ser debido a los errores cometidos en los pasos iniciales de cálculo que realiza TRNSYS. Esto hace que tras escasas dos horas de funcionamiento, la temperatura del vaso supere ya los 12°C.

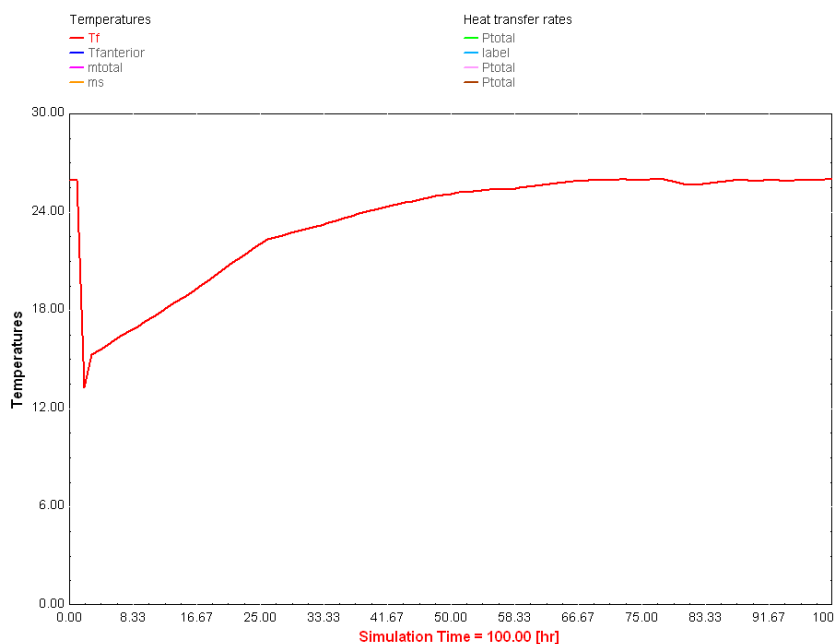


Figura 7.9. Evolución de la temperatura del vaso de la piscina en el proceso de calentamiento

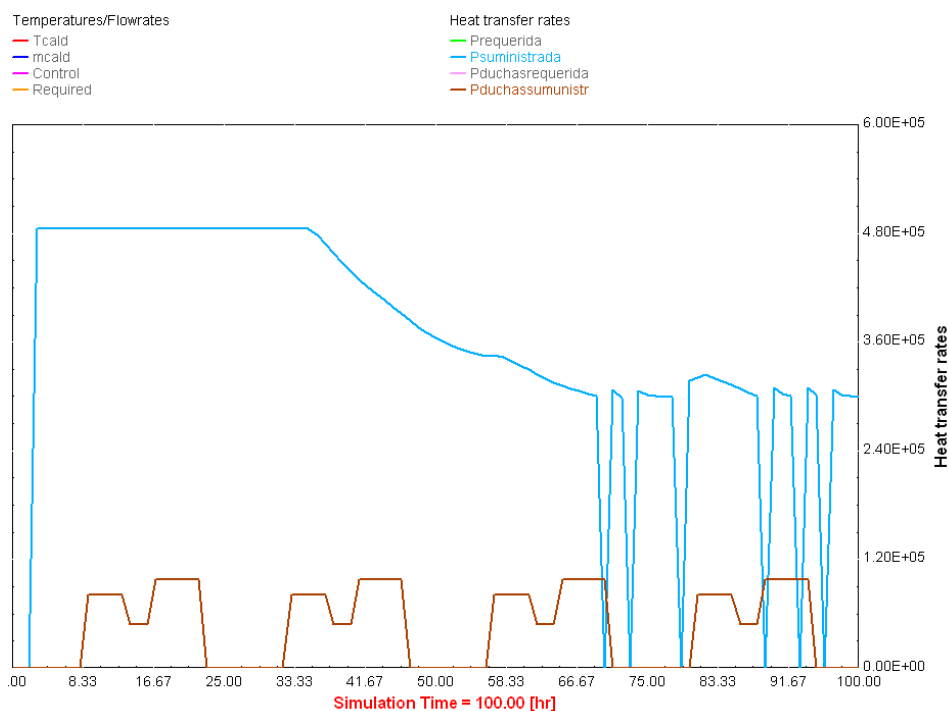


Figura 7.10. Evolución del funcionamiento de la caldera durante el proceso de calentamiento

7.1. VALIDACIÓN DEL MODELO

En los procesos de modelado dinámico un aspecto fundamental estriba en la validación de dicho modelo. Para ello se requiere contrastar los resultados ofrecidos por el modelo, con los registrados por una instalación real. Esta tarea siempre es complicada, ya que no es habitual que se registren datos en instalaciones de este tipo. En cualquier caso se ha tenido acceso a información sobre el consumo registrado/estimado de piscinas reales con las mismas características que la analizada mediante el modelo.

El modelo programado en TRNSYS ofrece una información de consumo de energía térmica, tanto para el calentamiento del vaso de la piscina, como para el calentamiento del agua de las duchas, de $2,3053 \cdot 10^9$ y $3,8668 \cdot 10^8$ kJ respectivamente. Esto hace un total de 747.759 kWh de energía térmica aportada por las calderas.

En la figura 7.11 se puede observar una comparativa entre la información recabada de las instalaciones reales y la ofrecida por el modelo en TRNSYS. Las instalaciones analizadas son las siguientes:

- **Piscina pública de Puerto Lumbreras:** Disponen de datos registrados durante cerca de 2 años. Dispone de una instalación solar térmica que está fuera de servicio, por lo

que no afecta a los datos registrados. El consumo global de energía térmica (vaso más duchas) es de 752.778 kWh/año.

- **Piscina pública de Beniel:** Disponen de datos registrados con bastante detalle, pero para un período que no llega a ser de un año completo (aproximadamente del 80% del año). La piscina no dispone de instalación solar térmica. El consumo global anual es de 786.650 kWh.
- **Piscina pública de Cieza:** En este caso se disponen de las facturas de compra del propano (aproximadamente una factura al mes), pero no de todo un año, sino de varios periodos en distintos años, que suman cerca del 50% del año. El otro 50% ha sido estimado. La piscina dispone de una instalación solar térmica. En cualquier caso su funcionamiento es dudosa dado el alto consumo de energía que se deduce de los datos. El consumo global anual es de 968.760 kWh, lo cual es muy elevado si comparamos con los demás casos, por lo que consideramos que este dato es atípico, bien por errores en la información facilitada, bien por su mala gestión energética (es importante mencionar que esta piscina finalmente cerró sus puertas porque el elevado coste energético la hacía inviable).
- **Piscina pública de Molina de Segura:** No se tienen datos registrados, sino un consumo global a partir del coste de energía térmica de un año completo. Se deduce que la energía consumida es de unos 780.000 kWh/año.

Piscina	Consumo anual	Aclaraciones
Puerto Lumbreras	752.778 kWh	Valor registrado
Beniel	786.650 kWh	Valor registrado/estimado (80%/20%)
Cieza	968.760 kWh	Valor registrado/estimado (50%/50%)
Molina de Segura	780.000 kWh	Valor registrado/estimado (20%/80%)
TRNSYS	747.759 kWh	

Figura 7.11. Comparativa entre valores registrados y resultado del modelado en TRNSYS

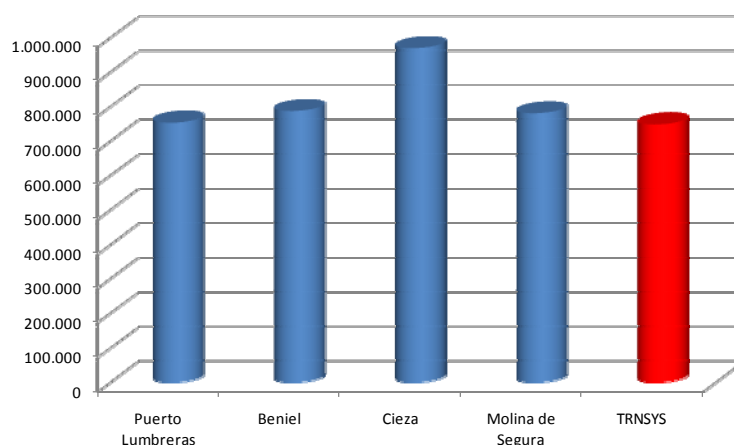


Figura 7.12. Comparativa entre valores registrados y resultado del modelado en TRNSYS (kWh/año)

De esta manera, se puede afirmar que el modelo se adapta de forma aceptable a los datos reales. Sin embargo es necesario mencionar distintos aspectos que no se han tenido en cuenta y que podrían afectar a los resultados ofrecidos por el modelo:

- El modelo supone que la energía térmica requerida para calefactar el ambiente del espacio donde se encuentra el vaso proviene únicamente de la dehumectadora, y no se aporta nada desde la caldera. Esto no es del todo cierto. Hay épocas del año en las que el calor aportado por el condensador de la dehumectadora no es suficiente para mantener la temperatura de dicho ambiente, y se requiere de un aporte por parte de la caldera. En este caso, el consumo de energía térmica originado en la caldera sería algo mayor.
- El modelo no tiene en cuenta la estratificación térmica existente en el vaso de la piscina. Esta estratificación está limitada por el RITE a 1,5°C (apartado 3.1.2). Este hecho ocasionaría que, mientras el agua que se toma del vaso, que se extrae de la zona superficial, pueda estar a 26°C, el fondo podría estar a 24,5°C. El modelo analiza todo el vaso como una única masa. Introduciendo este concepto, el consumo térmico en la caldera sería algo menor.

Como puede observarse, ambos efectos se compensan y sería conveniente analizar, mediante estudios ulteriores, las variaciones que ocasionan dichos fenómenos.

7.2. ANÁLISIS CON INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA

Para evaluar el comportamiento de la piscina al incorporar la instalación solar térmica, primeramente se realiza un estudio de la producción de energía por dicha instalación. Este análisis se realiza para distintos tamaños de la superficie de los captadores solares. Para ello no se ha tenido en cuenta la parte de demanda energética ocasionada para calentar el agua de las duchas, ya que no variará, al ser de aplicación la instalación solar únicamente para el calentamiento del vaso de la piscina.

Superficie captación	Consumo anual	Aporte solar	Factor de aporte solar	kWh/m2
0	640.348 kWh	0 kWh	0%	-
50	606.138 kWh	34.210 kWh	5%	684
100	554.457 kWh	85.891 kWh	13%	859
150	494.614 kWh	145.734 kWh	23%	972
200	405.835 kWh	234.512 kWh	37%	1.173
250	326.990 kWh	313.358 kWh	49%	1.253
300	269.806 kWh	370.541 kWh	58%	1.235

Figura 7.13. Comparativa de producción y consumo para distintos tamaños de instalación solar térmica

De esta forma se definen instalaciones con 50, 100, 150, 200, 250 y 300 m² de superficie de captación. En la figura 7.13 se detallan los resultados de estos procesos de cálculo. También se ha definido el factor de aporte solar para cada instalación (relación entre la energía aportada por la instalación solar y la demandada globalmente por la piscina). Otro parámetro interesante de analizar es la producción de energía específica, por unidad de superficie de los captadores solares.

Puede observarse en la figura 7.14 que al incrementar mucho la superficie de captación, cesa el incremento de producción por parte de la misma. Esto es debido a que en los meses estivales, la producción de la instalación supera la propia demanda del vaso, por lo que esa energía queda desaprovechada.

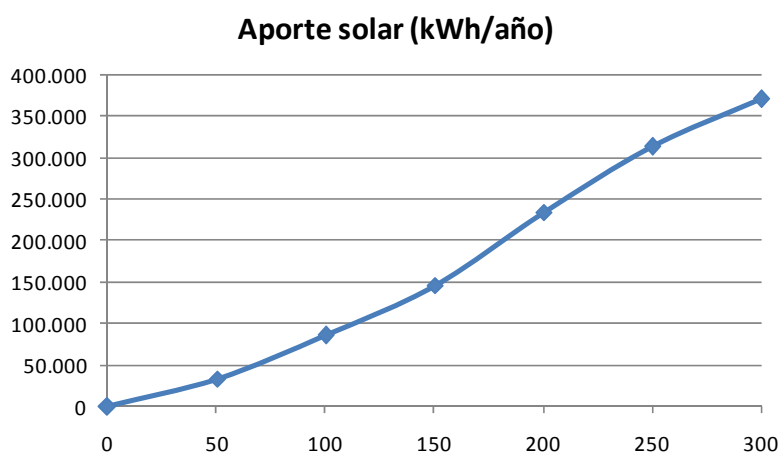


Figura 7.14. Aporte de energía solar en función del tamaño de la superficie de captación

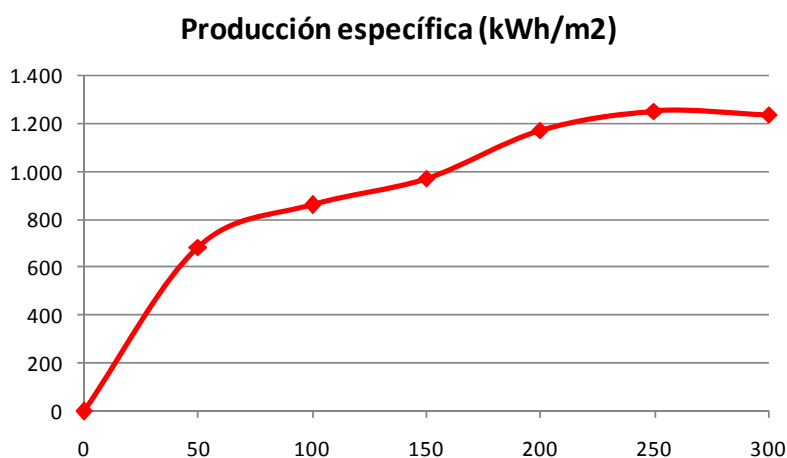


Figura 7.15. Producción específica de energía en función del tamaño de la superficie de captación

La figura 7.15 permite determinar un tamaño óptimo de instalación. En este caso ese tamaño rondaría los 200 m² de superficie de captación, ya que con más superficie, la producción específica de energía se vería incrementada levemente, y ese incremento en el tamaño de la instalación tendría una difícil justificación económica.

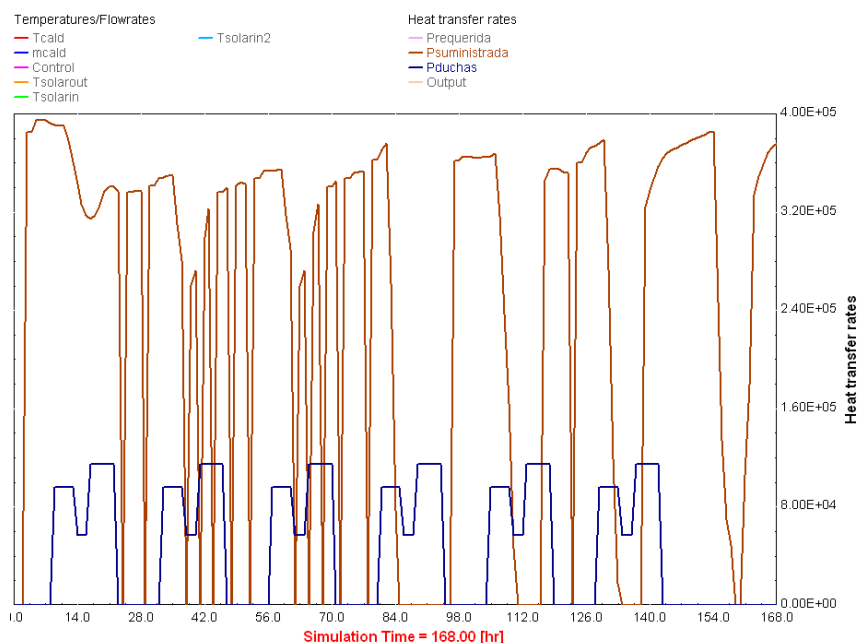


Figura 7.16. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) durante la primera semana del año

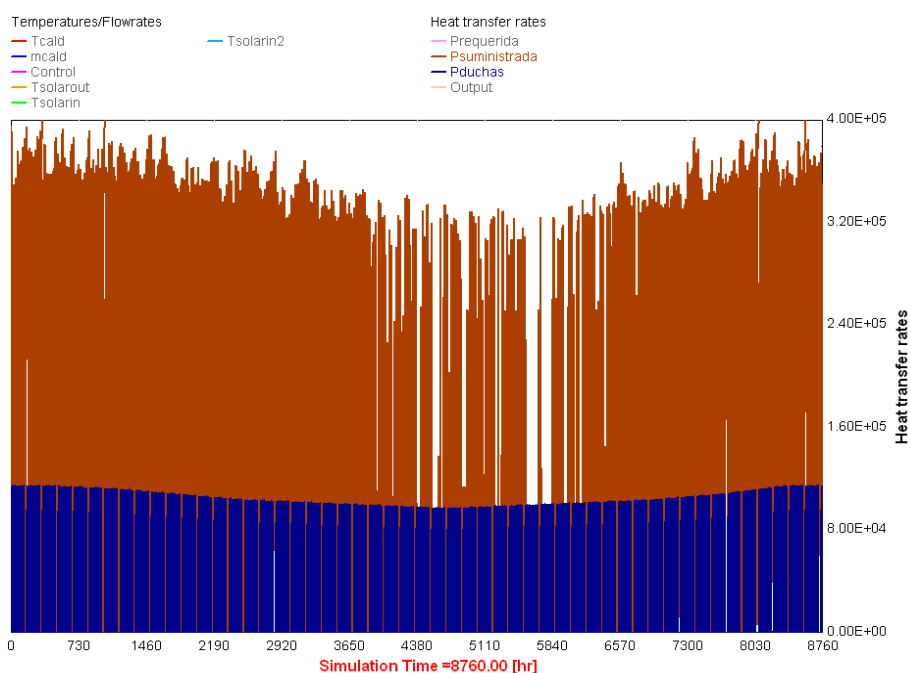


Figura 7.17. Evolución de la potencia suministrada por las calderas (kJ/h) al cabo del año

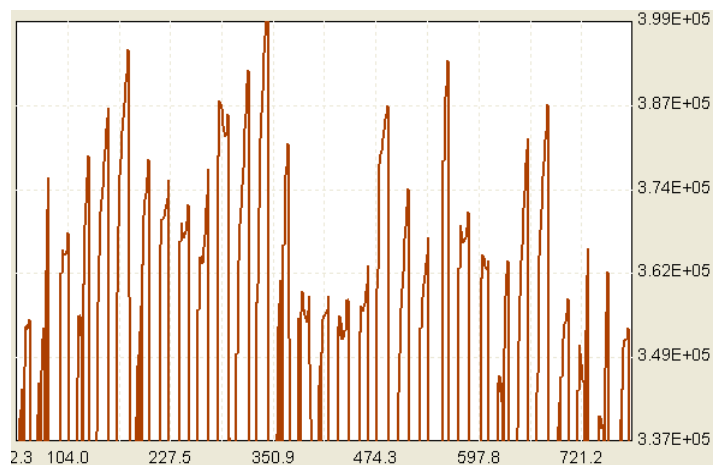


Figura 7.18. Detalle de los picos de potencia suministrada por la caldera del vaso de la piscina (kJ/h)

Por tal motivo, se ha tomado el tamaño de instalación con 200 m² de superficie de captación para realizar un análisis más exhaustivo del comportamiento térmico del sistema. En la figura 7.16 puede observarse el funcionamiento de las calderas durante la primera semana del año (en invierno). Es de destacar que, aunque el balance de energía es positivo (la caldera debe aportar menos energía al vaso), se puede observar un pequeño incremento en los picos de potencia suministrada por la caldera. Este mismo hecho se puede observar en las figuras 7.17 y 7.18.

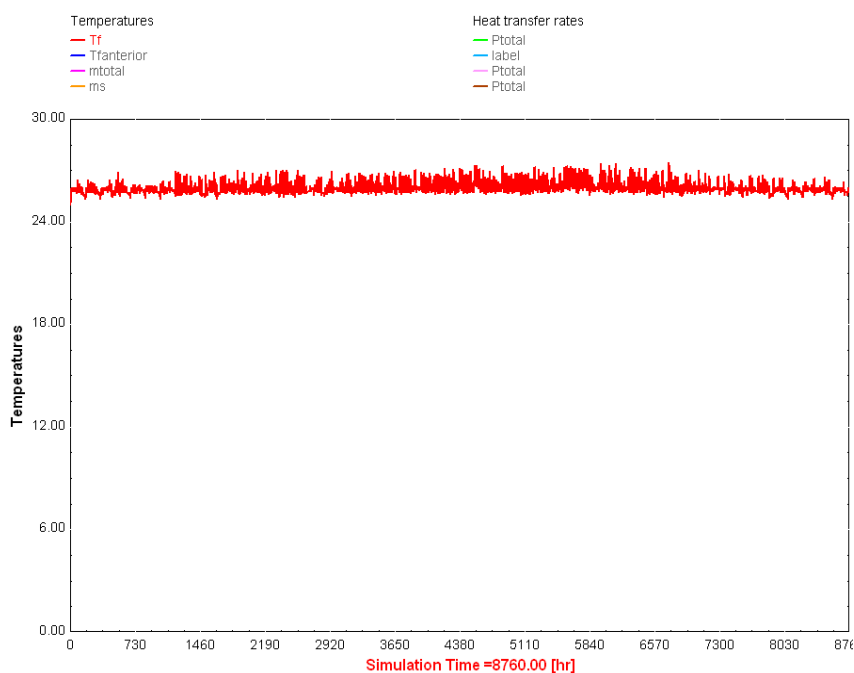


Figura 7.19. Evolución de la temperatura del vaso de la piscina al cabo del año

En la figura 7.19, se observa la evolución de la temperatura del vaso. Puede observarse que esta temperatura, en ocasiones, es superior al valor de la consigna. Esto es debido al hecho de que la producción de la instalación solar térmica carece de control y vierte en el vaso toda la energía que produce. Este hecho es más representativo en la época estival que en la invernal (ver figura 7.20).

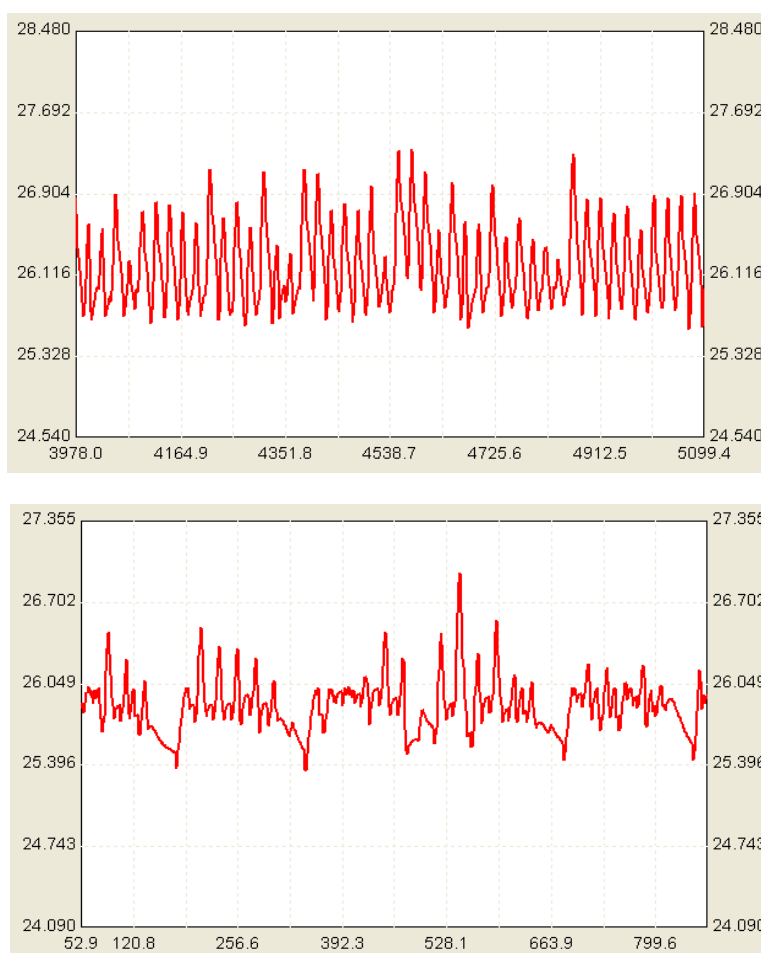


Figura 7.20. Detalle de la evolución de la temperatura del vaso de la piscina (época estival e invernal)

8. CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo se ha desarrollado un componente, que es capaz de analizar el comportamiento térmico del vaso de una piscina climatizada, basado en TRNSYS. El comportamiento de este componente ha sido testado inicialmente en su funcionamiento y posteriormente verificado con datos reales de consumo de piscinas de similares características, lo que permite validar el método.

De esta manera se puede analizar el comportamiento de una instalación real en períodos de tiempo concretos (días, semanas, meses e incluso años). Esto facilita sobremanera el diseño de estrategias de operación a las compañías explotadoras de estas piscinas.

Una conclusión a destacar es la ajustada potencia térmica que se requiere en el generador adaptado a la piscina. Según los cálculos, los picos de potencia rondan los 108 kW. A esto habría que añadir la potencia requerida para calentar el agua de las duchas, que ha sido evaluada en 30 kW, pero que en ningún caso superará los 50 kW. Este hecho contrasta con las potencias de las calderas que disponen estas piscinas, que se sitúan entre los 250 y los 500 kW, y nos da una idea del gran desconocimiento que existe en el correcto dimensionado de este tipo de instalaciones.

También se ha analizado un análisis del tiempo requerido para el calentamiento inicial del vaso, partiendo éste de la temperatura del agua de la red. Este tiempo ronda las 90 horas, es decir, cerca de 4 días, con una caldera de 150 kW.

Por último se ha analizado la incorporación de una instalación solar térmica en el sistema, tal y como exige el Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico HE4 para piscinas de nueva construcción. Los resultados ofrecen una máxima rentabilidad energética en el entorno de los 200 m² de superficie de captación, con un factor de aporte solar del 37%, lo cual es ciertamente bajo para lo requerido en esta norma. Para cumplir con la misma se requerirían superficies de captación del orden de 400 m², o la incorporación de otras energías renovables, como es el caso de la biomasa.

En el caso de utilizar biomasa como combustible, ya no sería necesario disponer de la instalación solar térmica, por lo que el promotor se ahorraría el elevado coste de esta instalación.

Como conclusión final, se podría decir que se ha diseñado una potente herramienta de cálculo que permite conocer el funcionamiento de la piscina climatizada y conocer su demanda energética incluso en la etapa de diseño de la misma, facilitando sobremanera el correcto dimensionado de sus sistemas térmicos.