



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Campus
de Excelencia
Internacional

Tesis Doctoral

***ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA PISCINA
CLIMATIZADA ASISTIDA CON ENERGÍAS
RENOVABLES, MEDIANTE SU MODELADO
DINÁMICO, PARA UNA MEJOR
INTEGRACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR
TÉRMICA Y LA BIOMASA***

Programa de Doctorado

ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

Autor: José Pablo Delgado Marín

Director: José Ramón García Cascales

Cartagena 2019



A mi mujer

Agradecimientos

Este trabajo no hubiese sido posible sin la ayuda de muchas personas y entidades que confiaron en mí en un momento determinado y a las que quiero dar gracias:

Al profesor José Ramón García Cascales, por su dedicación y la paciencia que ha derrochado conmigo en estos siete años de trabajo

Al profesor Francisco Vera, por su ayuda en la configuración de los modelos TRNSYS y el control predictivo

Al Ayuntamiento de Archena, especialmente a su alcaldesa Patricia Fernández y concejal Mario Alcaraz, por haber confiado en mí, por ceder los registros de la piscina de Archena para generar conocimiento, y porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible

A Godofredo Caballero y demás compañeros de su empresa Calfrica, por tanto como me ha enseñado y, sobre todo, por su amistad

A José María López, de la empresa Wiaces, por su ingenio siempre sorprendente en la configuración de controles avanzados

A Ana Cervantes, principal sufridora de nuestras pruebas en la piscina de Archena, y a todo el equipo de monitores, por su dedicación permanente

A mis compañeros de EuroVértice, que han vivido este proceso desde el principio y me han apoyado en todo momento

A toda mi familia, principalmente a mis hijas, Ángela, Fátima y Gloria, por haber sufrido mis ausencias todos estos años

A todos, gracias de corazón

Índice

Índice	7
Índice de Figuras.....	9
Índice de Tablas	14
Resumen	15
Abstract	17
Nomenclatura.....	19
1. Introducción	21
1.1. Características de las piscinas climatizadas	22
1.2. Contextualización y objetivos principales del trabajo	25
1.3. Normativa específica relativa a piscinas climatizadas	28
1.3.1. Normativa de la FINA.....	29
1.3.2. Normativa NIDE	29
1.3.3. Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE).....	30
1.3.4. Código Técnico de la Edificación (CTE)	31
1.3.5. Real Decreto 742/2013.....	32
2. Estado del arte.....	35
3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada ..	45
3.1. Modelado con TRNSYS.....	46
3.1.1. Características principales de TRNSYS	46
3.1.2. Definición de sistemas en TRNSYS.....	48
3.1.3. Simulación del comportamiento térmico de edificios.....	48
3.1.4. Creación de un nuevo componente en TRNSYS	49
3.2. Definición del modelo propuesto	51
3.3. Resultados ofrecidos por el modelo	59
3.3.1. Análisis de la demanda energética del vaso	59
3.3.2. Comparación entre demanda del vaso y calor aportado	63
3.3.3. Evolución de las condiciones de la sala	70
3.3.4. Análisis de la instalación solar térmica	74
4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina	79

4.1. Piscina municipal de Archena	79
4.2. Piscina de El Palmar, en Murcia	82
4.3. Piscina Infante, en Murcia	84
4.4. Piscina Mar Menor, en Murcia	86
4.5. Piscina de Puente Tocinos, Murcia	88
4.6. Instrumentación, control y sistema de adquisición de datos de la piscina de Archena ..	89
4.6.1. Arquitectura del control implementado.....	91
4.6.2. Medios de acceso al control	96
4.6.3. Ventajas del sistema de control y adquisición de datos implementado	98
4.7. Consumo de energía registrado en las piscinas climatizadas analizadas	99
4.8. Validación del modelo propuesto para estimar la demanda térmica de una piscina climatizada.....	101
4.8.1. Fase 1: Validación del modelo con la piscina monitorizada de Archena	104
4.8.2. Fase 2: Validación del modelo con la demanda térmica anual en cinco piscinas...	105
4.9. Conclusiones del proceso de validación del modelo	106
5. Análisis de sensibilidad	107
5.1. Relación entre demanda y temperatura del vaso	107
5.2. Relación entre demanda y diferencia de temperatura entre el ambiente de la sala y el agua del vaso	108
5.3. Relación entre demanda y humedad relativa del aire de la sala.....	109
6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos	111
6.1. El problema del sobrecalentamiento del vaso	112
6.2. Construcción de un modelo de control predictivo para una piscina climatizada.....	113
6.2.1. Estimación de la energía térmica generada por la instalación solar	114
6.2.2. Fundamentos del control predictivo propuesto.....	115
6.3. Modelado de la piscina en TRNSYS incluyendo el control predictivo.....	117
6.4. Aplicación y prueba del control predictivo.....	119
6.4.1. Ajuste del control ESO predictivo	120
6.4.2. Valoración de los ahorros energéticos	123
6.4.3. Análisis del valor de la temperatura en el vaso	124
7. Conclusiones.....	129
8. Bibliografía.....	131

Índice de Figuras

Figura 1. Balance energético de una piscina	35
Figura 2. Creación de un nuevo componente de TRNSYS	49
Figura 3. Información general del nuevo componente.	50
Figura 4. Variables del nuevo componente	50
Figura 5. Editor W	51
Figura 6. Modelo desarrollado en TRNSYS para simular el comportamiento dinámico de una piscina climatizada que dispone de caldera de biomasa e instalación solar térmica (de acuerdo con las características de la piscina municipal de Archena)	52
Figura 7. Flujograma del proceso de cálculo desarrollado para estudiar el comportamiento de la piscina	54
Figura 8. Flujo de calor demandado por el vaso de la piscina (kW), debido a la evaporación, convección, radiación, conducción, renovación del agua, así como el valor total.....	55
Figura 9. Potencia consumida por los equipos para calentar la sala de la piscina (térmica) y para mantener su humedad relativa dentro de los límites requeridos (eléctrica).....	56
Figura 10. Evolución de la humedad relativa del aire de la sala de la piscina	57
Figura 11. Evolución de las temperaturas en la sala, el vaso y las caras interiores de los cerramientos de l edificio	58
Figura 12. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (D_{total}) y la debida a la evaporación (D_{evap}), pérdidas por radiación (D_{rad}) y renovación del agua del vaso (D_{renov}). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Día 10 de enero	60
Figura 13. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (D_{total}) y la debida a la evaporación (D_{evap}), pérdidas por radiación (D_{rad}) y renovación del agua del vaso (D_{renov}). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Semana del 10 al 16 de enero	61
Figura 14. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (D_{total}) y la debida a la evaporación (D_{evap}), pérdidas por radiación (D_{rad}) y renovación del agua del vaso (D_{renov}). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Día 10 de marzo.....	61
Figura 15. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (D_{total}) y la debida a la evaporación (D_{evap}), pérdidas por radiación (D_{rad}) y renovación del agua del vaso (D_{renov}). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Semana del 10 al 16 de marzo.....	62
Figura 16. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (D_{total}) y la debida a la evaporación (D_{evap}), pérdidas por radiación (D_{rad}) y renovación del agua del vaso (D_{renov}). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Día 1 de julio.....	62

Figura 17. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (D_{total}) y la debida a la evaporación (D_{evap}), pérdidas por radiación (D_{rad}) y renovación del agua del vaso (D_{renov}). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Semana del 1 al 7 de julio	63
Figura 18. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de enero	64
Figura 19. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de enero	65
Figura 20. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de marzo.....	65
Figura 21. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de marzo.....	66
Figura 22. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Día 1 de julio.....	66
Figura 23. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Semana del 1 al 7 de julio.....	67
Figura 24. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de enero.....	67
Figura 25. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de enero.....	68
Figura 26. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de marzo	68
Figura 27. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de marzo.....	69
Figura 28. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Día 1 de julio	69
Figura 29. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Semana del 1 al 7 de julio	70
Figura 30. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Q_{calef}). Día 10 de enero.....	71
Figura 31. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Q_{calef}). Semana del 10 al 16 de enero.....	71

Figura 32. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Q_{calef}). Día 10 de marzo	72
Figura 33. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Q_{calef}). Semana del 10 al 16 de marzo	72
Figura 34. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Q_{calef}). Día 1 de julio	73
Figura 35. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Q_{calef}). Semana del 1 al 7 de julio	73
Figura 36. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Día 10 de enero	74
Figura 37. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Semana del 10 al 16 de enero	75
Figura 38. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Día 10 de marzo.....	75
Figura 39. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Semana del 10 al 16 de marzo.....	76
Figura 40. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Día 1 de julio.....	76
Figura 41. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Semana del 1 al 7 de julio.....	77
Figura 42. Imagen de la entrada principal de la Piscina Municipal de Archena	80
Figura 43. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina de Archena	81
Figura 44. Imagen del vaso principal de la piscina de Archena	81
Figura 45. Imagen de ambos vasos de la piscina de Archena: en primer plano el de chapoteo, más al fondo el principal	81
Figura 46. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina de El Palmar, en Murcia	82
Figura 47. Imágenes exteriores e interior de la piscina de El Palmar, en Murcia.....	83
Figura 48. Imágenes exteriores e interior de la piscina Infante, en Murcia	84
Figura 49. Imágenes de la instalación solar existente en la piscina Infante, en Murcia.....	85
Figura 50. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina Infante, en Murcia.....	86
Figura 51. Imágenes exterior e interior de la piscina Mar Menor, en Murcia.....	87

Figura 52. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina Infante, en Murcia.....	87
Figura 53. Imágenes exterior e interior de la piscina de Puente Tocinos, en Murcia.....	88
Figura 54. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina de Puente Tocinos, en Murcia	89
Figura 55. Esquema detallado de la instalación de la piscina de Archena. Imagen de la interfaz de control modo SCADA con los datos registrados	92
Figura 56. Flujograma de funcionamiento del control y sistema de adquisición de datos desarrollado en la piscina municipal de Archena	93
Figura 57. Centralita de control con batería en su armario.....	93
Figura 58. Módulos de comunicación entre las diferentes sondas y la centralita	94
Figura 59. Medidores de consumo eléctrico conectados con la centralita, el primero específico de la deshumectadora, el segundo corresponde al consumo global	95
Figura 60. Modo reducido de acceso al control	97
Figura 61. Pantalla de información dirigida al ciudadano	97
Figura 62. Demanda de calor del vaso principal de la piscina de Archena en un día típico de marzo.....	100
Figura 63. Demanda de calor del vaso principal de la piscina de Archena durante una temporada de utilización completa.....	101
Figura 64. Registros obtenidos en la piscina de Archena en un día típico de marzo	102
Figura 65. Registros obtenidos en la piscina de Archena en un día típico de abril	102
Figura 66. Registros obtenidos en la piscina de Archena en un día típico de mayo.....	103
Figura 67. Comparación de la demanda estimada por el modelo propuesto con los registros de demanda real de la piscina de Archena.....	104
Figura 68. Comparación de la demanda estimada por el modelo propuesto con la demanda real en las cinco piscinas analizadas	106
Figura 69. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de temperatura en el vaso (°C), en las mismas condiciones que la Tabla 11	108
Figura 70. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de T_r-T_p , en las mismas condiciones que la Tabla 12.....	109
Figura 71. Demanda energética anual del vaso calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de humedad relativa de la sala (%), en las mismas condiciones que la Tabla 13	110
Figura 72. Demanda energética del vaso de la piscina de Archena durante un día típico de marzo. La zona sombreada representa el sobrecalentamiento producido por la instalación solar	111
Figura 73. Relación entre la radiación solar recibida y la energía solar generada cada día del año.....	114

Figura 74. Flujograma correspondiente al algoritmo propuesto para el control predictivo ESO	117
Figura 75. Modelo desarrollado en TRNSYS para implementar el Nuevo control predictive ESO	118
Figura 76. Reducción en la demanda energética del vaso en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición <i>Cond2</i>	121
Figura 77. Incremento de calor aportado al vaso por la instalación solar térmica en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición <i>Cond2</i>	121
Figura 78. Factor de aporte solar (porcentaje de calor aportado por la instalación solar térmica con respecto al total aportado) en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición <i>Cond2</i>	122
Figura 79. Porcentaje de ahorro de combustible (biomasa) en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición <i>Cond2</i>	122
Figura 80. Temperatura del agua del vaso durante el mes de febrero, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto	124
Figura 81. Temperatura del agua del vaso durante el mes de abril, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto	125
Figura 82. Temperatura del agua del vaso durante el mes de julio, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto	125
Figura 83. Temperatura del agua del vaso durante el mes de septiembre, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto	125
Figura 84. Temperatura del agua del vaso durante el mes de diciembre, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto	126
Figura 85. Calor aportado al vaso de la piscina (solar y caldera) junto con la evolución de la temperatura del vaso, utilizando un control PID convencional (izda.) y el control predictivo ESO propuesto (decha.), en tres días representativos del año.....	127

Índice de Tablas

Tabla 1. Requerimientos mínimos de aporte con energía solar para el calentamiento de piscinas, según CTE-HE4	32
Tabla 2. Resumen de exigencias térmicas y ambientales sobre piscinas climatizadas dependiendo de la normativa de aplicación	32
Tabla 3. Coeficientes B y C existentes en la literatura para la Ecuación 8.....	39
Tabla 4. Coeficientes D y X existentes en la literatura para la Ecuación 9	39
Tabla 5. Ensayos empíricos para estimar la tasa de evaporación en piscinas desocupadas y su comparación con los modelos de Carrier, Smith et al. y Shah	41
Tabla 6. Principales variables tenidas en cuenta en el componente definido para evaluar la demanda energética de una piscina climatizada.....	52
Tabla 7. Composición de los cerramientos de la sala de la piscina municipal de Archena y su transmitancia térmica	53
Tabla 8. Piscinas en condiciones reales de uso empleadas para validar el modelo propuesto..	99
Tabla 9. Demanda energética real de la piscina de Archena comparada con los resultados del modelo propuesto. Error relativo en %.....	104
Tabla 10. Demanda energética real de las piscinas analizadas comparada con los resultados del modelo propuesto. Error relativo en %.....	105
Tabla 11. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de temperatura en el vaso ($^{\circ}\text{C}$), siendo $T_r = T_p + 1$ y $\Phi = 65\%$.	108
Tabla 12. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de $T_r - T_p$, siendo $T_p = 28^{\circ}\text{C}$ y $\Phi = 65\%$	109
Tabla 13. Demanda energética anual del vaso calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de humedad relativa de la sala (%), siendo $T_p = 28^{\circ}\text{C}$ y $T_r = 29^{\circ}\text{C}$	110
Tabla 14. Análisis estadístico de la temperatura del vaso en función de los 4 parámetros definidos	116
Tabla 15. Porcentaje de ahorro de combustible (biomasa) en cada ensayo llevado a cabo....	123
Tabla 16. Resultado de ajustar el control predictivo ESO con los parámetros $C_{limit}=0.7$ y periodo de apagado anticipado [00:00-13:00]. Unidades en kWh	123
Tabla 17. Valor de la temperatura media mensual y anual del vaso utilizando un control convencional PID y el control predictivo ESO propuesto	126

Resumen

Las piscinas cubiertas climatizadas constituyen equipamientos deportivos con una muy elevada demanda energética. Sin embargo, el conocimiento existente hasta el momento sobre sus necesidades energéticas no ofrece una información lo suficientemente fiable para llevar a cabo el correcto diseño de sus instalaciones térmicas. Este trabajo se basa en la necesidad de un conocimiento más profundo de los mecanismos que generan esta demanda para conseguir predecirla de una manera más ajustada a la realidad y poder mejorar la eficiencia de sus instalaciones térmicas.

El objetivo de este trabajo es definir y validar un nuevo modelo desarrollado específicamente para caracterizar con la suficiente precisión el comportamiento energético dinámico del vaso de una piscina climatizada. El trabajo también contiene un análisis más profundo de las variables que mayor influencia tienen sobre la demanda energética, así como la propuesta de un modelo de control predictivo que mejoraría la integración de dos fuentes de energía renovables como son la solar térmica y la biomasa. Para ello, se han desarrollado las siguientes tareas:

- Análisis del marco regulatorio regional, nacional e internacional.
- Análisis del estado del arte para la estimación de cargas térmicas en el vaso de una piscina climatizada.
- Definición de un modelo de simulación dinámica del comportamiento del vaso de una piscina climatizada.
- Validación del modelo de simulación, para lo que se han instrumentado completamente las instalaciones de la piscina municipal de Archena y se han utilizado datos de consumo recogidos de otras cuatro piscinas del municipio de Murcia.
- Estudio de sensibilidad para conocer la importancia de los parámetros clave de funcionamiento en el consumo energético global de la piscina.
- Propuesta de control predictivo con el fin de reducir el consumo de la caldera mediante un mejor aprovechamiento de la energía solar térmica.

Los trabajos de simulación dinámica se han llevado a cabo utilizando el programa de simulación de estados transitorios TRNSYS (versión 17). Para la validación del modelo se ha sensorizado completamente una piscina real, de piscina municipal de Archena, en la Región de Murcia. Esto ha sido posible gracias al convenio de colaboración suscrito entre el Ayuntamiento de Archena y la Universidad Politécnica de Cartagena a tal fin.

El modelo, una vez validado, demuestra la utilidad de las herramientas de simulación dinámica para el análisis y mejora de instalaciones térmicas complejas. Dicho modelo supone un método preciso para la estimación de la demanda térmica del vaso de una piscina climatizada con un error relativo global frente al caso real del -1,77%, estando en todo momento por debajo del 10%.

Finalmente, gracias al modelo se han podido detectar ciertas ineficiencias en el comportamiento energético de piscinas climatizadas que dispongan de instalaciones térmicas basadas en solar

más caldera (eventualmente de biomasa). Con el fin de mejorar la eficiencia energética a través de una mejor integración de ambas fuentes, se ha desarrollado un modelo de control predictivo basado en la tecnología *Early Switch-Off* (ESO) o apagado anticipado de la caldera.

El nuevo control propuesto se ha podido ajustar y probar de igual forma mediante la simulación dinámica del vaso de la piscina. Los resultados ofrecen una reducción de la demanda del vaso del 18,76% utilizando un 42,64% menos de combustible, en comparación con la utilización de un control PID convencional.

En consecuencia, las soluciones propuestas en este trabajo suponen un avance en el conocimiento que permitiría mejorar la eficiencia energética de estas instalaciones tan consumidoras de energía, reduciendo el riesgo económico y financiero derivado de su explotación.

Abstract

Indoor swimming pools are high energy demand facilities. Present knowledge about their energy demand does not result reliable information for a correct design of their thermal installation. A deeper knowledge about actual energy needs of these installations is then necessary to improve its efficiency.

The objective of this work is to define and validate a new and specific model for the characterisation of indoor swimming pool energy dynamic behaviour with enough accuracy. To do so, a module including evaporation heat losses calculation is proposed and integrated as a new defined component in TRNSYS software for a dynamic simulation of the problem, for the shake of more accurate results. The work also includes deeper analysis of the key parameters relative to its energy demand, as well as a new proposed predictive control to improve the integration between two renewable energy sources such as thermal solar and biomass. For this, the following tasks have been developed:

- Analysis of the regulatory framework at regional, national and international level.
- Analysis of the state of the art related the estimation of thermal loads in indoor swimming pools.
- Development of a dynamic simulation model to study the energy behaviour of an indoor swimming pool.
- Validation of the proposed model, for which thermal installations of Archena municipality's swimming pool have been entirely monitored.
- Sensitivity analysis to know the importance of pool's key parameters in its energy behaviour.
- Predictive control proposed to reduce fuel consumption by a better exploitation of the solar thermal installation.

For validating the model, a two-stage procedure has been implemented. Firstly, a full monitoring system has been performed at a public indoor swimming pool in the municipality of Archena, Spain. This has been possible thanks to a specific agreement signed between the Municipality of Archena and the Polytechnic University of Cartagena. Secondly, data from other four swimming pools have been also used to confirm the good behaviour of the model. The work carried out validates the model and demonstrates the usefulness of dynamic modelling tools to solve complex thermal situations like the case of heating demand of an indoor swimming pool. The proposed model results in an accurate method to estimate heating demand, being relative difference limited (always less than 10% and mean error of -1.77%). The new dynamic simulation model has been finally used for a sensitivity analysis of the energy demand in relation with the main control parameters of the facility, recommending set points for a more efficient work of these facilities.

Finally, thanks to this work, energy inefficiencies in indoor swimming pools using hybridised solar+boiler systems (eventually biomass-fired) for thermal supply have been detected. To improve the energy efficiency in these cases, a new module performing a Model Predictive Control (MPC) based on an Early Switch-Off (ESO) strategy has been developed. The proposed control has been adjusted by using a dynamic simulation process in TRNSYS, implemented over the public indoor swimming pool in the municipality of Archena, Spain. Results indicate

that ESO predictive controls can reduce a swimming pool's energy demand by 18.76% using 42.64% less fuel compared to a Proportional Integral Derivative (PID) conventional control, while keeping the pool's thermal conditions in line with national and international swimming standards.

Thus, the solutions proposed in this work offer a knowledge advance to improve the energy efficiency in thermal installations of indoor swimming pools reducing their financial risk.

Nomenclatura

Magnitudes

A	Área (m ²)
c	Calor específico (kJ/kg K)
E	Tasa de evaporación (kg/h)
h	Coefficiente de transmisión de calor por convección (W/m ² K)
L	Calor latente de vaporización del agua (kJ/kg)
m	Masa (kg)
\dot{m}	Gasto másico (kg/s)
N	Número de ocupantes en la piscina (–)
N^*	Número de ocupantes por unidad de superficie del vaso (m ⁻²)
P	Presión de saturación (Pa)
\dot{Q}	Potencia térmica (kW)
R	Tasa de renovación diaria (%)
T	Temperatura (°C)
t	Lapso de tiempo (h)
U	Conductividad térmica (W/m ² K)
v	Velocidad (m/s)
w	Humedad específica (kg agua/kg aire seco)
Φ	Humedad relativa del aire (%)
ρ	Densidad (kg/m ³)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann: 5.67×10^{-8} W/(m ² K ⁴)

Subíndices

a	aire
b	fondo del vaso
$boil$	caldera
$cond$	conducción térmica
$conv$	convección térmica
$evap$	evaporación
f	final
g	terreno
i	inicial
occ	piscina ocupada
p	vaso de piscina
r	sala de piscina

<i>rad</i>	radiación térmica
<i>renov</i>	proceso de renovación de agua
<i>s</i>	paredes laterales del vaso
<i>sol</i>	instalación solar
<i>sp</i>	consigna
<i>supp</i>	aportado
<i>tot</i>	total
<i>w</i>	agua
<i>wp</i>	agua del vaso
<i>wn</i>	agua de la red
<i>wall</i>	muros de la sala de piscina

Iniciales

ACS	Agua Caliente Sanitaria
DR	Reducción de la Demanda
ESO	Apagado Anticipado
HVAC	Ventilación, Calefacción y Aire Acondicionado
MPC	Modelo de Control Predictivo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
TRNSYS	Transient System Simulation Tool

1. Introducción

En las últimas décadas, con la implantación de la sociedad del bienestar, la actividad física ha pasado a ser uno de los hábitos más consolidados de nuestros ciudadanos. La práctica cotidiana del deporte es algo palpable en nuestra sociedad: fútbol, *running*, pádel, baloncesto, etc. Pero entre todas las actividades deportivas, una de las más recomendables por todos los expertos, es la práctica de la natación. Este ejercicio, para llevarlo a cabo durante todo el año, requiere de unas instalaciones muy específicas, que sean capaces de mantener el medio en el que se practica el deporte (el agua) en unas condiciones térmicas y de salubridad determinadas: las piscinas climatizadas.

Durante la última década se ha vivido un florecer de este deporte y, por tanto, de este tipo de piscinas. La Región de Murcia no ha sido ajena a este desarrollo. En estos años, hemos sido testigos de la construcción de un número muy importante de piscinas climatizadas en la mayor parte de nuestros municipios. Salvo casos excepcionales en los que el tamaño de la piscina es de 50 x 25 m (dimensiones para competiciones olímpicas), en la mayoría de las ocasiones, las piscinas que se han erigido son de dimensiones semiolímpicas (principalmente 25 x 12,5 m). Usualmente, estos vasos destinados a la práctica de la natación van acompañados de otros de menor tamaño denominados “de chapoteo”, fundamentalmente destinados al uso infantil y de personas mayores.

Las piscinas climatizadas son muy intensivas en demanda energética, tanto eléctrica como, sobre todo, térmica:

- **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 para el trasiego y depuración del agua y otros pequeños equipos.
- **Energía térmica:** para mantener la temperatura de los vasos, que están permanentemente perdiendo calor con el entorno, para calentar el agua de aportación de la red en el proceso de renovación del agua por cuestiones sanitarias, para calefactar el ambiente de la sala de la piscina y resto del edificio, 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: equipos de compresión en la deshumectadora, bombas y sistemas de iluminación interior. Aun así, el reciente desarrollo de los sistemas de autogeneración y autoconsumo eléctrico basados en el aprovechamiento de

fuentes de energía renovables, principalmente solar fotovoltaica, abre todo un campo para reducir la demanda eléctrica de la red por parte de este tipo de sistemas.

Sin embargo, en el segundo caso, la demanda no sólo es muy alta (rondando los 800 MWh/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 puestas en marcha en la región hayan visto comprometida su viabilidad, debido a sus elevados costes energéticos, y hayan tenido que cesar su actividad.

1.1. 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 su superficie 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:** cubeta de fábrica de ladrillo u hormigón recubierta de gres, gresite, pintura o prefabricada en poliéster, 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 a través de él. También sirve para un desaguado rápido.
- **Rebosadero:** canaleta alrededor de toda, o de parte del perímetro de la piscina, hacia donde desborda el agua de la piscina y a través de un colector la dirige al vaso de compensación o depósito regulador.
- **Vaso de compensación:** almacena el agua que desborda por el rebosadero y también recibe el agua de renovación. El grupo de bombeo toma su aspiración desde este depósito para filtrarla y devolverla ya tratada a la piscina.
- **Skimmer:** abertura ubicada en los muros de la piscina y a la altura de la superficie del agua, para la aspiración hacia la bomba cuando no existe rebosadero.
- **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:** formado por una o varias bombas, se encarga de recircular toda el agua de la piscina en un tiempo prefijado, aspirándola del fondo, de los *skimmer* o vaso de compensación. Reuniéndola en un colector, junto con la de la barredera, la impulsa hacia los filtros de arena y los dispositivos de tratamiento químico y después a la piscina.
- **Filtro:** recipiente metálico o de poliéster reforzado con 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 un filtro 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 en el caso de piscinas públicas.
- **Impulsión:** conjunto de tuberías que se ramifican bajo el fondo de la piscina o en sus muros, por las que se devuelve el agua filtrada y desinfectada a la piscina. También pueden servir para conducir el agua de llenado de la piscina procedente de la red local de abastecimiento de agua.
- **Sistema de desinfección:** Conjunto de dispositivos que aplican al agua el método químico para su tratamiento y desinfección.
- **Sistema de acondicionamiento térmico:** Representa toda la instalación térmica que es capaz, inicialmente de elevar la temperatura del agua del vaso hasta el nivel necesario para su actividad específica, y posteriormente de mantenerla estable en ese nivel térmico. Normalmente este sistema está compuesto por una o varias calderas, intercambiadores de calor, bombas, etc. En algunos casos, además integra una instalación solar térmica que con su aportación reduce el consumo de combustible en la caldera.

Por otro lado, 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 de la de adultos de forma que impida que los niños puedan acceder fácilmente a los otros vasos. Su funcionamiento será autónomo. Su profundidad máxima es 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 hasta los 1,40 m, con pendiente máxima del 10%,

debiendo quedar señalizada esta profundidad y a partir de este punto podrá aumentar progresivamente hasta una profundidad máxima de 3 m.

- **Deportivas y de competición:** tendrán las características determinadas por los organismos correspondientes o las normas internacionales para la práctica del deporte.

En el caso de las piscinas deportivas, la norma de aplicación será la Normativa sobre Instalaciones Deportivas y de Esparcimiento (NIDE), que se comentará más adelante.

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

- **Piscina con *skimmers* o espumaderas:** En este caso, el agua contenida es aspirada por el grupo de bombeo en su superficie, empleando unos dispositivos denominados *skimmers* o espumaderas, mientras que el agua del fondo es aspirada por un sumidero. Ambas en una proporción del 50%. Este tipo de piscinas, son las que han predominado hasta estos últimos años ya que son fáciles de construir y el sistema es apto para todos los tipos constructivos del vaso. 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 10-15 cm 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, lo que se traduce en un gasto energético, de agua y de productos químicos para su tratamiento. También requiere un control del nivel del agua en el vaso, ya que el nivel debe mantenerse siempre en la mitad de la abertura de los *skimmers* para que la piscina tenga un buen funcionamiento.
- **Piscinas desbordantes, con canal perimetral o rebosadero:** Si a un recipiente con agua hasta el borde se le añade más agua, inevitablemente se desborda. Este es el caso de las piscinas desbordantes, en las que el agua que se desborda se canaliza hacia el sistema de filtrado que nuevamente la envía hacia la piscina, forzando un desbordamiento continuo. En este tipo de piscinas, la impulsión del agua se realiza desde la zona más profunda y en sentido ascendente, no dejando descender la suciedad, que 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. 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 las labores de mantenimiento para la limpieza de fondos es muy bajo y la calidad del agua obtenida es muy superior. Una característica de este tipo de sistema es que el volumen de agua

desalojado por los bañistas ha de ser almacenado en un depósito de reserva o vaso de compensación, no necesario en caso de piscinas con *skimmers*, que absorben dicho volumen elevando el nivel de la piscina. Por ello, el diseño de estas piscinas requiere de un cuidadoso estudio hidráulico para evitar que las bonanzas del sistema no se conviertan en deficiencias.

En las piscinas privadas el diseño de la piscina se determina en función al espacio disponible y a su integración en el entorno. En las piscinas públicas, no existen normas sobre el tamaño de su forma o tamaño, 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, bastaría situarla entre 1 y 1,5 m, pero la normativa específica requiere una profundidad mínima de entre 1,8 y 2,0 m, recomendando en todos los casos la profundidad mínima de 2,0 m y un fondo muy plano con una pendiente mínima del 2%.

1.2. Contextualización y objetivos principales del trabajo

La falta de conocimiento sobre los mecanismos que derivan en la demanda térmica de la piscina hace que, en el momento del diseño, el dimensionado de las instalaciones térmicas no se lleve a cabo de una manera ajustada y eficiente. En general, en una piscina cubierta, el agua y el aire del ambiente de la sala en la que se ubica, se enfrían cuando las condiciones exteriores suponen una pérdida de calor, siendo necesario calentarlos para garantizar unas condiciones satisfactorias de confort en el interior. Estas condiciones están determinadas mediante diferente normativa regional, nacional e internacional que se detallará más adelante.

El aire ambiente pierde temperatura principalmente por la renovación de aire necesaria y por la pérdida de calor a través de los cerramientos de la sala en la que se encuentra la piscina. Por este motivo es necesario calentarlos de manera continua para mantener la temperatura de consigna.

En cuanto al agua del vaso de la piscina, son distintos los mecanismos que influyen en esta pérdida de calor y que cuyo análisis será objeto del presente trabajo.

Esta pérdida de calor es importante, lo que hace de las piscinas climatizadas instalaciones con elevada demanda de energía y, por tanto, elevados costes de explotación que ponen en riesgo su viabilidad económico-financiera. En este contexto, el uso de energías renovables contribuye de forma determinante a reducir estos costes, mejorando su viabilidad. El caso particular de piscinas climatizadas calentadas mediante sistemas híbridos compuestos por una instalación solar térmica apoyada con calderas de biomasa se han mostrado muy competitivos.

Sin embargo, el conocimiento de los mecanismos que producen la pérdida de calor, lo que incluye el comportamiento dinámico del vaso, no ha evolucionado de la mano del número de piscinas construidas. Este hecho ocasiona un dimensionado de sus instalaciones térmicas poco fiable, contribuyendo de manera importante a una ineficiencia energética que agrava el problema referido sobre el coste de explotación de estos centros deportivos.

En efecto, una infraestimación de la demanda de calor puede conllevar la selección de equipos con una potencia inferior a la óptima necesaria. En tal situación, la falta de potencia térmica afecta a la calefacción, tanto a la piscina como a la sala que la alberga, repercutiendo sobre el incumplimiento de la normativa referente a las condiciones térmicas y de humedad y sobre el confort de los bañistas. En tales casos, normalmente se da prioridad al calentamiento del vaso, por lo que se descuida la calefacción del aire ambiente. Además, la reducción de temperatura en el aire afecta directamente a su nivel de humedad relativa, viéndose incrementada aun manteniéndose los niveles de humedad específica contenida en el aire. Consecuentemente, el incremento de humedad relativa supone mayor necesidad de mantenimiento en las instalaciones por condensaciones indeseadas y corrosión de metales o descomposición de otros materiales como la madera.

Por otro lado, una sobreestimación de las necesidades energéticas y de las instalaciones térmicas produce ineficiencias económicas por el incremento del coste de los equipos, y energéticas por suponer un rendimiento medio estacional inferior al trabajar la instalación a una carga parcial más baja de lo previsto. Esto, además de suponer un mayor consumo de energía, incrementando los costes de explotación, conlleva un mal funcionamiento de los equipos y un mayor coste de mantenimiento.

De manera que, el elevado consumo de las piscinas climatizadas unido al incorrecto dimensionado de sus instalaciones térmicas ha supuesto, en general, unos costes energéticos muy elevados que las administraciones locales propietarias han tenido que mitigar para no comprometer la viabilidad de estas infraestructuras deportivas. Para ello, la alternativa más

común es la sustitución de los sistemas térmicos tradicionales, que consumen combustibles fósiles (gasóleo C, propano o gas natural), por otros que aprovechen las fuentes de energía renovables, más económicas y limpias que las anteriores.

De entre las opciones barajadas, los sistemas basados en el binomio solar térmica más biomasa son los que ofrecen una solución óptima para reducir los costes energéticos de la instalación. Pero de nuevo, la falta de registros reales de consumo y de conocimiento sobre el comportamiento energético de las piscinas hace que, en la mayoría de las ocasiones, el dimensionado y la integración de ambas energías renovables generen incertidumbre técnica y merme la eficacia de la inversión.

Así, disponer de un conocimiento preciso sobre el comportamiento del vaso es fundamental para proceder a una toma de decisiones correcta a la hora de dimensionar las instalaciones térmicas de la piscina. La simulación dinámica del vaso y sus equipos constituye una solución válida para el correcto dimensionado de las instalaciones así como para predecir la demanda energética del vaso en distintas situaciones, ayudando a un análisis de viabilidad económica más precisa.

El presente trabajo trata de aportar luz sobre esta falta de conocimiento, necesaria para el buen funcionamiento de las piscinas climatizadas. Y para ello se ha desarrollado un modelo para simular dinámicamente el comportamiento de la piscina. De esta manera, será sencillo conocer, en la fase de proyecto, la demanda energética del vaso, con una precisión destacable. Además, esta aportación al conocimiento permitirá la utilización de controles predictivos capaces de tomar decisiones anticipadamente, sabiendo de antemano cómo se va a comportar el vaso de la piscina.

Para el desarrollo de este trabajo se han marcado los siguientes objetivos principales:

- Conocer en detalle el comportamiento dinámico del vaso de una piscina climatizada.
- Sensorizar una piscina funcionando en condiciones reales, con el fin de disponer de datos de consumo fiables.
- Desarrollar un modelo matemático que incorpore las ecuaciones que describen los flujos de calor que intervienen en el vaso y utilizarlo para la simulación dinámica del mismo.
- Evaluar la relación entre los parámetros clave de funcionamiento de la piscina y su demanda térmica.
- Desarrollar las bases de una nueva estrategia de control predictivo aplicable a piscinas climatizadas que dispongan de sistemas térmicos basados en el binomio solar térmica más biomasa.

El resultado del trabajo realizado, contenido en esta memoria, se ha estructurado de la siguiente manera:

- Análisis del marco regulatorio regional, nacional e internacional, dada la importancia que tiene esta normativa y sus exigencias para el comportamiento energético de la piscina.
- Análisis del estado del arte, en lo referente a la evaluación de las cargas térmicas en el vaso de una piscina, así como a los modelos de control predictivos que pudieran resultar en una mejora del desempeño energético de estas instalaciones.
- Definición de un modelo dinámico del vaso de una piscina, basado en el programa de simulación dinámica TRNSYS, que ha servido para conocer en mayor profundidad el comportamiento energético de la piscina.
- Validación del modelo, para lo que se han instrumentado completamente las instalaciones de la piscina municipal de Archena, cuya información ha sido determinante para corroborar la veracidad de los resultados ofrecidos por el modelo. También se han utilizado datos de consumo de otras cuatro piscinas climatizadas del municipio de Murcia.
- Estudio de sensibilidad para conocer la importancia de los parámetros clave de funcionamiento en el consumo energético global de la piscina.
- Finalmente, se ha propuesto un modelo de control predictivo basado en el apagado anticipado de la caldera de biomasa aprovechando la gran inercia térmica de la piscina. Todo ello con el fin de reducir la demanda energética de la piscina y sus costes asociados.

1.3. Normativa específica relativa a piscinas climatizadas

La normativa de aplicación que afecta a las condiciones térmicas de la piscina es diversa y se podría decir que dispar en cuanto a los requisitos térmicos impuestos a las piscinas. Dependiendo del nivel de uso de la piscina, internacional, nacional o regional, es necesario mencionar, las siguientes disposiciones:

- Normativa de instalaciones de la Federación Internacional de Natación (FINA Facilities Rules)

- Normativa sobre Instalaciones Deportivas y de Esparcimiento (NIDE). Normas reglamentarias y norma de proyecto.
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE-2007). Real Decreto 1027/2007, en su versión consolidada.
- Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 314/2006 y la actualización del Documento Básico sobre Ahorro de Energía. Contribución Solar Mínima. CTE-DB-HE4, modificación de 2017.
- Real Decreto 742/2013, de 27 de septiembre, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de las piscinas
- Decreto nº 58/1992, de 28 de mayo, por el que se aprueba el reglamento sobre condiciones higiénico-sanitarias de las piscinas de uso público de la Región de Murcia.

1.3.1. Normativa de la FINA

La Federación Internacional de Natación establece las dimensiones y tolerancias fundamentales que toda piscina ha de tener para la práctica de la natación, a nivel internacional. Para ello, establece dos categorías, para vasos de 25 m y de 50 m de longitud. Los primeros se pueden utilizar para la práctica del deporte y celebraciones de campeonatos hasta nivel mundial. Sin embargo, las competiciones olímpicas requieren piscinas de 50 m de longitud. Algo similar ocurre con su profundidad. Mientras que para la práctica habitual bastan 1,35 m de profundidad mínima en el vaso, en competiciones a nivel de mundial y olimpiadas, se exige un mínimo de 2 m de profundidad. La temperatura del agua será entre 25 y 28°C, siendo constante durante la competición.

1.3.2. 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 (Consejo Superior de Deportes). La norma también define aspectos relacionados con la forma y dimensiones del vaso, las playas o andenes, nivel de iluminación, así como las 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.

Por otro lado, también establece que el aire ambiente de toda sala 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 .

Por otro lado, la humedad relativa de la sala debe estar comprendida entre el 55% y 70% siendo recomendable utilizar como valor de diseño el 60%.

1.3.3. Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE)

El RITE está publicado por el Real Decreto 1027/2007 y sus modificaciones correspondientes a los reales decretos 1826/2009 y 238/2013. Este determina que la temperatura del agua de una piscina, salvo las de usos terapéuticos, se mantendrá entre 24 y 30°C . Dicha temperatura se ajustará al nivel de uso, es decir, a 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 soliciten temperaturas de hasta 30°C .

Además, establece criterios referentes a la estratificación térmica en el vaso, de manera que la tolerancia de temperatura en el espacio, tanto horizontal como verticalmente, no debe ser mayor de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Para 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 *skimmers*. En tal caso, la red de distribución de agua caliente debe ser independiente de la de tratamiento sanitario.

El RITE también menciona que la temperatura del aire en salas que alojen 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 de 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.

En cuanto a la humedad relativa, ésta se mantendrá por debajo del 60 al 65%, con el fin de evitar condensaciones sobre las superficies en contacto con el exterior.

Por otro lado, el RITE indica, en el apartado 1.1.4.2.2, que para mantener una calidad mínima en el aire, las piscinas quedan incluidas en la categoría IDA2, determinando 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. Las salas de las piscinas deberán mantenerse en depresión, con respecto a los locales contiguos, entre 20 y 40 Pa, con el fin de que el aire húmedo no penetre en el resto del edificio.

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.

Cuando la piscina esté a régimen pero no esté en uso, el RITE establece que la lámina de agua debe estar protegida con una barrera térmica (manta térmica).

El mantenimiento de la humedad relativa del ambiente dentro de los límites indicados puede lograrse por medio de una bomba de calor, enfriando, deshumectando y recalentando el aire al mismo tiempo.

1.3.4. Código Técnico de la Edificación (CTE)

El Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico sobre Ahorro de Energía HE-4 referente a la Contribución Solar Mínima (CTE-HE4), establece que en el caso de piscinas cubiertas, debe existir una contribución solar mínima de entre el 30% y el 70%, según la zona climática en la que se encuentre la instalación.

Tabla 1. Requerimientos mínimos de aporte con energía solar para el calentamiento de piscinas, según CTE-HE4

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50 – 5.000	30	30	40	50	60
5.000 – 10.000	30	40	50	60	70
> 10.000	30	50	60	70	70

El documento determina también los casos en los que está justificado no alcanzar los niveles de aporte solar solicitados. Entre ellos se encuentran los casos en los que se cubra ese aporte energético mediante el aprovechamiento de otras energías renovables, como pueda ser la biomasa.

1.3.5. Real Decreto 742/2013

El Real Decreto 742/2013, de 27 de septiembre, establece los criterios técnico-sanitarios de las piscinas a nivel nacional. Si bien mantiene la temperatura del vaso en 24-30°C, limita la humedad relativa del aire al 65% y la temperatura seca del aire de los locales que albergan las piscinas climatizadas en 1-2°C por encima de la del agua del vaso

Tabla 2. Resumen de exigencias térmicas y ambientales sobre piscinas climatizadas dependiendo de la normativa de aplicación

Normativa	Temp. agua (°C)	Temp. aire (°C)	Humedad Relativa (%)	Renovación agua (% diario)
FINA	25-28	-	-	-
NIDE	24-28	+2-3	55-70	-
RITE	24-30	+2-3	60-65	-
CTE-HE	-	-	-	-
D 58/1992	24-30	±2	65-75	>2,5
RD 742/2013	24-30	+1-2	<65	-

Además cada comunidad autónoma establece su reglamento específico sobre las condiciones higiénico-sanitarias de las piscinas de uso colectivo. Es el caso del Decreto 58/1992, de la Región de Murcia.

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 $\pm 2^\circ\text{C}$.

Además, establece que 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, con el fin de mantener los parámetros organolépticos, físicoquímicos y microbiológicos. 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 completo.

2. Estado del arte

En una primera aproximación, son distintos los mecanismos los que influyen en la pérdida de calor del vaso:

- Por la evaporación del agua de la piscina
- Por las pérdidas por transmisión de calor (conducción, convección y radiación)
- Por la renovación continua del agua que exige la normativa

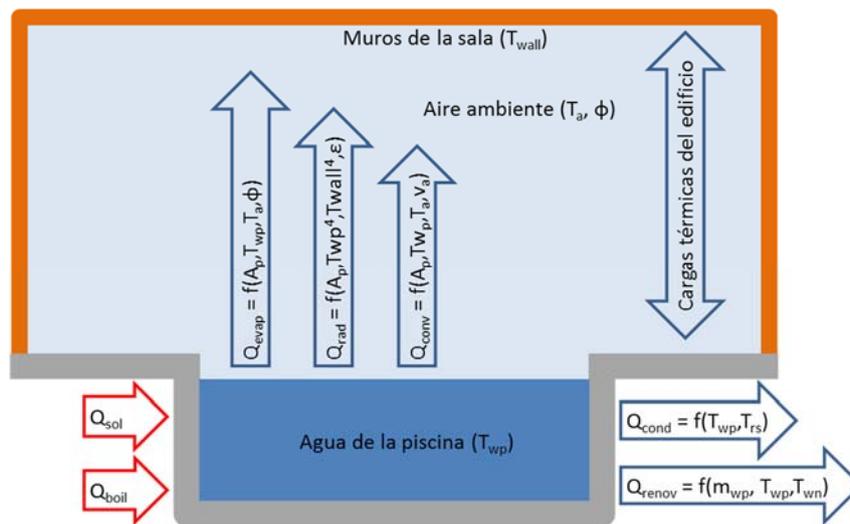


Figura 1. Balance energético de una piscina

De entre ellos, el efecto de enfriamiento producido por la evaporación del agua es, con diferencia, el más importante. De hecho, se ha podido demostrar que las pérdidas por evaporación del agua en el vaso suponen el 60% de la demanda total (Zuccari et al. 2017).

Pero además de la pérdida de calor debida a la evaporación del agua, los mecanismos de transmisión basados en la conducción, convección y radiación, suponen pérdidas menores que, cuanto menos, han de ser estimadas. Finalmente y no menos importante, las pérdidas de energía debidas a la renovación del agua del vaso por causas sanitarias han de ser tenidas en cuenta.

Así, el balance de energía en una piscina se puede definir con la siguiente expresión (Zuccari et al. 2017):

$$\dot{Q}_{supp} - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{renov} = m_{wp} c_{wp} \frac{dT_{wp}}{dt} \quad (1)$$

Sin embargo, las pérdidas debidas a la convección serán despreciables, ya que la diferencia de temperatura entre el agua y el ambiente es muy pequeña. Además, al ser superior la temperatura del aire a la del agua, el mecanismo de convección daría como resultado una ganancia de calor y no una pérdida. Por tal motivo, las pérdidas convectivas en piscinas climatizadas no suelen ser tenidas en cuenta.

Estos mecanismos de transferencia de calor sobre piscinas ya fueron mostrados por Brambley and Wells (1983) y utilizados por Delgado et al. (2013).

La evaporación de agua produce, en primer lugar, un efecto de refrigeración por el propio efecto del cambio de fase (calor latente) y en segundo lugar, una pérdida de agua que ha de ser repuesta con agua de la red de abastecimiento, cuya temperatura tiene que ser incrementada hasta la propia del vaso (calor sensible). La Ecuación 2 muestra la potencia térmica demandada por el vaso debido al efecto de un gasto másico evaporado desde la superficie del vaso:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}[L + 4.186 (T_{wp} - T_{wn})] \quad (2)$$

donde \dot{m} representa el gasto másico de agua evaporada (kg/s), L es el calor latente de vaporización del agua, y T_{wp} y T_{wn} son la temperatura del agua de la piscina y de la red de abastecimiento, respectivamente.

Por otro lado, el efecto de la radiación puede ser representado, en base a la expresión de Stefan Boltzmann, por la Ecuación 3 (Howell et al. 2015):

$$\dot{Q}_{rad} = 0,0057 \varepsilon \left[\left(\frac{T_{wp} + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{wall} + 273.15}{100} \right)^4 \right] A_p \quad (3)$$

donde ε es la emitancia media del agua (0,87) y T_{wall} la temperatura media de las paredes interiores de la sala que son vistas por la superficie libre de la piscina.

Las pérdidas por conducción vienen de una transferencia de calor a través del fondo y las paredes laterales del vaso de la piscina. Se pueden presentar dos casos distintos: que el vaso haya sido excavado en el terreno, o que el vaso se haya construido con muros de hormigón dentro de una gran galería en planta sótano, que posteriormente es utilizada como sala de máquinas y almacén. El primer caso es más habitual en piscinas pequeñas o antiguas. Las piscinas modernas de tamaño medio suelen estar construidas mediante muros de hormigón que separan el agua de una galería no habitable.

Los vasos de piscina excavados en el terreno sufren pérdidas de calor por conducción hacia el terreno. Pero una vez que el terreno va adquiriendo la temperatura del agua, dicha pérdida se reduce de manera importante. Las piscinas constituidas por muros lindando con galería

subterránea que circunda el vaso, perderán calor hacia este espacio que se encontrará a una temperatura intermedia entre la del agua de la piscina y la del ambiente exterior (nótese que la ventilación de estas galerías suele ser importante).

Así, la Ecuación 4 representa las pérdidas de calor por conducción (Incropera et al. 2006):

$$\dot{Q}_{cond} = U_s A_s (T_{wp} - T_{rs}) + U_b A_b (T_{wp} - T_g) \quad (4)$$

donde U_s y U_b son los valores de la conductividad térmica (W/m^2K) de los muros laterales y del fondo del vaso, respectivamente, A_s y A_b son las áreas (m^2) de la superficie de los muros laterales y del fondo, respectivamente, y T_{rs} y T_g son las temperaturas correspondientes al aire presente en la galería circundante y al terreno bajo el vaso.

En el caso de la piscina del municipio de Archena, Murcia, una de las utilizadas en la etapa de validación de este trabajo, el vaso se compone de muros laterales de hormigón con un espesor de 300 mm y 800 mm en el caso del fondo, lo que ofrece coeficientes de transmisión tales como: $U_s = 2.94 W/m^2K$ and $U_b = 0.5 W/m^2K$.

Las pérdidas de calor convectivas, despreciables como se ha comentado con anterioridad, siguen la expresión mostrada en la Ecuación 5 (Incropera et al. 2006):

$$\dot{Q}_{conv} = h A_p (T_{wp} - T_a) \quad (5)$$

donde h es el coeficiente de transmisión de calor por convección (W/m^2K).

Finalmente, la renovación continua del agua de la piscina supone una nueva pérdida de energía. La mayor parte de las piscinas analizadas suelen renovar entre un 2,5% y un 5% del volumen del vaso cada día, tendiendo más a este último valor. Dicho volumen de agua es sustituido por agua procedente de la red de abastecimiento, a temperatura inferior a la del vaso. Aunque en ocasiones esta renovación se realiza en un momento determinado del día, en este trabajo se ha supuesto una renovación permanente de dicho volumen durante las 24 horas del día. De esta manera, la potencia térmica necesaria para compensar dicha renovación se muestra con la Ecuación 6:

$$\dot{Q}_{renov} = \frac{m_{wp} R}{86400} 4.186 (T_{wp} - T_{wn}) \quad (6)$$

donde m_{wp} es la masa total de agua contenida en el vaso (kg) y R es la tasa diaria de renovación (%).

Pero además de los mecanismos de transferencia de calor, como ya se ha comentado anteriormente, las pérdidas de calor producidas por la evaporación del agua del vaso son, con diferencia, las más importantes. Por tal motivo, aunque desde hace años se han publicado

distintos métodos para calcular las necesidades térmicas de una piscina cubierta y climatizada: la mayor parte se centran en la estimación de estas pérdidas energéticas debidas a la evaporación del agua. Estos métodos se basan en determinar la tasa de evaporación de agua ($\text{kg/h}\cdot\text{m}^2$), cuyo calor latente produce un enfriamiento del vaso.

Los métodos propuestos distinguen entre piscinas ocupadas y no ocupadas. Esto es debido a que el efecto del movimiento del agua por la presencia de bañistas incrementa su evaporación al ser mayor la superficie de intercambio entre el agua y el aire por el efecto de las olas y del *spray* producido por los bañistas. Estos efectos se ven incrementados por el número de bañistas, que habrá de ser tenido en cuenta.

La ecuación tradicionalmente más utilizada ha sido la propuesta por Carrier en 1918, también publicada por ASHRAE en 2007, que se basa en correlaciones empíricas (Ecuación 7):

$$E = \frac{(0.089 + 0.0782 v_a) A_p \Delta P}{L} \quad (7)$$

donde E es la tasa de evaporación de agua del vaso (kg/h), v_a es la velocidad del aire paralela a la superficie del agua (m/s), A_p es el área de la superficie libre de la piscina (m^2), $\Delta P = P_w - P_a$ es la diferencia entre la presión de saturación del agua a la temperatura del agua y su presión de vapor a la temperatura de la sala (Pa) y L es el calor latente de vaporización del agua (kJ/kg).

Sin embargo, trabajos posteriores han demostrado que este método sobreestima las necesidades energéticas de una piscina (Shah 2002).

La analogía entre transferencia de calor y de masa determina que la tasa de evaporación del agua es directamente proporcional a la diferencia entre la presión de vapor en el agua a la temperatura de la superficie del agua y la presión de vapor en el aire a su temperatura de rocío, dependiente del contenido en humedad que tenga. Basado en esta teoría, otros autores han desarrollado métodos específicos para calcular la cantidad de agua evaporada:

$$E = \frac{(B + C v_a)(P_w - \Phi_a P_r) A_p}{L} \quad (8)$$

donde B y C son coeficientes definidos por los distintos autores, Φ_a es la humedad relativa del aire y P_r es la presión del aire en la sala de la piscina. Más información sobre estos desarrollos se pueden observar en la Tabla 3 (Tang and Etzion 2004), si bien la mayoría de estos modelos han sido definidos para el caso de depósitos abiertos en el exterior.

Tabla 3. Coeficientes B y C existentes en la literatura para la Ecuación 8

Autor	Año	B	C
<u>Himus and Hinchley</u>	1924	0.1538	0.06898
<u>Rohwer</u>	1931	0.0838	0.05082
<u>Meyer</u>	1942	0.07549	0.03393
<u>Lurie and Michailoff</u>	1936	0.06741	0.0515

Otros autores han propuesto expresiones más simples que únicamente dependen de la diferencia entre las presiones de vapor del aire de la sala y la de saturación en la capa de aire inmediatamente sobre la superficie del agua:

$$E = D(P_w - P_r)^X A_p \quad (9)$$

donde D y X son también coeficientes establecidos por los distintos autores, cuyos valores se pueden observar en la Tabla 4 (Shah 2014).

Tabla 4. Coeficientes D y X existentes en la literatura para la Ecuación 9

Autor	Año	D	X
<u>Box</u>	1876	0.0000778	1
<u>Himus y Hinchley</u>	1924	0.0000258	1.2
<u>Boelter et al.</u>	1946	0.0000162	1.22
<u>Leven</u>	1969	0.0000094	1.3

Hannsen y Mathisen (1990), desarrollaron su modelo utilizando fórmulas más complejas, pero capaces de estimar la tasa de evaporación del agua en piscinas desocupadas a partir de las condiciones ambientales:

$$E = 3 \cdot 10^{-5} v^{\frac{1}{3}} (e^{0.06T_w} - \Phi_a e^{0.06T_a}) \quad (10)$$

donde $v = \left(v_a^2 + \left(0.12(4(1 - \Phi_a) - (T_a - T_w))^{0.5} \right)^2 \right)^{0.5}$, T_w es la temperatura de la superficie del agua (°C) y T_a es la temperatura del aire (°C).

Más tarde nuevos métodos propuestos han intentado ajustar la estimación sobre la tasa de agua evaporada a la realidad. Es el caso de Smith et al. (1993), quienes propusieron correlaciones empíricas para piscinas ocupadas, a partir de pruebas sobre piscinas reales:

$$E = \frac{(0.068 + 0.063 F_u) A_p \Delta P}{L} \quad (11)$$

donde F_u es un factor de uso ($F_u = A_{max}/A_p N$), A_{max} es la superficie libre del agua ya incrementada por el efecto de las olas (m^2) y N es el número de bañistas que están ocupando la piscina.

Sin embargo, Marek y Straub (2001) han demostrado que la cantidad de agua evaporada crece con la temperatura de la superficie del agua, pero esta tasa de crecimiento se reduce gradualmente a temperaturas elevadas de la superficie del agua. Este hecho infiere que el ratio de evaporación de agua no es directamente proporcional a la diferencia de presiones de vapor, sino que dicha diferencia se verá afectada por un exponente n inferior a 1: $(P_w - P_a)^n$.

Teniendo esto en cuenta, Shah (2002-2012) ha desarrollado un método más moderno que los anteriores, basado en la analogía entre transferencia de calor y masa en los procesos de convección natural, aplicable para piscinas cubiertas tanto desocupadas como ocupadas. En el primer caso, la ecuación propuesta es:

$$E = C A_p \rho_w (\rho_a - \rho_w)^{1/3} (w_w - w_a) \quad (12)$$

donde ρ_a es la densidad del aire de la sala en la que se encuentra la piscina (kg/m^3), $C=35$ para $(\rho_r - \rho_w) > 0.02$ y $C=40$ para $(\rho_r - \rho_w) < 0.02$, w_w es la humedad específica del aire en su capa más próxima a la superficie del agua, en la que el aire se encontrará en condiciones de saturación, y w_a es la humedad específica del aire de la sala de la piscina, ambas en kg agua / kg aire seco.

El método propuesto por Shah para piscinas cubiertas ocupadas expresa el incremento producido en la tasa de evaporación del agua por efecto de la presencia de bañistas. Dicha ecuación depende, no sólo del número de usuarios en la piscina, sino también de la diferencia entre la densidad del aire de la sala y la capa de aire en contacto con la superficie del agua:

$$E_{occ}/E = 1.9 - 21(\rho_r - \rho_w) + 5.3N^* \quad (13)$$

donde N^* es el número de ocupantes por unidad de área de superficie del vaso ($N^* \geq 0,05$).

Con la finalidad de analizar la bondad de los resultados ofrecidos por los distintos modelos propuestos hasta ahora, diversos autores han desarrollado trabajos en los que han podido comparar dichos resultados con mediciones empíricas llevadas a cabo en piscinas reales. Shah (2002) ha comparado datos empíricos obtenidos por otros investigadores con el valor de la evaporación ofrecido por su ecuación. Los resultados muestran para su modelo desviaciones inferiores al 20% con respecto a la realidad. Rzeźnik (2017) ha llevado a cabo pruebas que ofrecen desviaciones del 22% con respecto a las mediciones para el caso del modelo definido por Shah.

Por otro lado, Shah (2002) ha realizado comparaciones entre sus resultados y los del método tradicionalmente más empleado para estimar la tasa de evaporación del agua en una piscina: el de Carrier. En tal caso, las correlaciones propuestas por Carrier (1918) suponen una tasa de evaporación hasta un 200% superior a lo que ofrece el modelo de Shah.

Otros trabajos de campo y de laboratorio han servido también para contrastar las tasas de evaporación calculadas por Shah, Carrier y Smith et al. (1993). Los resultados ofrecen valores de desviación dispares (Tabla 5), demostrando en cualquier caso que el modelo propuesto por Shah es el que ofrece resultados más próximos a la realidad, con una desviación media de 14,5% sobre 113 pruebas llevadas a cabo, frente a 121,8% y 71,3% correspondientes a los modelos de Carrier y Smith et al., respectivamente.

Tabla 5. Ensayos empíricos para estimar la tasa de evaporación en piscinas desocupadas y su comparación con los modelos de Carrier, Smith et al. y Shah

Autor del ensayo	Año	T_w (°C)	T_r (°C)	Φ_r (%)	E/A_p (kg/m ² h)	Desviación* Carrier (%)	Desviación* Smith et al. (%)	Desviación* Shah (%)
<u>Hvildegaard</u>	1990	26.1	28.5	37	0.125	-	-	5.0
<u>Bohlen</u>	1972	25.0	27.0	60	0.052	181.5	111.1	1.0
<u>Boelter et al.</u>	1946	24.7	18.7	64	0.082	28.2	30.6	12.0
<u>Rohwer</u>	1931	16.5	17.2	78	0.040	210.5	137.4	34.2
<u>Sharpley y Boelter</u>	1938	33.4	21.7	53	0.402	121.4	68.4	16.9
<u>Biasin y Krumme</u>	1974	30.1	34.6	68	0.154	198.0	126.5	31.5
<u>Tang et al.</u>	1993	25.0	20.0	50	0.168	69.4	28.7	7.7
<u>Reeker</u>	1978	23.0	25.5	71	0.027	98.6	48.8	7.0
<u>Smith et al.</u>	1993	28.3	27.8	73	0.246	45.3	9.5	18.7
<u>Doering</u>	1979	25.0	27.5	28	0.175	69.4	27.0	21.9
Average (113 tests)						121.8	71.3	14.5

(*) Porcentaje de desviación entre los valores ofrecidos por los ensayos y por las correlaciones de Carrier, Smith et al. y Shah (valor absoluto medio)

Algunos autores han utilizado el programa de simulación dinámica TRNSYS (Transient System Simulation Tool), que resuelve los estados transitorios de sistemas e instalaciones, para evaluar el comportamiento energético de piscinas cubiertas y exteriores. Es el caso de Ruiz et al. (2010), Chow et al. (2012), Buonomano et al. (2015), Yantong et al. (2018) y Oró et al. (2018). Sin embargo, estos trabajos se desarrollaron para demostrar la factibilidad de integrar novedades técnicas en las instalaciones de la piscina, pero no para evaluar la demanda energética del vaso, como se ha llevado a cabo en el presente trabajo.

Por otro lado, Blázquez et al. (2017) han utilizado un modelo basado en tecnología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para calcular la tasa de evaporación de agua en piscinas cubiertas, validándolo con pruebas en condiciones reales. Sus resultados muestran errores relativos inferiores, con un valor medio de 3,3%. Sin embargo, este método está basado en una formulación más compleja, de tipo diferencial, que requiere su integración en cada paso.

Además, sólo es de aplicación en piscinas vacías, no teniendo en cuenta el impacto de los bañistas en la evaporación del agua.

Con relación al uso de controles predictivos para mejorar la eficiencia energética en edificios, diversas investigaciones se han centrado en la reducción del consumo de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado en edificios a través de diferentes tipos de control predictivo. De hecho, los sistemas basados en modelos de control predictivo (MPC) fueron y presentados por Culter et al. (1980) en los años 70 del siglo pasado como un método muy común de control avanzado en industrias.

Estos modelos se basan en formulaciones matemáticas que describen el comportamiento dinámico del edificio, procesan múltiples datos de entrada y salida, y utiliza un algoritmo iterativo para resolver el problema de toma de decisión del lazo de control en cada intervalo de tiempo (Prívará et al. 2011). Esta solución representa un progreso importante desde los controles proporcional-integral-derivado (PID), incluso con compensación climática.

Chen (2002) ha aplicado modelos de control predictivo a un sistema de calefacción por suelo radiante con gran inercia térmica. Tras una evaluación comparativa basada en simulaciones por ordenador, resulta en un mejor rendimiento del sistema de calefacción utilizando el control predictivo que otros controles más simples como el control diferencial todo o nada, o el proporcional-integral (PI).

Miezis et al. (2017) han probado un control predictivo durante un mes en un edificio multivivienda en Letonia. El algoritmo propuesto permite el apagado de la calefacción durante dos horas cuando la predicción meteorológica prevé condiciones climáticas más cálidas. La implantación de este control ofrece ahorros de energía del 13,1% durante la estación cálida.

Sin embargo, las formulaciones de los modelos de control predictivo son complejas y requieren, en muchos casos, el uso de un número importante de variables y parámetros. Además, las ecuaciones finales son específicas para cada caso, no permitiendo la aplicación de los mismos algoritmos en sistemas o edificios distintos.

Por tal motivo, Haniff et al. (2013) han propuesto dos estrategias más sencillas de control predictivo: el apagado anticipado (early switch-off ESO) y la reducción de demanda mediante el precalentado (DR) para instalaciones de calefacción en edificios. La primera propuesta permite avanzar el apagado de la calefacción en algún tiempo antes de que los usuarios abandonen el edificio (este tiempo es normalmente de 2 horas). El segundo caso propone un precalentamiento del edificio en horas valle de demanda de energía, lo que se traduce en una reducción en la factura energética, si bien no supone una medida de eficiencia energética. Ambas estrategias son

suficientemente simples y se basan en la elevada inercia térmica de las edificaciones sobre las que se aplican.

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

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 la optimización de sistemas. El avance en los últimos años de la potencia de cálculo de los ordenadores y de los métodos numéricos hace 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 programas de simulación dinámica computacional. 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 a través de técnicas de discretización finitas es altamente costoso en tiempo y requiere el uso de computadoras de última generación, mientras que una simulación dinámica 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.

Tal y como se ha comentado en el capítulo 2, la estimación de la demanda térmica de una piscina y por ende, de su consumo de energía real, no permite la utilización de modelos simples que producen importantes desviaciones con respecto a la realidad. Y dado el peso de la evaporación en dicha demanda, es importante seleccionar correctamente la formulación empleada para estimar la tasa de agua evaporada.

Como ya se ha comentado, de entre las expresiones no basadas en CFD, la que ofrece una mayor precisión a la vez que sencillez en el cálculo es la de Shah. Además, su método tiene en cuenta el efecto producido por la presencia de bañistas sobre la tasa de evaporación. Sin embargo, el modelo no ha sido debidamente contrastado en condiciones reales, con datos provenientes de piscinas reales. De algún modo, este trabajo servirá para la validación de dicho modelo con los datos provenientes de una piscina monitorizada en condiciones reales de funcionamiento.

Para desarrollar el modelo propuesto se ha utilizado el programa TRNSYS-17 (Transient System Simulation Tool). Su uso permite resolver las ecuaciones transitorias para estimar la demanda de energía hora a hora durante todo el año con el fin de evaluar la demanda energética del vaso de la piscina.

3.1. Modelado con TRNSYS

La primera versión pública de TRNSYS data del año 1975, y se trata de 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 térmico, hidráulico o eléctrico.

Este programa además permite la descripción de edificios a través del módulo TRNbuild. Este componente es capaz de modelar el comportamiento técnico de una edificación dividida en diferentes zonas térmicas. Permite la definición de la estructura del edificio de una manera sencilla y modela el comportamiento energético de los sistemas de calefacción, refrigeración, ventilación, humidificación y deshumidificación. Por tal motivo, a pesar de su sencillez, es válido para analizar el balance de humedad en la sala de la piscina. Para realizar estos cálculos, el módulo utiliza las condiciones climáticas existentes en el lugar, procedentes de la base de datos de TRNSYS. Así, los resultados que ofrece son muy próximos a los obtenidos en realidad.

3.1.1. 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 estos. Desde un punto de vista práctico, se trata de abordar la resolución de pequeños problemas en vez de un gran problema. Cada *type* o subrutina contiene el modelo de un componente del sistema.

El programa permite diseñar componentes específicos para definir con mayor precisión equipos o sistemas de nuestra instalación termodinámica. Por ejemplo, la subrutina *Type 201 – vaso*

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

piscina es un modelo detallado para realizar el balance energético del vaso de la piscina, de acuerdo con los cálculos detallados en el capítulo 2. Especificando los parámetros (valores independientes del tiempo) y las variables de entrada (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 componentes o para el siguiente paso de cálculo de este mismo componente.

La librería standard de TRNSYS incluye la mayoría de componentes comúnmente encontrados en los sistemas termoenergéticos (desde equipamientos de calefacción, ventilación y aire acondicionado de edificios, hasta controladores y sistemas de regulación o 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 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. Esto se lleva a cabo de forma esquemática mediante el programa *Simulation Studio*, interfaz gráfica de entrada de información sobre el problema propuesto. 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. Sin embargo, la versión 17 permite definir componentes con el lenguaje de programación W, ya integrado en el propio programa, lo que hace más sencilla la depuración de los componentes.

Existe una librería de componentes de libre acceso donde los autores ponen al servicio de la comunidad científica los códigos fuente que han desarrollado en sus trabajos. 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. Sin embargo, no ha sido necesario utilizar este tipo de bases de datos, sino que los componentes necesarios, fuera de los incluidos en el propio programa para elementos sencillos, han sido desarrollados *ad hoc* para este trabajo.

Pero TRNSYS no es simple y llanamente un solver de ecuaciones. El paquete completo de TRNSYS incluye además los códigos fuente de las subrutinas propias y el programa ejecutable, de la misma forma que permite la edición de ficheros e incorpora las herramientas necesarias para construir, ejecutar y analizar una simulación en TRNSYS. A diferencia de muchas herramientas de simulación presentes en el mercado, TRNSYS permite al usuario describir completamente y visualizar todas las interacciones entre componentes del sistema. Mediante una interfaz basada en iconos gráficos, el usuario directamente inserta en un tapiz los componentes de su sistema y los conecta. Dicha interfaz permite definir los parámetros y variables de entrada iniciales para cada uno de los componentes del sistema y 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 trabajo. 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.

3.1.2. Definición de sistemas en TRNSYS

Para realizar la simulación dinámica de una instalación en TRNSYS mediante el uso de componentes de la librería standard, se utilizarán 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 conexiones entre las variables de salida de un componente y las de entrada de otro.

3.1.3. 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 objeto de calcular las variables de salida. Sin embargo, existen varios modelos que difieren en su complejidad. El más sencillo define una simple capacitancia térmica del edificio para poder realizar cálculos sencillos de calentamiento y

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

refrigeración. El modelo más complejo es el modelo multi-zona que se define en el *type 56* de TRNSYS.

Este modelo multi-zona dispone de un preprocesador para 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 interfaz basada en ventanas 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.

3.1.4. Creación de un nuevo componente en TRNSYS

Para crear un nuevo componente, en el menú principal de TRNSYS se accede a través de *File/New/New Component*, como puede se observa en la Figura 2.

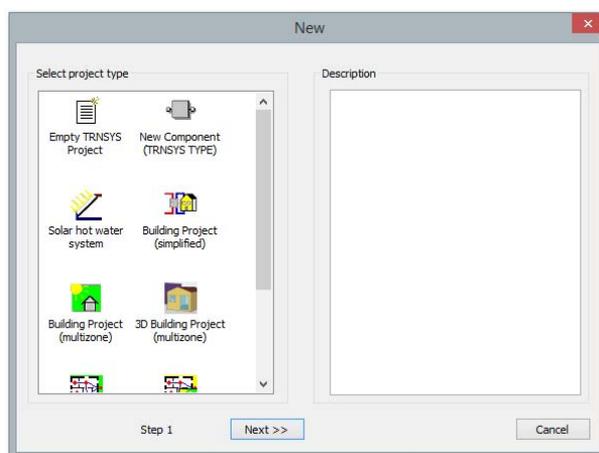


Figura 2. Creación de un nuevo componente de TRNSYS

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 código asignado al *type*, ya que será la referencia del nuevo componente para TRNSYS y estará comprendido entre los valores 200 y 300, para no tener problemas con componentes ya existentes en la librería principal de TRNSYS (Figura 3).

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

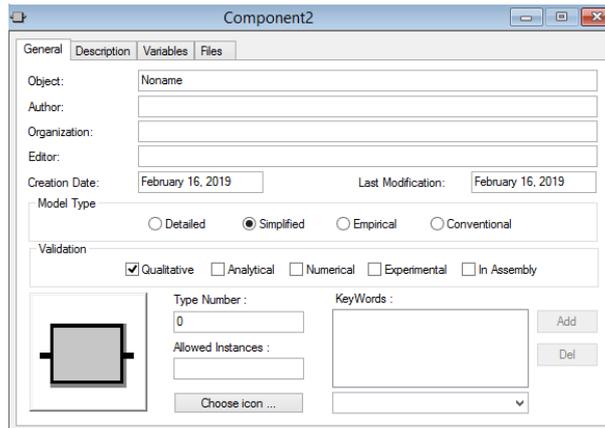


Figura 3. Información general del nuevo componente.

En la pestaña *Description*, puede introducirse una descripción sobre el nuevo componente y sus características especiales. A partir de este momento se definen las variables, esto es, las entradas, salidas y parámetros. Cada variable requiere de un nombre, dimensiones, valores por defecto, etc (Figura 4).

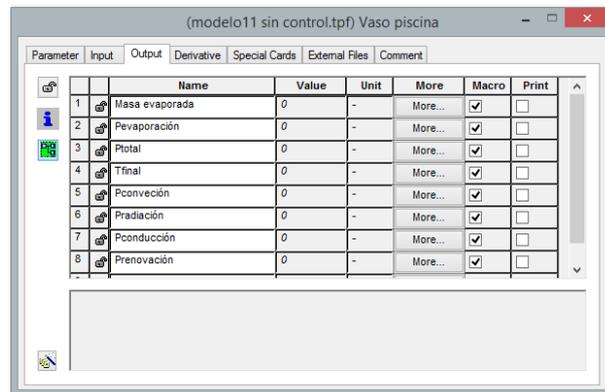
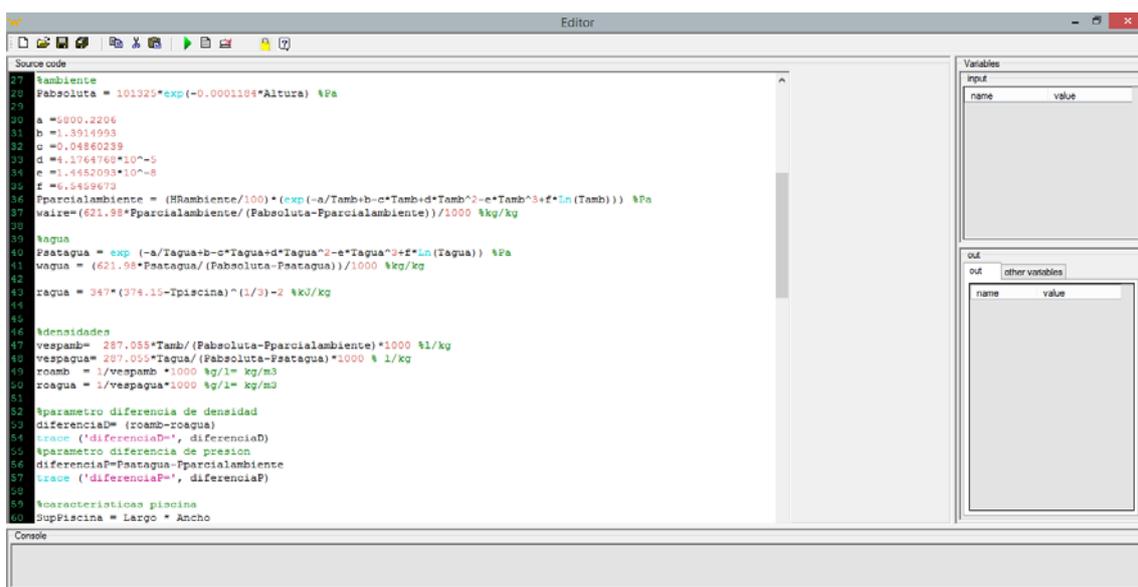


Figura 4. Variables del nuevo componente

Una vez creado el nuevo componente a través de la interfaz *Simulation Studio*, se introducirán las ecuaciones que TRNSYS tratará de resolver en cada paso de la simulación dinámica. Para ello, a pesar de poder utilizar FORTRAN como lenguaje de programación, en este trabajo se ha utilizado el editor W (Figura 5), que es compatible con la versión 17 de TRNSYS. Este lenguaje de programación específico permite introducir las ecuaciones y depurar las subrutinas de una manera más sencilla.

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada



```
Source code
1: %ambiente
2: Fabsoluta = 101325*exp(-0.0001194*Altura) %Pa
3:
4: a = 5000.2206
5: b = 1.3914993
6: c = 0.04860239
7: d = 1.1764760*10^-5
8: e = 1.4452093*10^-8
9: f = 6.5459673
10: Pparcialambiente = (Hambiente/100) * (exp(-a/Tamb+b-c*Tamb+d*Tamb^2-e*Tamb^3+f*ln(Tamb))) %Pa
11: waire=(621.98*Pparcialambiente/(Fabsoluta-Pparcialambiente))/1000 %kg/kg
12:
13: %agua
14: Pstagua = exp (-a/Tagua+b-c*Tagua+d*Tagua^2-e*Tagua^3+f*ln(Tagua)) %Pa
15: wagua = (621.98*Pstagua/(Fabsoluta-Pstagua))/1000 %kg/kg
16:
17: roagua = 347*(374.15-Tpiscina)^(1/3)-2 %kJ/kg
18:
19: %densidades
20: vespamb= 287.055*Tamb/(Fabsoluta-Pparcialambiente)*1000 %l/kg
21: vespagua= 287.055*Tagua/(Fabsoluta-Pstagua)*1000 % l/kg
22: roamb = 1/vespamb *1000 %g/l= kg/m3
23: roagua = 1/vespagua*1000 %g/l= Kg/m3
24:
25: %parametro diferencia de densidad
26: diferenciaD= (roamb-roagua)
27: trace ('diferenciaD=', diferenciaD)
28: %parametro diferencia de presión
29: diferenciaP= Pstagua- Pparcialambiente
30: trace ('diferenciaP=', diferenciaP)
31:
32: %características piscina
33: SupPiscina = Largo * Ancho
34:
35:
36:
37:
38:
39:
40:
41:
42:
43:
44:
45:
46:
47:
48:
49:
50:
51:
52:
53:
54:
55:
56:
57:
58:
59:
60:
61:
62:
63:
64:
65:
66:
67:
68:
69:
70:
71:
72:
73:
74:
75:
76:
77:
78:
79:
80:
81:
82:
83:
84:
85:
86:
87:
88:
89:
90:
91:
92:
93:
94:
95:
96:
97:
98:
99:
100:
101:
102:
103:
104:
105:
106:
107:
108:
109:
110:
111:
112:
113:
114:
115:
116:
117:
118:
119:
120:
121:
122:
123:
124:
125:
126:
127:
128:
129:
130:
131:
132:
133:
134:
135:
136:
137:
138:
139:
140:
141:
142:
143:
144:
145:
146:
147:
148:
149:
150:
151:
152:
153:
154:
155:
156:
157:
158:
159:
160:
161:
162:
163:
164:
165:
166:
167:
168:
169:
170:
171:
172:
173:
174:
175:
176:
177:
178:
179:
180:
181:
182:
183:
184:
185:
186:
187:
188:
189:
190:
191:
192:
193:
194:
195:
196:
197:
198:
199:
200:
201:
202:
203:
204:
205:
206:
207:
208:
209:
210:
211:
212:
213:
214:
215:
216:
217:
218:
219:
220:
221:
222:
223:
224:
225:
226:
227:
228:
229:
230:
231:
232:
233:
234:
235:
236:
237:
238:
239:
240:
241:
242:
243:
244:
245:
246:
247:
248:
249:
250:
251:
252:
253:
254:
255:
256:
257:
258:
259:
260:
261:
262:
263:
264:
265:
266:
267:
268:
269:
270:
271:
272:
273:
274:
275:
276:
277:
278:
279:
280:
281:
282:
283:
284:
285:
286:
287:
288:
289:
290:
291:
292:
293:
294:
295:
296:
297:
298:
299:
300:
301:
302:
303:
304:
305:
306:
307:
308:
309:
310:
311:
312:
313:
314:
315:
316:
317:
318:
319:
320:
321:
322:
323:
324:
325:
326:
327:
328:
329:
330:
331:
332:
333:
334:
335:
336:
337:
338:
339:
340:
341:
342:
343:
344:
345:
346:
347:
348:
349:
350:
351:
352:
353:
354:
355:
356:
357:
358:
359:
360:
361:
362:
363:
364:
365:
366:
367:
368:
369:
370:
371:
372:
373:
374:
375:
376:
377:
378:
379:
380:
381:
382:
383:
384:
385:
386:
387:
388:
389:
390:
391:
392:
393:
394:
395:
396:
397:
398:
399:
400:
401:
402:
403:
404:
405:
406:
407:
408:
409:
410:
411:
412:
413:
414:
415:
416:
417:
418:
419:
420:
421:
422:
423:
424:
425:
426:
427:
428:
429:
430:
431:
432:
433:
434:
435:
436:
437:
438:
439:
440:
441:
442:
443:
444:
445:
446:
447:
448:
449:
450:
451:
452:
453:
454:
455:
456:
457:
458:
459:
460:
461:
462:
463:
464:
465:
466:
467:
468:
469:
470:
471:
472:
473:
474:
475:
476:
477:
478:
479:
480:
481:
482:
483:
484:
485:
486:
487:
488:
489:
490:
491:
492:
493:
494:
495:
496:
497:
498:
499:
500:
501:
502:
503:
504:
505:
506:
507:
508:
509:
510:
511:
512:
513:
514:
515:
516:
517:
518:
519:
520:
521:
522:
523:
524:
525:
526:
527:
528:
529:
530:
531:
532:
533:
534:
535:
536:
537:
538:
539:
540:
541:
542:
543:
544:
545:
546:
547:
548:
549:
550:
551:
552:
553:
554:
555:
556:
557:
558:
559:
560:
561:
562:
563:
564:
565:
566:
567:
568:
569:
570:
571:
572:
573:
574:
575:
576:
577:
578:
579:
580:
581:
582:
583:
584:
585:
586:
587:
588:
589:
590:
591:
592:
593:
594:
595:
596:
597:
598:
599:
600:
601:
602:
603:
604:
605:
606:
607:
608:
609:
610:
611:
612:
613:
614:
615:
616:
617:
618:
619:
620:
621:
622:
623:
624:
625:
626:
627:
628:
629:
630:
631:
632:
633:
634:
635:
636:
637:
638:
639:
640:
641:
642:
643:
644:
645:
646:
647:
648:
649:
650:
651:
652:
653:
654:
655:
656:
657:
658:
659:
660:
661:
662:
663:
664:
665:
666:
667:
668:
669:
670:
671:
672:
673:
674:
675:
676:
677:
678:
679:
680:
681:
682:
683:
684:
685:
686:
687:
688:
689:
690:
691:
692:
693:
694:
695:
696:
697:
698:
699:
700:
701:
702:
703:
704:
705:
706:
707:
708:
709:
710:
711:
712:
713:
714:
715:
716:
717:
718:
719:
720:
721:
722:
723:
724:
725:
726:
727:
728:
729:
730:
731:
732:
733:
734:
735:
736:
737:
738:
739:
740:
741:
742:
743:
744:
745:
746:
747:
748:
749:
750:
751:
752:
753:
754:
755:
756:
757:
758:
759:
760:
761:
762:
763:
764:
765:
766:
767:
768:
769:
770:
771:
772:
773:
774:
775:
776:
777:
778:
779:
780:
781:
782:
783:
784:
785:
786:
787:
788:
789:
790:
791:
792:
793:
794:
795:
796:
797:
798:
799:
800:
801:
802:
803:
804:
805:
806:
807:
808:
809:
810:
811:
812:
813:
814:
815:
816:
817:
818:
819:
820:
821:
822:
823:
824:
825:
826:
827:
828:
829:
830:
831:
832:
833:
834:
835:
836:
837:
838:
839:
840:
841:
842:
843:
844:
845:
846:
847:
848:
849:
850:
851:
852:
853:
854:
855:
856:
857:
858:
859:
860:
861:
862:
863:
864:
865:
866:
867:
868:
869:
870:
871:
872:
873:
874:
875:
876:
877:
878:
879:
880:
881:
882:
883:
884:
885:
886:
887:
888:
889:
890:
891:
892:
893:
894:
895:
896:
897:
898:
899:
900:
901:
902:
903:
904:
905:
906:
907:
908:
909:
910:
911:
912:
913:
914:
915:
916:
917:
918:
919:
920:
921:
922:
923:
924:
925:
926:
927:
928:
929:
930:
931:
932:
933:
934:
935:
936:
937:
938:
939:
940:
941:
942:
943:
944:
945:
946:
947:
948:
949:
950:
951:
952:
953:
954:
955:
956:
957:
958:
959:
960:
961:
962:
963:
964:
965:
966:
967:
968:
969:
970:
971:
972:
973:
974:
975:
976:
977:
978:
979:
980:
981:
982:
983:
984:
985:
986:
987:
988:
989:
990:
991:
992:
993:
994:
995:
996:
997:
998:
999:
1000:
1001:
1002:
1003:
1004:
1005:
1006:
1007:
1008:
1009:
1010:
1011:
1012:
1013:
1014:
1015:
1016:
1017:
1018:
1019:
1020:
1021:
1022:
1023:
1024:
1025:
1026:
1027:
1028:
1029:
1030:
1031:
1032:
1033:
1034:
1035:
1036:
1037:
1038:
1039:
1040:
1041:
1042:
1043:
1044:
1045:
1046:
1047:
1048:
1049:
1050:
1051:
1052:
1053:
1054:
1055:
1056:
1057:
1058:
1059:
1060:
1061:
1062:
1063:
1064:
1065:
1066:
1067:
1068:
1069:
1070:
1071:
1072:
1073:
1074:
1075:
1076:
1077:
1078:
1079:
1080:
1081:
1082:
1083:
1084:
1085:
1086:
1087:
1088:
1089:
1090:
1091:
1092:
1093:
1094:
1095:
1096:
1097:
1098:
1099:
1100:
1101:
1102:
1103:
1104:
1105:
1106:
1107:
1108:
1109:
1110:
1111:
1112:
1113:
1114:
1115:
1116:
1117:
1118:
1119:
1120:
1121:
1122:
1123:
1124:
1125:
1126:
1127:
1128:
1129:
1130:
1131:
1132:
1133:
1134:
1135:
1136:
1137:
1138:
1139:
1140:
1141:
1142:
1143:
1144:
1145:
1146:
1147:
1148:
1149:
1150:
1151:
1152:
1153:
1154:
1155:
1156:
1157:
1158:
1159:
1160:
1161:
1162:
1163:
1164:
1165:
1166:
1167:
1168:
1169:
1170:
1171:
1172:
1173:
1174:
1175:
1176:
1177:
1178:
1179:
1180:
1181:
1182:
1183:
1184:
1185:
1186:
1187:
1188:
1189:
1190:
1191:
1192:
1193:
1194:
1195:
1196:
1197:
1198:
1199:
1200:
1201:
1202:
1203:
1204:
1205:
1206:
1207:
1208:
1209:
1210:
1211:
1212:
1213:
1214:
1215:
1216:
1217:
1218:
1219:
1220:
1221:
1222:
1223:
1224:
1225:
1226:
1227:
1228:
1229:
1230:
1231:
1232:
1233:
1234:
1235:
1236:
1237:
1238:
1239:
1240:
1241:
1242:
1243:
1244:
1245:
1246:
1247:
1248:
1249:
1250:
1251:
1252:
1253:
1254:
1255:
1256:
1257:
1258:
1259:
1260:
1261:
1262:
1263:
1264:
1265:
1266:
1267:
1268:
1269:
1270:
1271:
1272:
1273:
1274:
1275:
1276:
1277:
1278:
1279:
1280:
1281:
1282:
1283:
1284:
1285:
1286:
1287:
1288:
1289:
1290:
1291:
1292:
1293:
1294:
1295:
1296:
1297:
1298:
1299:
1300:
1301:
1302:
1303:
1304:
1305:
1306:
1307:
1308:
1309:
1310:
1311:
1312:
1313:
1314:
1315:
1316:
1317:
1318:
1319:
1320:
1321:
1322:
1323:
1324:
1325:
1326:
1327:
1328:
1329:
1330:
1331:
1332:
1333:
1334:
1335:
1336:
1337:
1338:
1339:
1340:
1341:
1342:
1343:
1344:
1345:
1346:
1347:
1348:
1349:
1350:
1351:
1352:
1353:
1354:
1355:
1356:
1357:
1358:
1359:
1360:
1361:
1362:
1363:
1364:
1365:
1366:
1367:
1368:
1369:
1370:
1371:
1372:
1373:
1374:
1375:
1376:
1377:
1378:
1379:
1380:
1381:
1382:
1383:
1384:
1385:
1386:
1387:
1388:
1389:
1390:
1391:
1392:
1393:
1394:
1395:
1396:
1397:
1398:
1399:
1400:
1401:
1402:
1403:
1404:
1405:
1406:
1407:
1408:
1409:
1410:
1411:
1412:
1413:
1414:
1415:
1416:
1417:
1418:
1419:
1420:
1421:
1422:
1423:
1424:
1425:
1426:
1427:
1428:
1429:
1430:
1431:
1432:
1433:
1434:
1435:
1436:
1437:
1438:
1439:
1440:
1441:
1442:
1443:
1444:
1445:
1446:
1447:
1448:
1449:
1450:
1451:
1452:
1453:
1454:
1455:
1456:
1457:
1458:
1459:
1460:
1461:
1462:
1463:
1464:
1465:
1466:
1467:
1468:
1469:
1470:
1471:
1472:
1473:
1474:
1475:
1476:
1477:
1478:
1479:
1480:
1481:
1482:
1483:
1484:
1485:
1486:
1487:
1488:
1489:
1490:
1491:
1492:
1493:
1494:
1495:
1496:
1497:
1498:
1499:
1500:
1501:
1502:
1503:
1504:
1505:
1506:
1507:
1508:
1509:
1510:
1511:
1512:
1513:
1514:
1515:
1516:
1517:
1518:
1519:
1520:
1521:
1522:
1523:
1524:
1525:
1526:
1527:
1528:
1529:
1530:
1531:
1532:
1533:
1534:
1535:
1536:
1537:
1538:
1539:
1540:
1541:
1542:
1543:
1544:
1545:
1546:
1547:
1548:
1549:
1550:
1551:
1552:
1553:
1554:
1555:
1556:
1557:
1558:
1559:
1560:
1561:
1562:
1563:
1564:
1565:
1566:
1567:
1568:
1569:
1570:
1571:
1572:
1573:
1574:
1575:
1576:
1577:
1578:
1579:
1580:
1581:
1582:
1583:
1584:
1585:
1586:
1587:
1588:
1589:
1590:
1591:
1592:
1593:
1594:
1595:
1596:
1597:
1598:
1599:
1600:
1601:
1602:
1603:
1604:
1605:
1606:
1607:
1608:
1609:
1610:
1611:
1612:
1613:
1614:
1615:
1616:
1617:
1618:
1619:
1620:
1621:
1622:
1623:
1624:
1625:
1626:
1627:
1628:
1629:
1630:
1631:
1632:
1633:
1634:
1635:
1636:
1637:
1638:
1639:
1640:
1641:
1642:
1643:
1644:
1645:
1646:
1647:
1648:
1649:
1650:
1651:
1652:
1653:
1654:
1655:
1656:
1657:
1658:
1659:
1660:
1661:
1662:
1663:
1664:
1665:
1666:
1667:
1668:
1669:
1670:
1671:
1672:
1673:
1674:
1675:
1676:
1677:
1678:
1679:
1680:
1681:
1682:
1683:
1684:
1685:
1686:
1687:
1688:
1689:
1690:
1691:
1692:
1693:
1694:
1695:
1696:
1697:
1698:
1699:
1700:
1701:
1702:
1703:
1704:
1705:
1706:
1707:
1708:
1709:
1710:
1711:
1712:
1713:
1714:
1715:
1716:
1717:
1718:
1719:
1720:
1721:
1722:
1723:
1724:
1725:
1726:
1727:
1728:
1729:
1730:
1731:
1732:
1733:
1734:
1735:
1736:
1737:
1738:
1739:
1740:
1741:
1742:
1743:
1744:
1745:
1746:
1747:
1748:
1749:
1750:
1751:
1752:
1753:
1754:
1755:
1756:
1757:
1758:
1759:
1760:
1761:
1762:
1763:
1764:
1765:
1766:
1767:
1768:
1769:
1770:
1771:
1772:
1773:
1774:
1775:
1776:
1777:
1778:
1779:
1780:
1781:
1782:
1783:
1784:
1785:
1786:
1787:
1788:
1789:
1790:
1791:
1792:
1793:
1794:
1795:
1796:
1797:
1798:
1799:
1800:
1801:
1802:
1803:
1804:
1805:
1806:
1807:
1808:
1809:
1810:
1811:
1812:
1813:
1814:
1815:
1816:
1817:
1818:
1819:
1820:
1821:
1822:
1823:
1824:
1825:
1826:
1827:
1828:
1829:
1830:
1831:
1832:
1833:
1834:
1835:
1836:
1837:
1838:
1839:
1840:
1841:
1842:
1843:
1844:
1845:
1846:
1847:
1848:
1849:
1850:
1851:
1852:
1853:
1854:
1855:
1856:
1857:
1858:
1859:
1860:
1861:
1862:
1863:
1864:
1865:
1866:
1867:
1868:
1869:
1870:
1871:
1872:
1873:
1874:
1875:
1876:
1877:
1878:
1879:
1880:
1881:
1882:
1883:
1884:
1885:
1886:
1887:
1888:
1889:
1890:
1891:
1892:
1893:
1894:
1895:
1896:
1897:
1898:
1899:
1900:
1901:
1902:
1903:
1904:
1905:
1906:
1907:
1908:
1909:
1910:
1911:
1912:
1913:
1914:
1915:
1916:
1917:
1918:
1919:
1920:
1921:
1922:
1923:
1924:
1925:
1926:
1927:
1928:
1929:
1930:
1931:
1932:
1933:
1934:
1935:
1936:
1937:
1938:
1939:
1940:
1941:
1942:
1943:
1944:
1945:
1946:
1947:
1948:
1949:
1950:
1951:
1952:
1953:
1954:
1955:
1956:
1957:
1958:
1959:
1960:
1961:
1962:
1963:
1964:
1965:
1966:
1967:
1968:
1969:
1970:
1971:
1972:
1973:
1974:
1975:
1976:
1977:
1978:
1979:
1980:
1981:
1982:
1983:
1984:
1985:
1986:
1987:
1988:
1989:
1990:
1991:
1992:
1993:
1994:
1995:
1996:
1997:
1998:
1999:
2000:
2001:
2002:
2003:
2004:
2005:
2006:
2007:
2008:
2009:
2010:
2011:
2012:
2013:
2014:
2015:
2016:
2017:
2018:
2019:
2020:
2021:
2022:
2023:
2024:
2025:
2026:
2027:
2028:
2029:
2030:
2031:
2032:
2033:
2034:
2035:
2036:
2037:
2038:
2039:
2040:
2041:
2042:
2043:
2044:
2045:
2046:
2047:
2048:
2049:
2050:
2051:
2052:
2053:
2054:
2055:
2056:
2057:
2058:
2059:
2060:
2061:
2062:
2063:
2064:
2065:
2066:
2067:
2068:
2069:
2070:
2071:
2072:
2073:
2074:
2075:
2076:
2077:
2078:
2079:
2080:
2081:
2082:
2083:
2084:
2085:
2086:
2087:
2088:
2089:
2090:
2091:
2092:
2093:
2094:
2095:
2096:
2097:
2098:
2099:
2100:
2101:
2102:
2103:
2104:
2105:
2106:
2107:
2108:
2109:
2110:
2111:
2112:
2113:
2114:
2115:
2116:
2117:
2118:
2119:
2120:
2121:
2122:
2123:
2124:
2125:
2126:
2127:
2128:
2129:
2130:
2131:
2132:
2133:
2134:
2135:
2136:
2137:
2138:
2139:
2140:
2141:
2142:
2143:
2144:
2145:
2146:
2147:
```

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

Tabla 6. Principales variables tenidas en cuenta en el componente definido para evaluar la demanda energética de una piscina climatizada

Variable	Input/output	Dimensiones	Unidades	Valor inicial
Temperatura del agua del vaso	input	Temperatura	°C	28
Humedad relativa	input	Porcentaje	%	65
Temperatura de la sala	input	Temperatura	°C	29
Velocidad del aire	input	Velocidad	m/s	0.2
Longitud del vaso	parameter	Longitud	m	25
Anchura del vaso	parameter	Longitud	m	12.5
Profundidad del vaso	parameter	Longitud	m	2
Temperatura agua de la red	input	Temperatura	°C	12
Número de usuarios	input	-	-	15
Temperatura media muros sala	input	Temperatura	°C	26
Tasa de agua evaporada	output	Gasto másico	kg/s	0
Pérdida de calor por evaporación	output	Potencia	kW	0
Masa de agua renovada	input	Gasto másico	kg/hr	625
Demanda térmica global	output	Potencia	kW	0

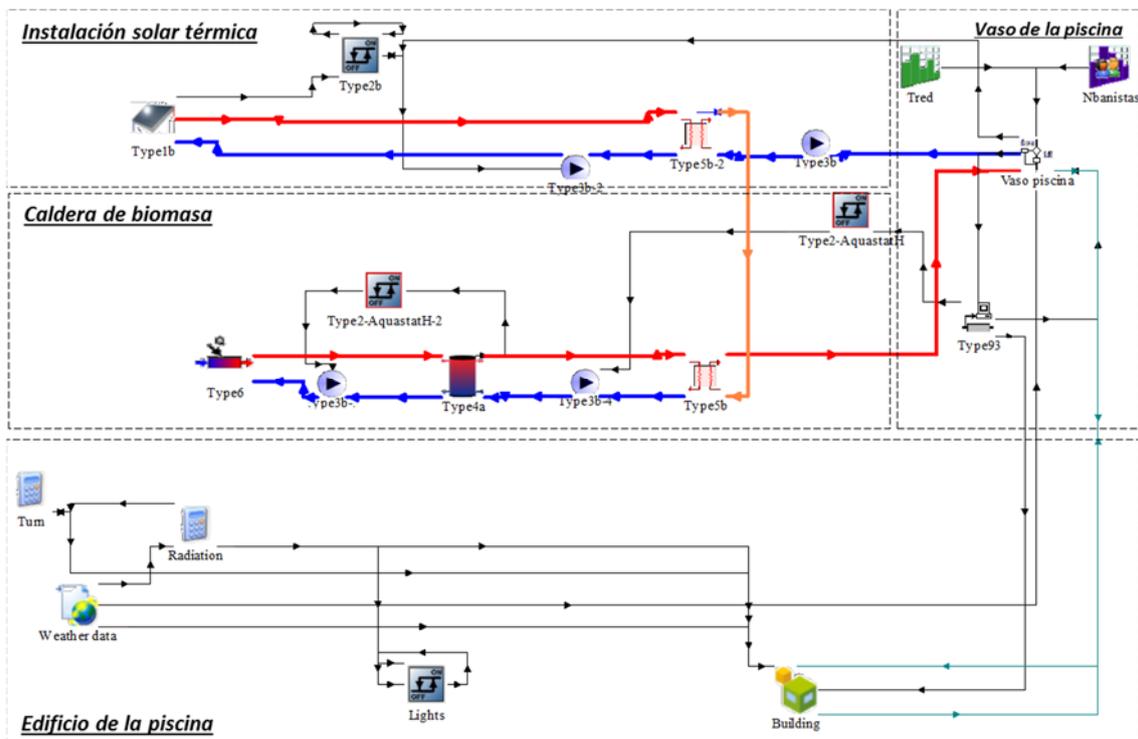


Figura 6. Modelo desarrollado en TRNSYS para simular el comportamiento dinámico de una piscina climatizada que dispone de caldera de biomasa e instalación solar térmica (de acuerdo con las características de la piscina municipal de Archena)

El modelo se compone de cuatro partes bien diferenciadas (Figura 6):

- **Edificio:** Se ha creado utilizando la herramienta TRNSBuild, componente de TRNSYS que se utiliza para evaluar el comportamiento termodinámico de edificaciones. La herramienta permite la evaluación de edificios multizona utilizando la función de

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

transferencia. Así, la sala de la piscina es evaluada en cada paso de cálculo (normalmente cada hora). Los datos básicos para describir el edificio se refieren a las características constructivas de su envolvente (Table 7) así como a los equipos térmicos (deshumectadora con su batería de calefacción).

- **Instalación solar térmica:** Se ha construido a partir de elementos convencionales de TRNSYS, pero siguiendo las características propias de la instalación real.
- **Caldera de biomasa:** El sistema caldera incluye no solamente la caldera propiamente dicha, sino también el depósito de inercia ligado a ésta que le confiere suficiente inercia térmica para estabilizar el régimen de funcionamiento de la caldera.
- **Vaso de la piscina:** Esta parte está definida a partir del nuevo componente diseñado, *Vaso piscina*, que implementa el procedimiento descrito en el flujograma de la Figura 7 y constituye el núcleo del modelo para calcular la demanda térmica de la piscina. El proceso de cálculo comienza recogiendo los datos de entrada (Tabla 6) provenientes de otros componentes del modelo en TRNSYS. Posteriormente, se determina el valor de algunas variables dependientes de la temperatura (densidades, presiones de saturación y humedades específicas). A continuación, se aplican las ecuaciones correspondientes a la estimación de la evaporación del agua, a través de los coeficientes E o E_{occ} , en función del nivel de ocupación de la piscina y de acuerdo con las Ecuaciones 12 y 13. Estos coeficientes representan la tasa de evaporación de agua en el vaso en las condiciones específicas que se presentan en cada instante. Y finalmente se calcula la demanda térmica a partir del balance energético aplicado al vaso, incluyendo la masa de agua renovada y la aportación de agua caliente proveniente de la caldera de biomasa. Todo esto es calculado cada lapso de tiempo programado que, en este caso, es de una hora.

Tabla 7. Composición de los cerramientos de la sala de la piscina municipal de Archena y su transmitancia térmica

Elemento	Composición	Orientación	Superficie (m ²)	U (W/m ² K)
Muro exterior	Bloque de hormigón sin aislamiento térmico	N	883,80	2,56
Muro exterior	Bloque de hormigón sin aislamiento térmico	S	883,80	2,56
Muro exterior	Bloque de hormigón sin aislamiento térmico	E	406,82	2,56
Muro exterior	Bloque de hormigón sin aislamiento térmico	O	406,82	2,56
Suelo	Hormigón	-	1109,17	2,94
Techo	Madera	-	1109,17	2,20
Ventanas	Carpintería de aluminio con doble vidrio	N	243,97	3,30

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

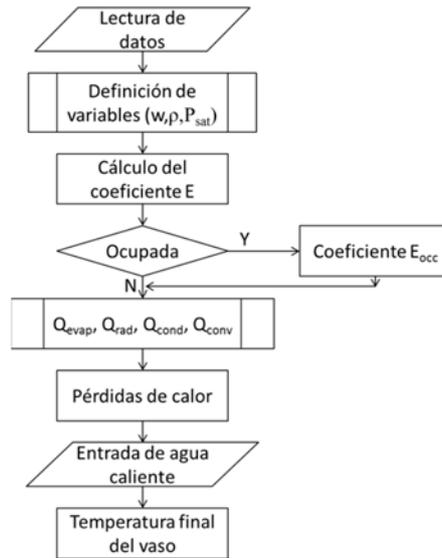


Figura 7. Flujograma del proceso de cálculo desarrollado para estudiar el comportamiento de la piscina

Fruto de la simulación dinámica del modelo propuesto, TRNSYS ofrece tanta información gráfica o numérica, como se le requiera, a partir de las variables definidas en sus componentes. Un ejemplo gráfico de la evolución anual de algunas variables se representa en las Figuras 8, 9, 10 y 11.

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

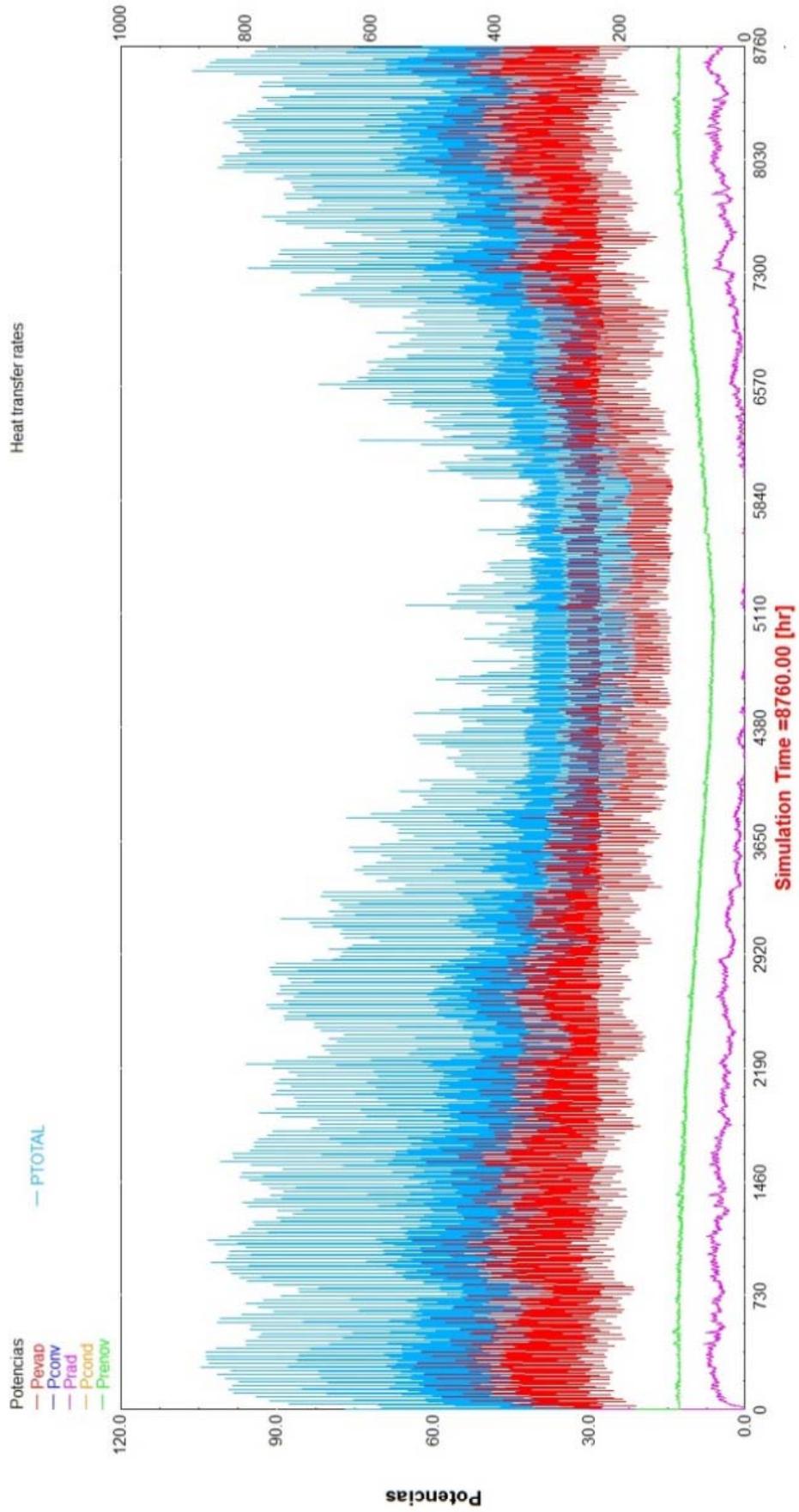


Figura 8. Flujo de calor demandado por el vaso de la piscina (kW), debido a la evaporación, convección, radiación, conducción, renovación del agua, así como el valor total

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

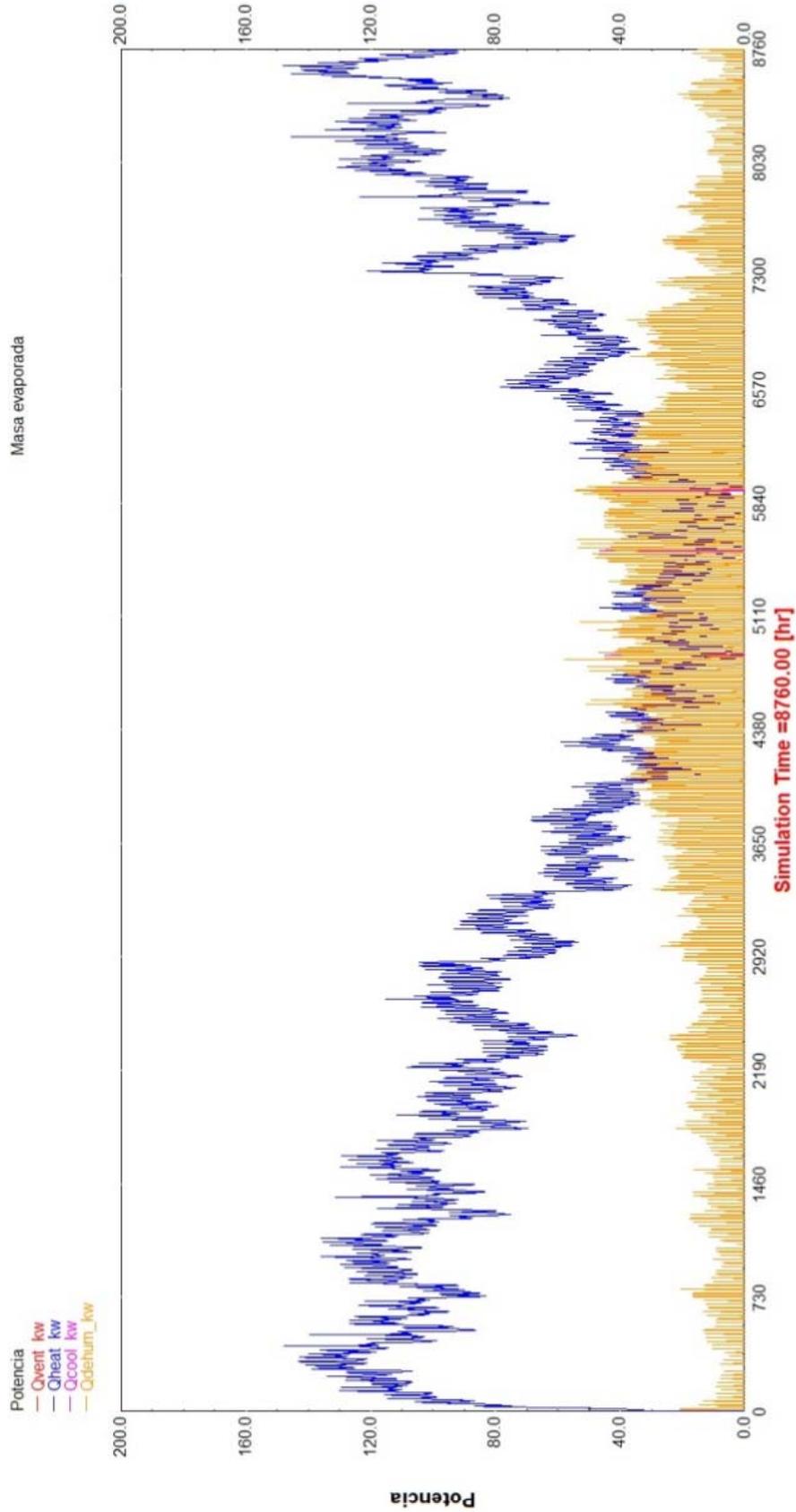


Figura 9. Potencia consumida por los equipos para calentar la sala de la piscina (térmica) y para mantener su humedad relativa dentro de los límites requeridos (eléctrica)

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

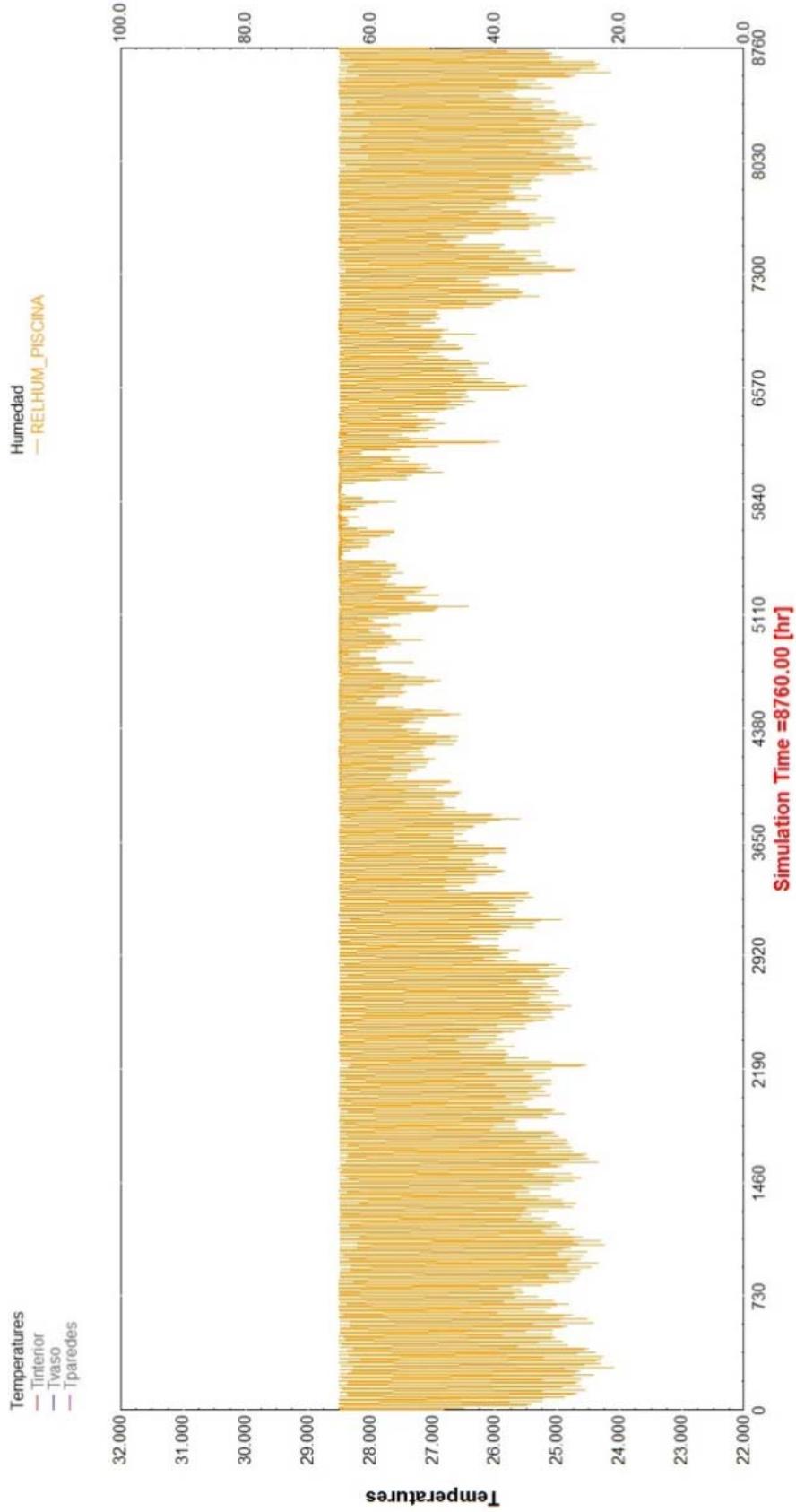


Figura 10. Evolución de la humedad relativa del aire de la sala de la piscina

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

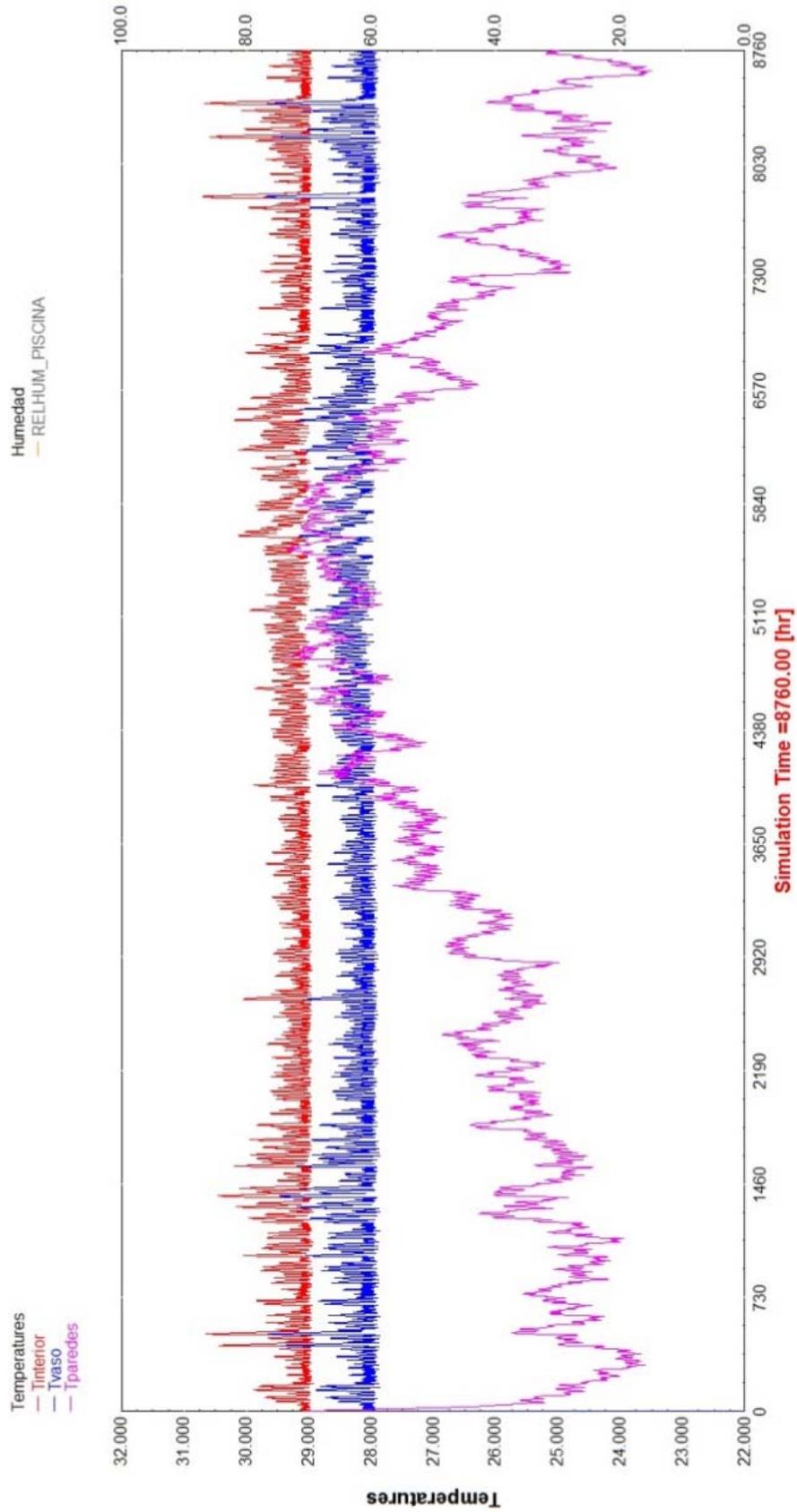


Figura 11. Evolución de las temperaturas en la sala, el vaso y las caras interiores de los cerramientos de I edificio

3.3. Resultados ofrecidos por el modelo

Una vez definido el modelo, es interesante analizar los resultados que ofrece su simulación dinámica para observar el comportamiento de la piscina en días concretos del año, o en periodos de tiempo más extensos. Para ello, se han introducido los parámetros concretos de la piscina municipal de Archena, llevando a cabo las siguientes observaciones de resultados:

- Análisis de la demanda instantánea total del vaso y la debida a las principales causas analizadas: evaporación, radiación y renovación del agua del vaso.
- Comparación entre demanda de energía en el vaso y aportes de calor por parte de la caldera de biomasa y la instalación solar térmica, todo ello controlando la temperatura del vaso.
- Evolución de la temperatura de la sala y su humedad relativa, con la aportación de calor a través del sistema de calefacción.
- Análisis energético de la instalación solar térmica, con cálculo de su rendimiento.

Para cada caso, se han tenido en cuenta periodos de un día o una semana, estudiando en cada caso tres épocas del año distintas: invierno, verano y entretiempo. Dado que la simulación permite el cálculo horario de todos los parámetros, el análisis de su evolución en el tiempo permite una mejor comprensión de los fenómenos físicos que suceden en este tipo de instalaciones tan compleja.

3.3.1. Análisis de la demanda energética del vaso

Las Figuras 12 a 17 representan la evolución de la demanda en los periodos de tiempo analizados. Las curvas permiten visualizar la importancia de los fenómenos evaporativos en la generación de demanda térmica del vaso. También cabe destacar la uniformidad de las pérdidas radiativas y por renovación del agua del vaso, ya que éstas, en el primer caso únicamente dependen de las temperaturas del vaso y las paredes interiores de la sala, las cuales son bastante constantes en los periodos analizados, mientras que en el segundo caso el modelo reparte esta carga de manera uniforme en el tiempo, suponiendo que la renovación se lleva a cabo lentamente y de manera constante durante todo el año.

Por otro lado, la demanda relativa a la evaporación del agua del vaso, siendo la más importante, es variable a lo largo del día. Se observa un destacado incremento de esta demanda cuando los primeros bañistas entran en la piscina a primera hora de la mañana. Sin embargo, este incremento, más que destacable, se desvanece con relativa rapidez a pesar de la presencia

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

permanente de bañistas ocupando el vaso. Esto es debido a que la ocupación de la piscina favorece la evaporación, pasando a incrementarse en cerca de un 80%. Dicha evaporación incrementa la tasa de humedad relativa del aire de la sala, reduciendo la capacidad de absorción de humedad por parte del aire y por tanto la tasa de evaporación. Este efecto se comprende mejor al observar las curvas de las Figuras 30-35, en las que se ve claramente cómo la humedad relativa del aire de la sala se mantiene elevada durante la presencia de los bañistas en el vaso.

Finalmente, es de destacar la reducción en la demanda de calor del vaso durante la época estival. A esta reducción, que no es tan llamativa en entretiempo, contribuye de forma decisiva una disminución drástica de las pérdidas radiativas y por renovación del agua por motivos evidentes: en el primer caso, la temperatura interior de las paredes de la sala en verano es del orden de magnitud de la temperatura del vaso, pudiendo llegar a ser incluso superior; además, la temperatura del agua de la red es más elevada en la época estival, reduciendo la demanda de energía necesaria para su calentamiento en el proceso de renovación.

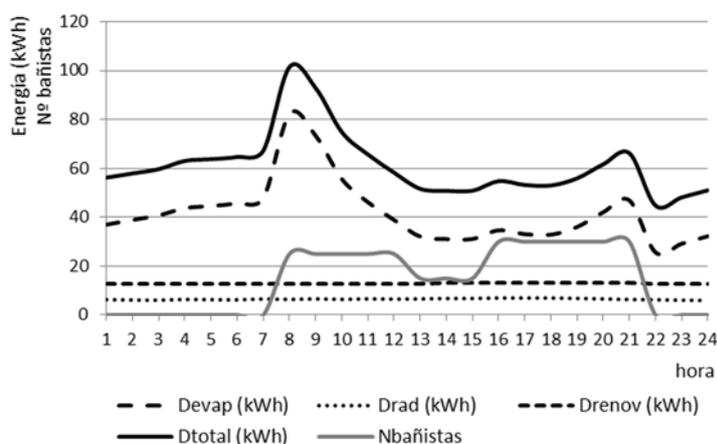


Figura 12. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (Dtotal) y la debida a la evaporación (Devap), pérdidas por radiación (Drad) y renovación del agua del vaso (Drenov). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Día 10 de enero

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

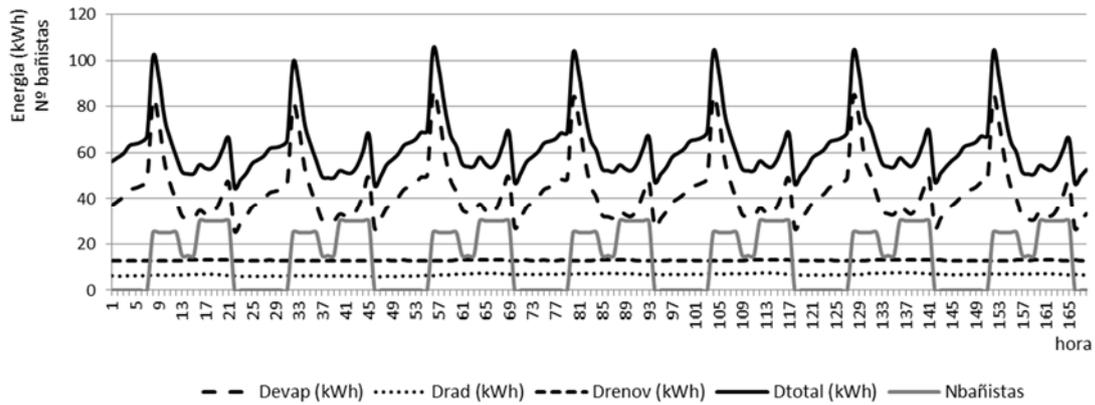


Figura 13. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (Dtotal) y la debida a la evaporación (Devap), pérdidas por radiación (Drad) y renovación del agua del vaso (Drenov). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Semana del 10 al 16 de enero

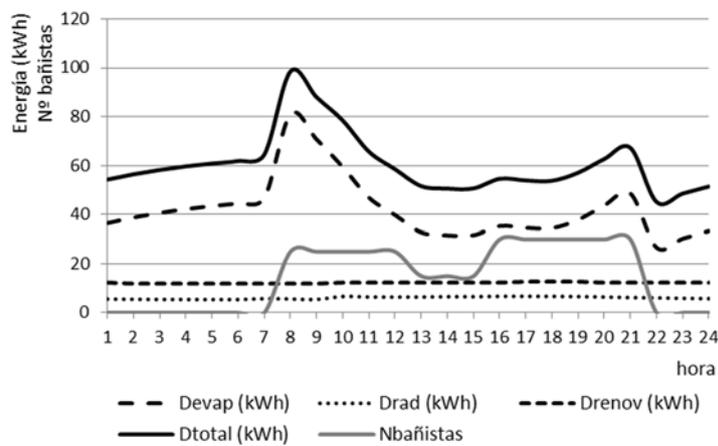


Figura 14. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (Dtotal) y la debida a la evaporación (Devap), pérdidas por radiación (Drad) y renovación del agua del vaso (Drenov). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Día 10 de marzo

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

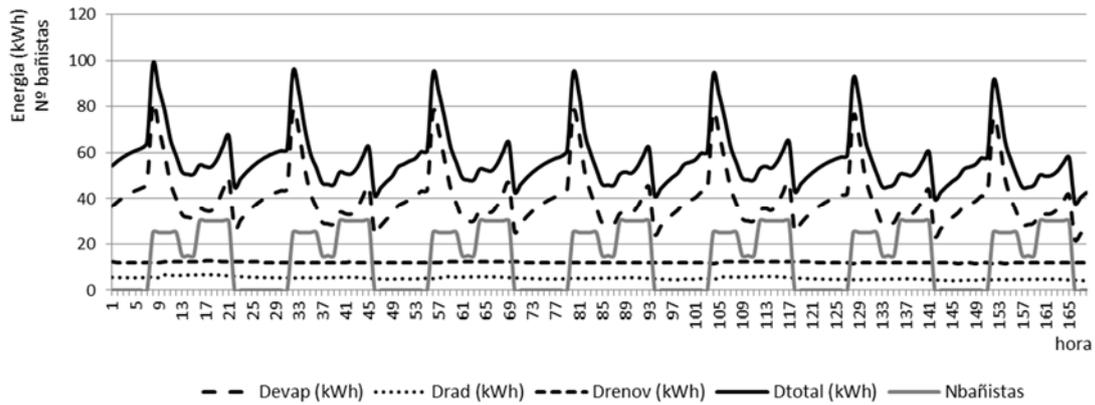


Figura 15. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (Dtotal) y la debida a la evaporación (Devap), pérdidas por radiación (Drad) y renovación del agua del vaso (Drenov). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Semana del 10 al 16 de marzo

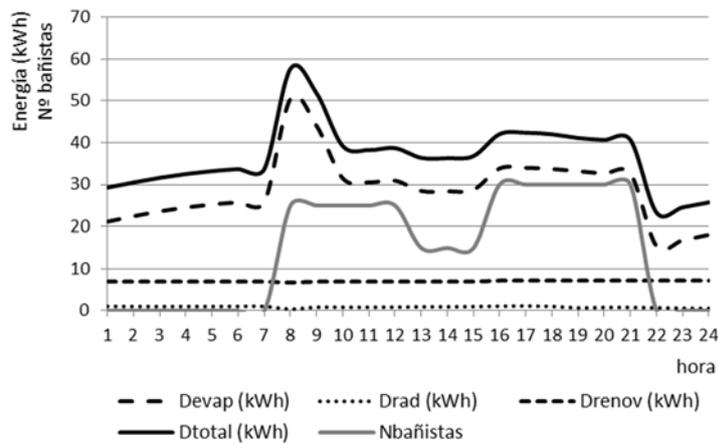


Figura 16. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (Dtotal) y la debida a la evaporación (Devap), pérdidas por radiación (Drad) y renovación del agua del vaso (Drenov). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Día 1 de julio

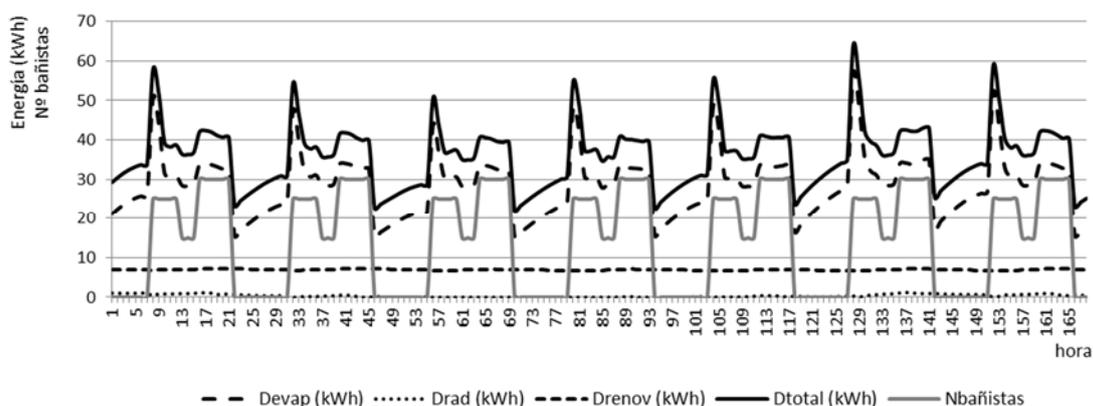


Figura 17. Evolución de la demanda total instantánea del vaso (D_{total}) y la debida a la evaporación (D_{evap}), pérdidas por radiación (D_{rad}) y renovación del agua del vaso (D_{renov}). También se representa el número de bañistas presentes cada hora. Semana del 1 al 7 de julio

3.3.2. Comparación entre demanda del vaso y calor aportado

Otro análisis interesante es ver cómo las instalaciones térmicas de la piscina son capaces de satisfacer la demanda del vaso. Para ello, el modelo incorpora un control termostático todo o nada para el funcionamiento de la caldera. Es decir, siendo la temperatura de consigna del vaso de 28°C , el aporte de la caldera se activará cuando dicha temperatura se sitúe por debajo de este umbral.

Las Figuras 18 a 23 representan las curvas de demanda y aporte de calor, en este último caso, diferenciando el aporte solar y total, siendo la contribución de la caldera la diferencia entre ambas. En cualquier caso, los momentos de actuación de la caldera se distinguen perfectamente por los picos de aportación de energía que suponen.

El primer aspecto a destacar en estas curvas es que en ningún caso el aporte de calor sigue fielmente la curva de demanda, ya que el funcionamiento de la caldera depende de la temperatura del vaso y su consigna, mientras que el aporte solar se realiza siempre que exista capacidad de calentamiento en esta instalación, independientemente de que haya o no demanda. Sin embargo, si analizamos los aportes acumulados a lo largo del día o la semana (Figuras 24 a 29), se puede observar cómo la integración de la curva de aporte prácticamente coincide con la de demanda.

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

Otra importante observación estriba en el aporte de la caldera en función de la época del año en la que opere la piscina. Mientras que en invierno este aporte es muy importante, en verano pasa a ser meramente testimonial, pudiendo la instalación solar térmica satisfacer la demanda del vaso casi por sí misma. También hay que destacar que la aportación de la caldera se realiza principalmente durante la noche, momento en el que no existe contribución solar. Este hecho hace que, en ocasiones, tras una noche en la que la caldera ha conseguido colocar sobre el valor de consigna la temperatura del vaso, la aportación solar durante el día siguiente suponga un calentamiento del caso por encima del valor de consigna. Este hecho justifica la segunda parte de este trabajo, que propone un control predictivo de la caldera durante la noche, en función de la contribución solar que existirá al día siguiente.

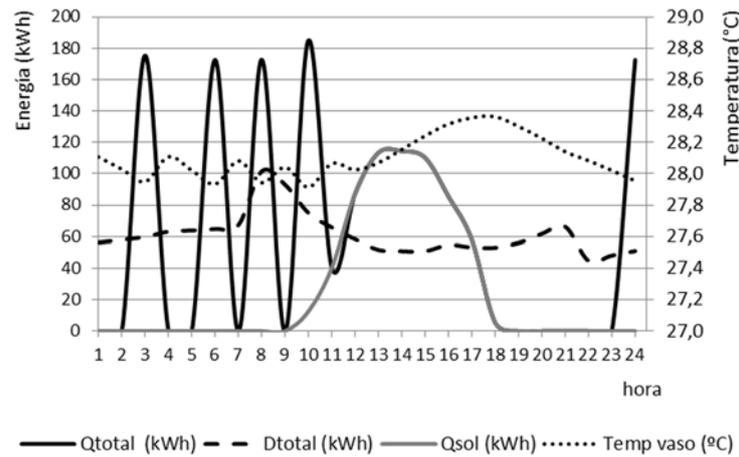


Figura 18. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de enero

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

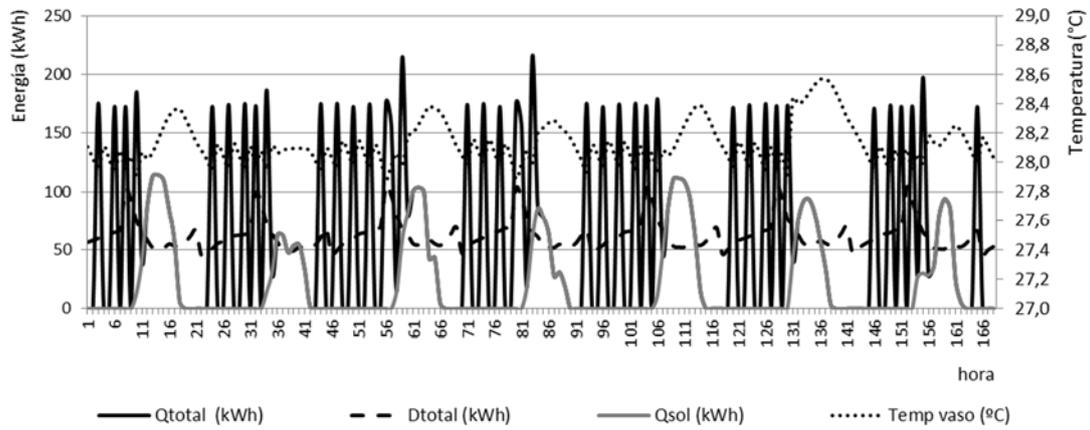


Figura 19. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de enero

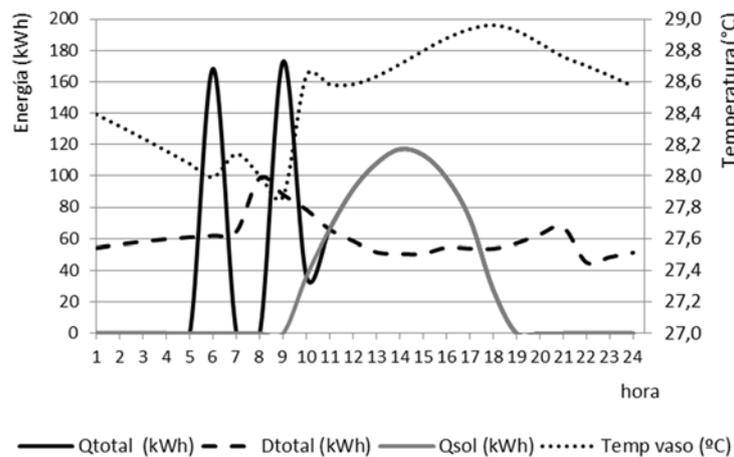


Figura 20. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de marzo

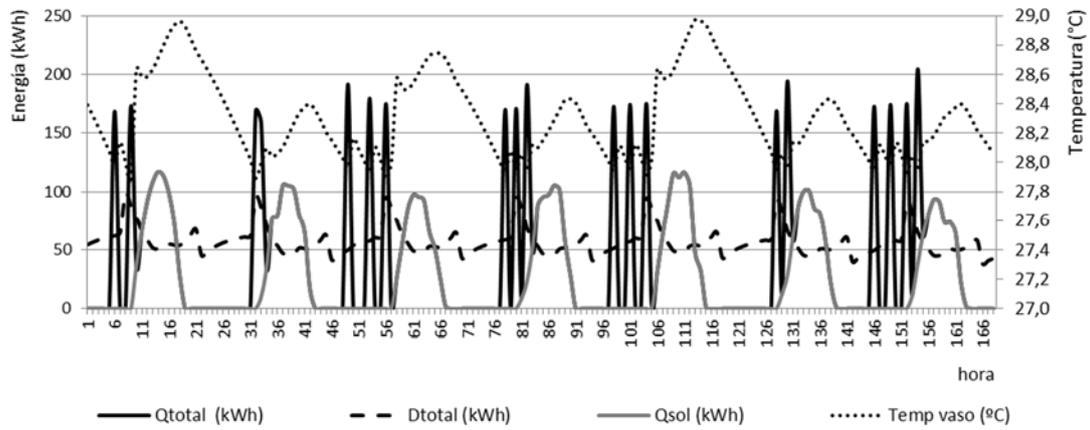


Figura 21. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de marzo

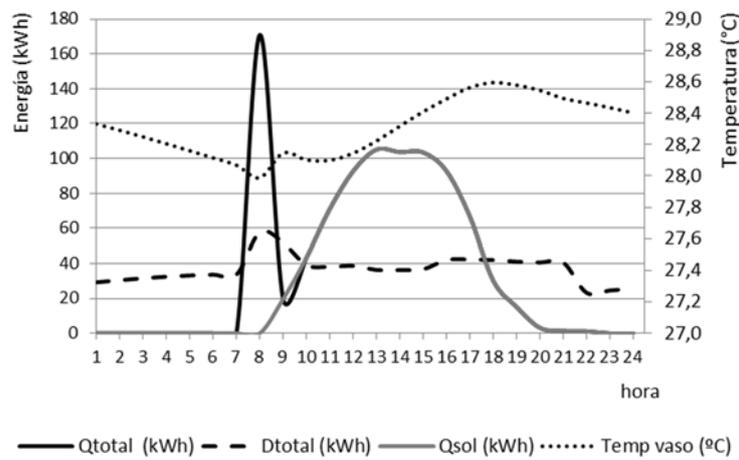


Figura 22. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Día 1 de julio

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

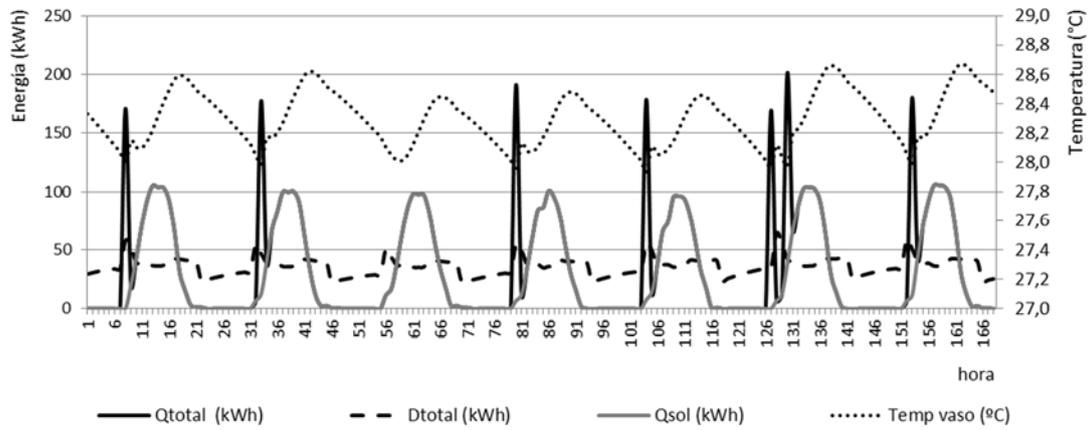


Figura 23. Comparación entre la demanda instantánea del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), incluido el aporte de la instalación solar (Q_{sol}), observando la temperatura del vaso. Semana del 1 al 7 de julio

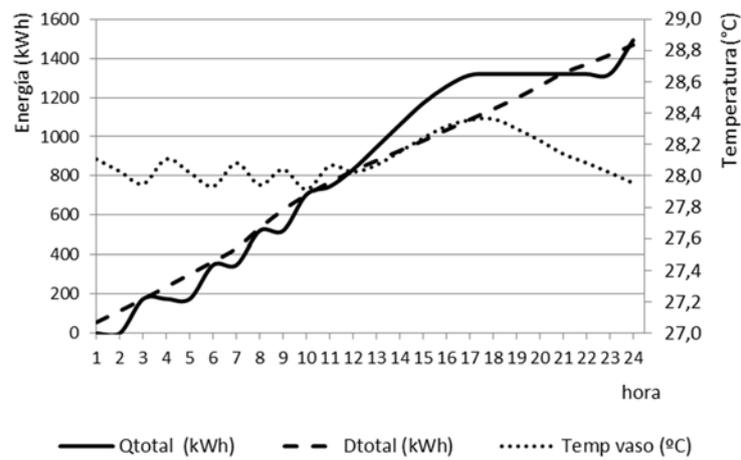


Figura 24. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de enero

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

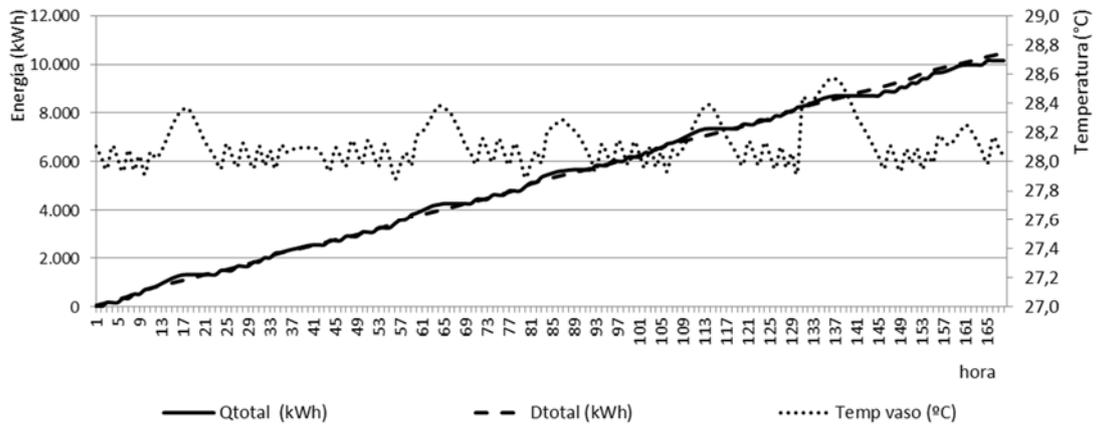


Figura 25. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de enero

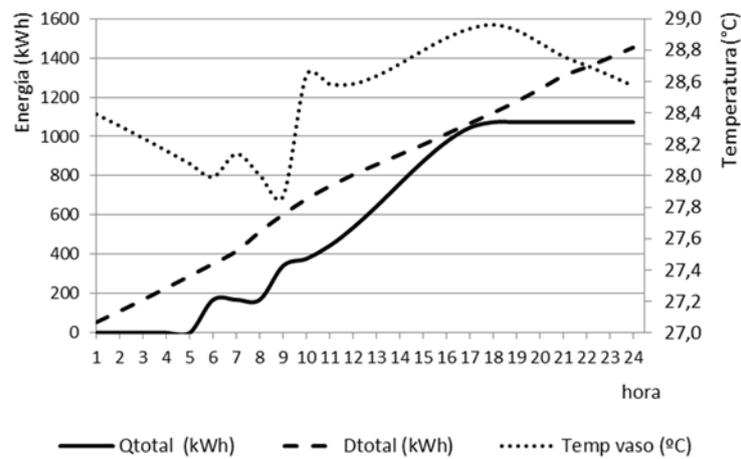


Figura 26. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Día 10 de marzo

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

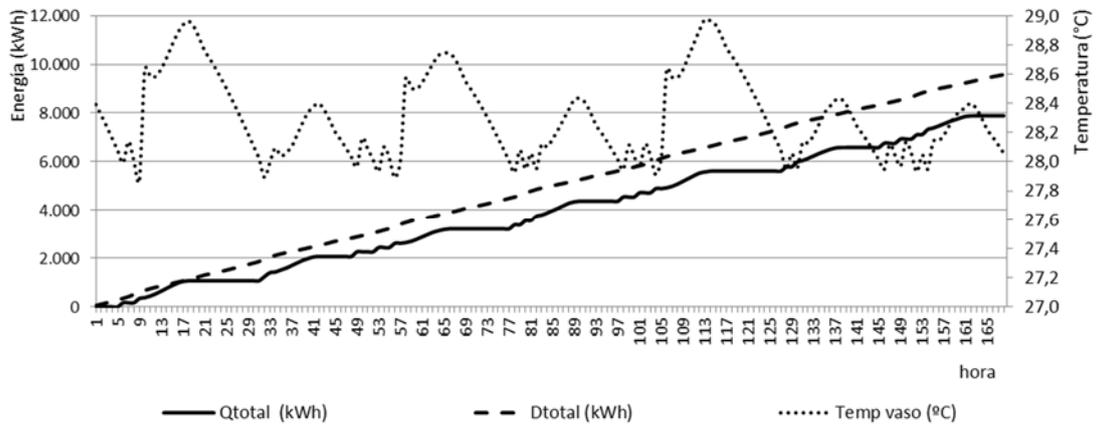


Figura 27. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (Dtotal) y el aporte de calor (Qtotal), observando la temperatura del vaso. Semana del 10 al 16 de marzo

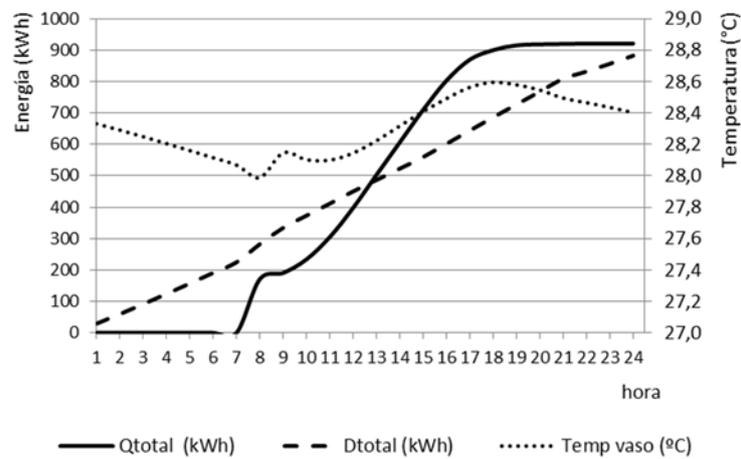


Figura 28. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (Dtotal) y el aporte de calor (Qtotal), observando la temperatura del vaso. Día 1 de julio

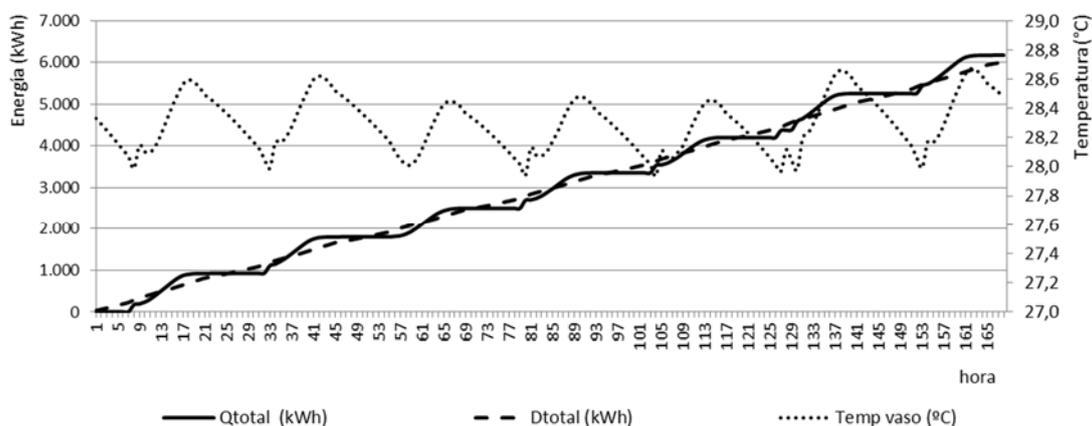


Figura 29. Comparación entre la demanda acumulada del vaso (D_{total}) y el aporte de calor (Q_{total}), observando la temperatura del vaso. Semana del 1 al 7 de julio

3.3.3. Evolución de las condiciones de la sala

La consigna de temperatura de la sala, en el caso analizado, se ha fijado en 29°C, un grado Celsius por encima de la del vaso. De esta manera se cumple con la normativa en vigor que exige, como mínimo este diferencial térmico entre el vaso y el ambiente.

Las Figuras 30 a 35 representan la evolución de las condiciones de temperatura y humedad en la sala junto con el aporte de calefacción correspondiente. Es necesario destacar que la demanda de calefacción para la sala es del mismo orden de magnitud que la demanda térmica del vaso. Esto quiere decir que a la hora de dimensionar las instalaciones térmicas de la piscina, la demanda del vaso constituye aproximadamente la mitad de la demanda total del conjunto (sin tener en cuenta ACS para duchas, calefacción de vestuarios y calentamiento de la piscina de chapoteo en el caso de que existiese).

También es importante observar cómo la aportación de calor a la sala contribuye a reducir la humedad relativa. Esto hace que, durante las horas centrales del día, en las que la necesidad de calefactar no es tan significativa, coincide con la presencia de bañistas que incrementan la tasa de evaporación del agua. La suma de ambos efectos (menor aporte de calefacción y mayor tasa de evaporación) hace que la humedad relativa del ambiente crezca de manera considerable. Como se ha comentado con anterioridad (capítulo 3.3.1), esta situación tiene un efecto positivo en la reducción de la demanda térmica del vaso.

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

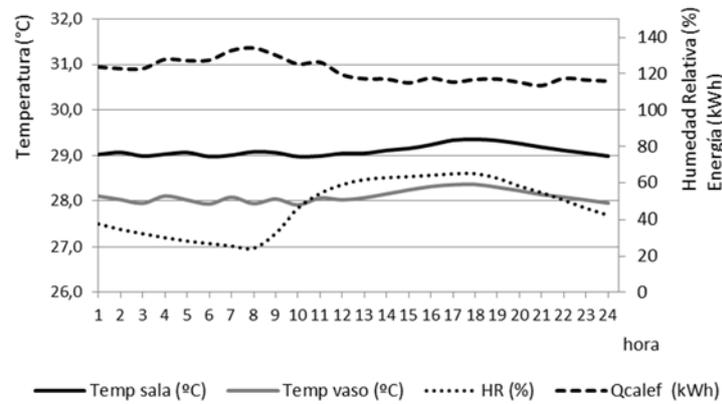


Figura 30. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Qcalef). Día 10 de enero

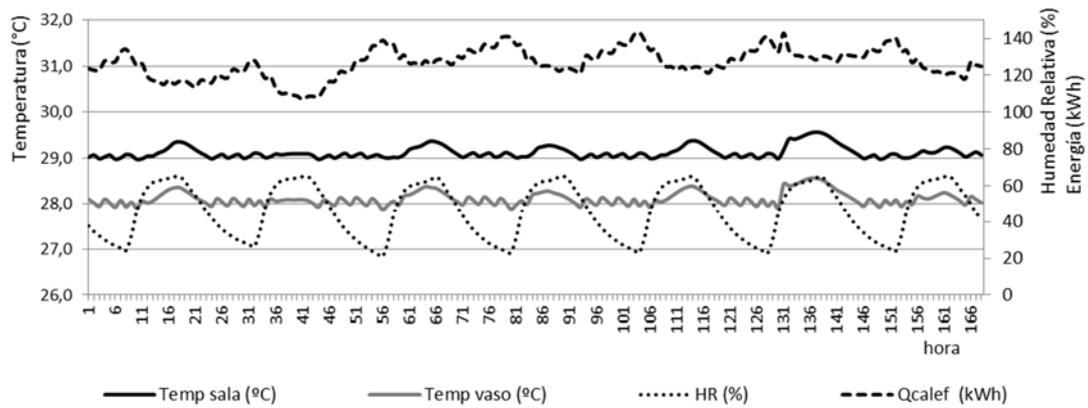


Figura 31. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Qcalef). Semana del 10 al 16 de enero

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

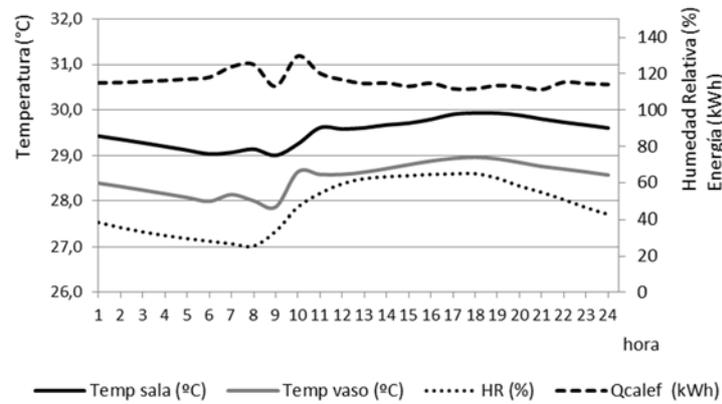


Figura 32. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Qcalef). Día 10 de marzo

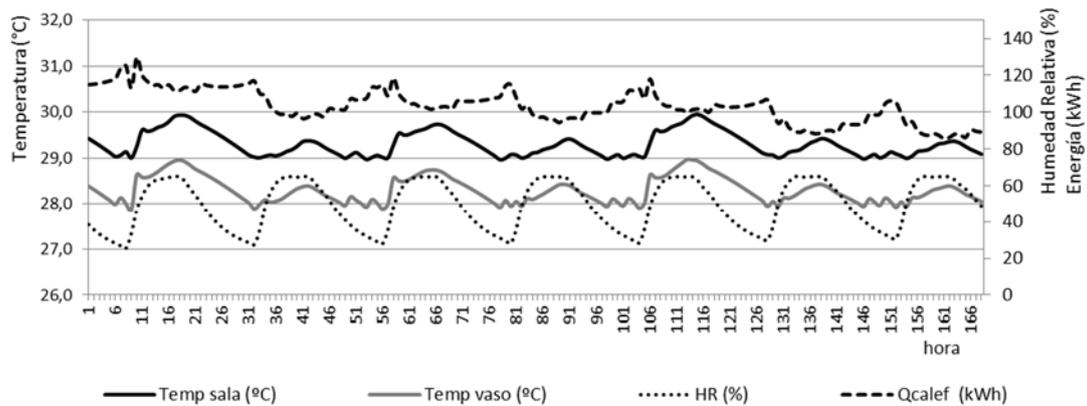


Figura 33. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Qcalef). Semana del 10 al 16 de marzo

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

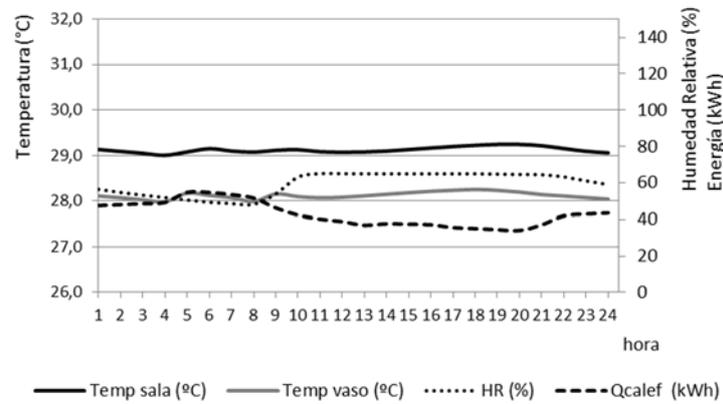


Figura 34. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Qcalef). Día 1 de julio

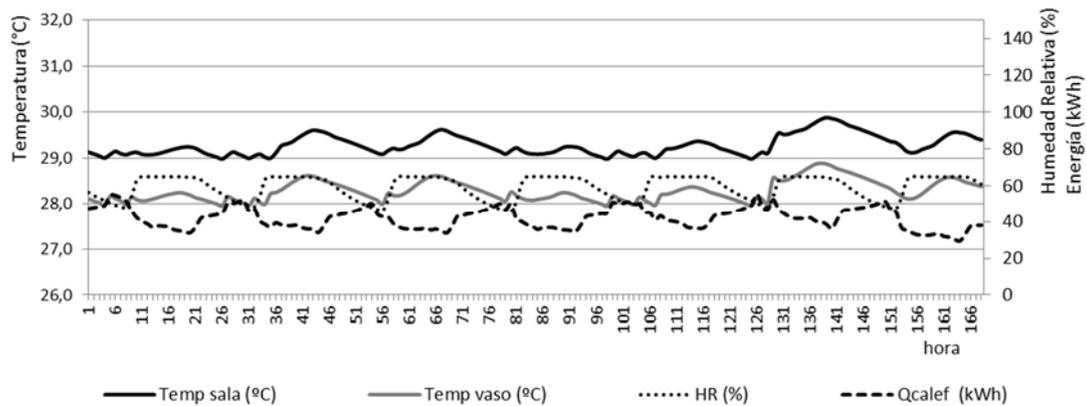


Figura 35. Evolución de la temperatura y humedad relativa (HR) de la sala con el aporte de calor (Qcalef). Semana del 1 al 7 de julio

3.3.4. Análisis de la instalación solar térmica

Finalmente, los datos ofrecidos por la simulación de TRNSYS permiten analizar el comportamiento de la instalación solar térmica. Las Figuras 36 a 41 representan el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación solar de la instalación junto con el aporte de energía solar al vaso, en los periodos de tiempo definidos. La relación entre ambas magnitudes da lugar al rendimiento instantáneo de la instalación.

En ellas se observa cómo en invierno el aporte solar es más irregular y durante menos tiempo, debido a una mayor presencia de nubes y a un número inferior de horas de sol diarias. Sin embargo, no hay grandes diferencias en cuanto al nivel de energía vertida en cada hora. Esto es debido a que la instalación funciona a una temperatura muy baja, pues así lo es la del vaso, en comparación con la temperatura habitual de funcionamiento de los captadores solares, diseñados para producir agua caliente a 60°C. Esto hace que su rendimiento sea mayor y esta diferencia se acentúa en los meses más fríos.

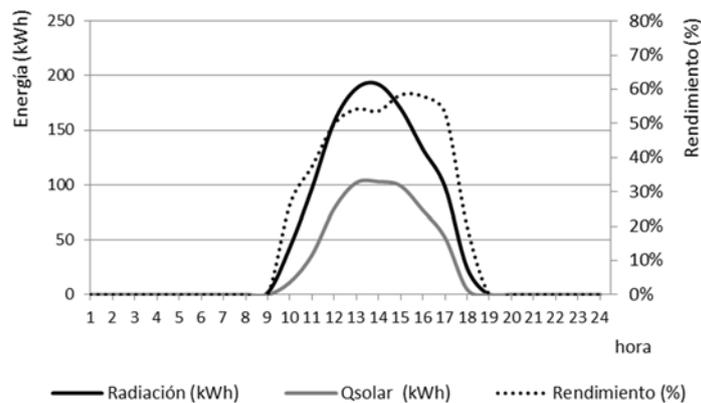


Figura 36. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Qsolar), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Día 10 de enero

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

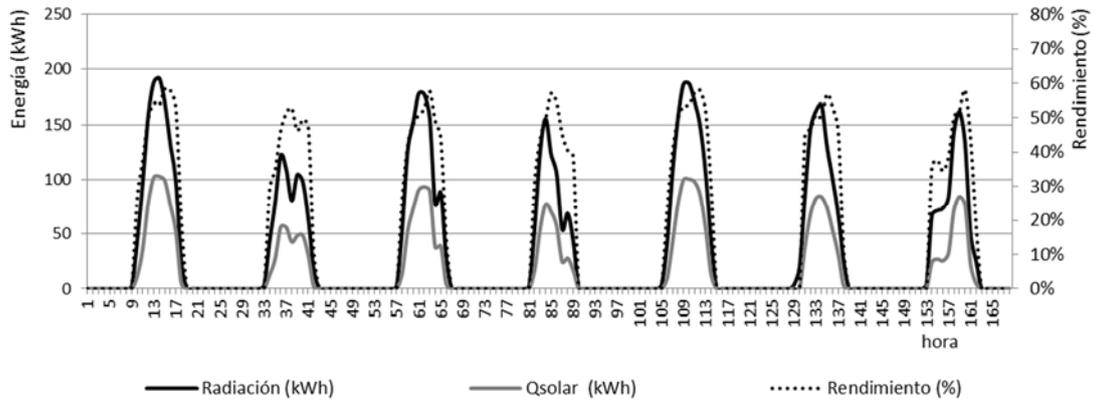


Figura 37. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Semana del 10 al 16 de enero

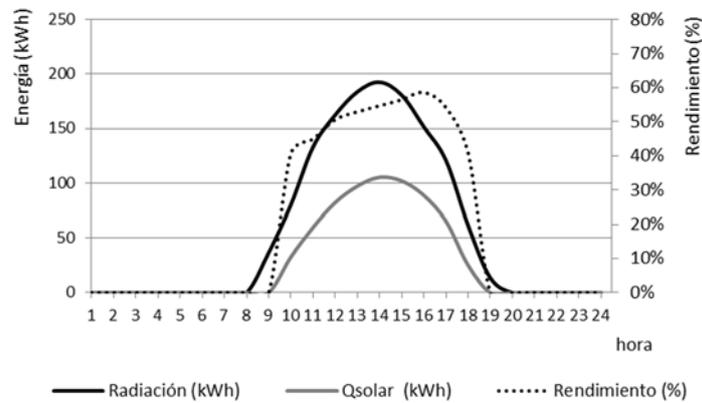


Figura 38. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Q_{solar}), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Día 10 de marzo

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

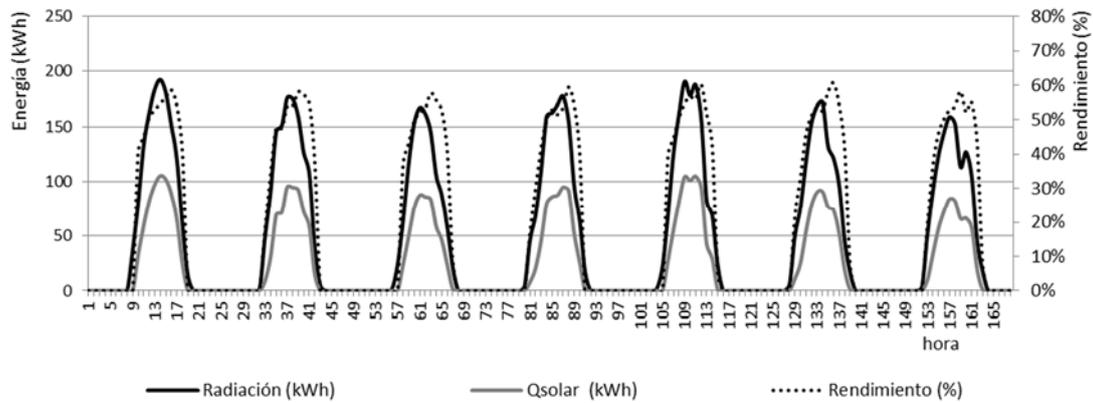


Figura 39. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Qsolar), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Semana del 10 al 16 de marzo

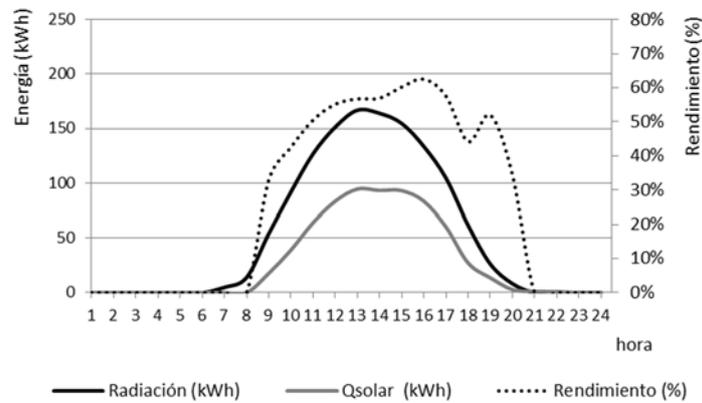


Figura 40. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Qsolar), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Día 1 de julio

3. Definición del modelo propuesto para la simulación dinámica de una piscina climatizada

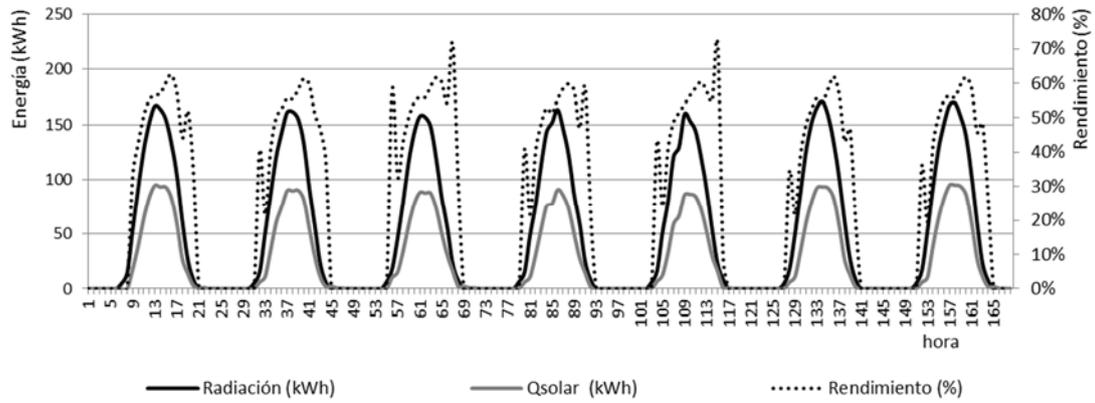


Figura 41. Comparación entre el nivel de radiación solar recibida en la superficie de captación y el aporte solar a la piscina (Qsolar), calculando el rendimiento instantáneo de la instalación. Semana del 1 al 7 de julio

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

El modelo anteriormente descrito ha sido validado a partir de datos de consumo real proveniente de cinco piscinas climatizadas. Dichas instalaciones son:

- Piscina municipal de Archena
- Piscina de El Palmar, en Murcia
- Piscina Infante, en Murcia
- Piscina Mar Menor, en Murcia
- Piscina de Puente Tocinos, en Murcia

En la primera de ellas se ha instalado un complejo sistema de monitorización que incluye el control de las instalaciones y la adquisición de datos de funcionamiento. La descripción de este sistema será objeto de un capítulo específico tras la descripción de las cinco piscinas.

4.1. Piscina municipal de Archena

En el año 2005, el Ayuntamiento de Archena promueve la construcción de una piscina climatizada con dimensiones semiolímpicas. La instalación consta de dos vasos, uno para natación, de 25 por 12,5 metros, y otro de chapoteo con dimensiones de 12,5 por 8 metros. Se encuentra ubicada en el complejo deportivo de la ciudad, en el que además se aglutinan el pabellón municipal, dos campos de fútbol, una pista polideportiva exterior y dos canchas de tenis.

La piscina se puso en marcha en 2006 utilizando, según indicaba el proyecto, una única fuente de energía térmica basada en el propano como combustible. El fuerte incremento de los precios del combustible en los años posteriores hizo que su viabilidad se viera comprometida. Esa fue la causa de que otras piscinas de municipios cercanos tuvieran que cerrar sus puertas de forma definitiva.

En el año 2010, consciente de lo crítico de la situación, el Ayuntamiento de Archena realizó una apuesta estratégica, sustituyendo la caldera original de propano por otra de biomasa, alimentada con pellets y apoyada por una generosa instalación solar. Todo ello con el fin de aprovechar los recursos autóctonos del municipio, reduciendo las emisiones y, a su vez, los costes de explotación. Esta inversión supuso una reducción del 60% en el coste energético de la piscina, haciéndola de nuevo viable económicamente.



Figura 42. Imagen de la entrada principal de la Piscina Municipal de Archena

De esta manera, la generación térmica de la instalación quedaba en manos de los siguientes sistemas (Figura 43):

- Caldera de biomasa LASIAN Bioselect de 250 kW de potencia, alimentada con pellets. Esta caldera puede aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Vaso de natación
 - Vaso de chapoteo
 - Batería de calefacción de la deshumectadora para el ambiente de las piscinas
 - Agua caliente sanitaria
 - Calefacción de los vestuarios y demás dependencias

- Instalación solar térmica que consta de 82 captadores, con una superficie total aproximada de 156 m², lo que hace una potencia estimada de 110 kW. Esta unidad puede aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Vaso de natación
 - Vaso de chapoteo
 - Agua caliente sanitaria

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

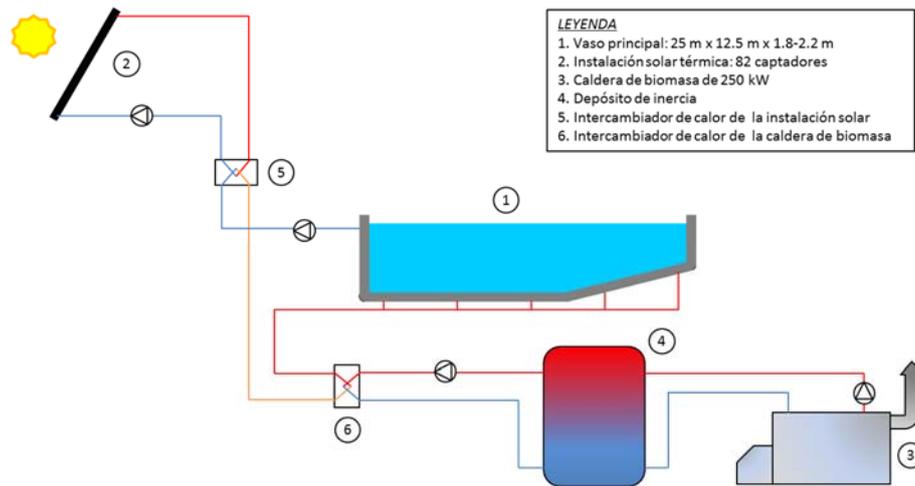


Figura 43. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina de Archena



Figura 44. Imagen del vaso principal de la piscina de Archena



Figura 45. Imagen de ambos vasos de la piscina de Archena: en primer plano el de chapoteo, más al fondo el principal

4.2. Piscina de El Palmar, en Murcia

La piscina se encuentra en el recinto polideportivo de El Palmar, donde hay también campo de fútbol, pistas polideportivas, canastas de baloncesto y porterías de fútbol sala. La piscina se encuentra junto al Hospital Universitario Virgen de la Arrixaca, lo que implica una zona activa y de elevado tráfico, aunque el acceso a la autovía se encuentra cercano. Aunque la red de gas natural se encuentra muy cerca (abastece tanto al hospital como a las urbanizaciones que lindan con el complejo deportivo), la instalación utiliza gasóleo C como combustible.

La instalación consta de un único vaso semiolímpico de 25 por 12,5 metros que originariamente era descubierta y que posteriormente se cubrió con una carpa de lona desmontable, edificación que aún se mantiene para separar la sala de la piscina del ambiente exterior. Dicha carpa, además de no ser estanca, no permite un buen aislamiento de la sala. Además, la piscina no dispone de equipo deshumectador ni calefacción de la sala, por lo que no se pueden regular la temperatura y la humedad relativa del ambiente interior.

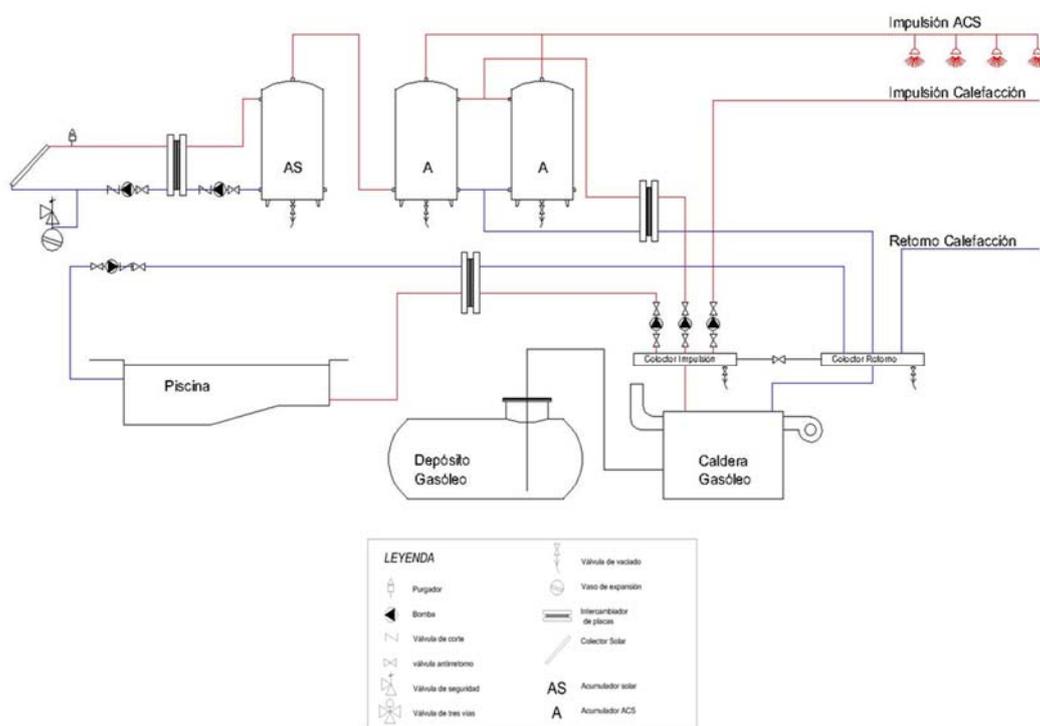


Figura 46. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina de El Palmar, en Murcia

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

La instalación térmica de la piscina está compuesta por los siguientes sistemas (Figura 46):

- 2 Calderas ROCA Tecno 38L de 450,7 kW de potencia cada una de ellas. Estas calderas pueden aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Vaso de natación
 - Agua caliente sanitaria
 - Calefacción de los vestuarios y demás dependencias
- Instalación solar térmica que consta de 18 captadores, con una superficie total aproximada de 36,5 m², lo que hace una potencia estimada de 25,5 kW. Esta unidad puede aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Agua caliente sanitaria



Figura 47. Imágenes exteriores e interior de la piscina de El Palmar, en Murcia

4.3. Piscina Infante, en Murcia

La piscina se encuentra junto al Polideportivo Infante, donde existe una cancha polivalente para baloncesto y fútbol sala. Se encuentra próxima a la Ronda Sur, uno de los viales de circulación de Murcia, rodeada de viviendas. Aunque la instalación de encuentra próxima a la red gas natural, utiliza gasóleo C como combustible. Dispone de un vaso de dimensiones semiolímpicas (25,5 por 12,5 metros) y de otro de chapoteo de 12,5 por 8 metros. La edificación se ha llevado a cabo mediante bloques de hormigón y dispone de grandes ventanales en su cerramiento de orientación sur, si bien dispone de protecciones solares.



Figura 48. Imágenes exteriores e interior de la piscina Infante, en Murcia



Figura 49. Imágenes de la instalación solar existente en la piscina Infante, en Murcia

La instalación térmica de la piscina está compuesta por los siguientes sistemas (Figura 50):

- 2 Calderas ROCA NTD 400 de 465 kW de potencia cada una de ellas. Estas calderas pueden aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Vaso de natación
 - Vaso de chapoteo
 - Batería de calefacción de la deshumectadora para el ambiente de las piscinas
 - Agua caliente sanitaria
 - Calefacción de los vestuarios y demás dependencias

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

- Instalación solar térmica que consta de 68 captadores, con una superficie total aproximada de 136 m², lo que hace una potencia estimada de 95,2 kW. Sin embargo, esta instalación se encuentra en mal estado de mantenimiento y fuera de servicio.

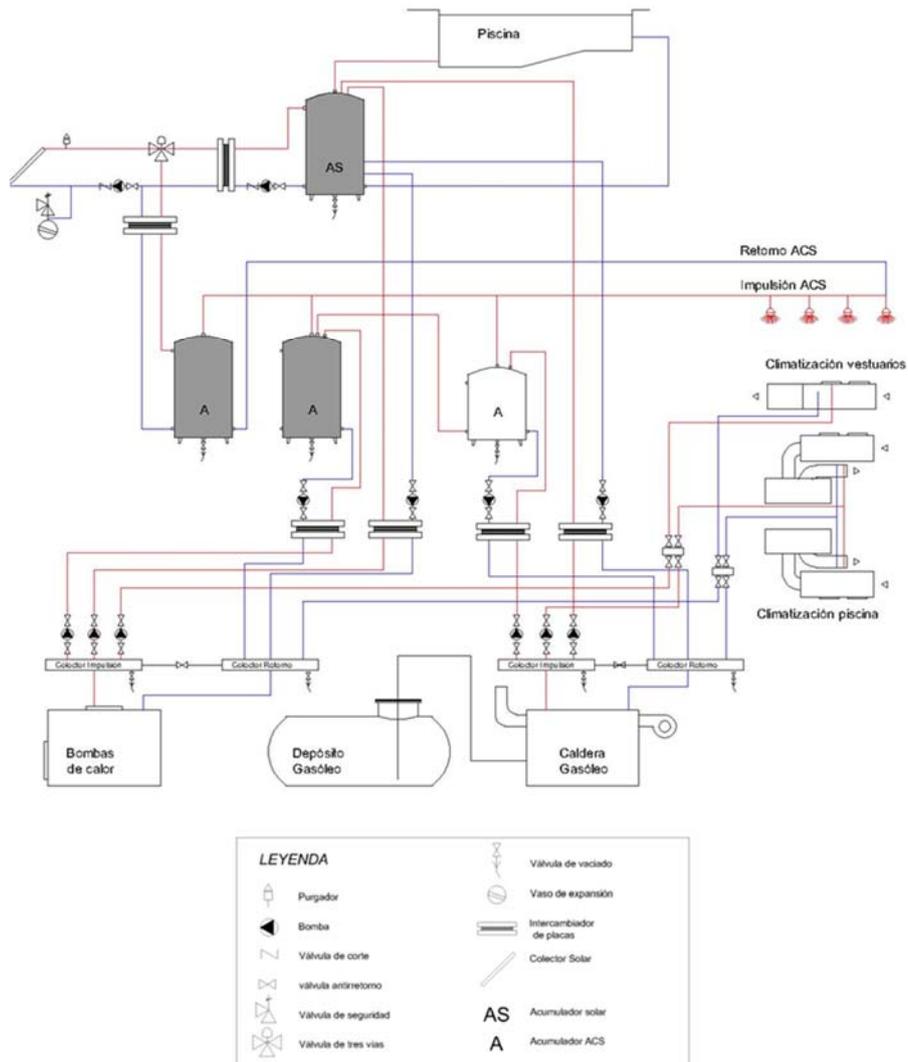


Figura 50. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina Infante, en Murcia

4.4. Piscina Mar Menor, en Murcia

La piscina se encuentra integrada en el complejo polideportivo José Barnés, donde hay también pistas de tenis, pista de patinaje, canchas de baloncesto, fútbol-sala, balonmano, hockey y voleibol. Se encuentra muy cerca de la Avenida Juan Carlos I y de la Plaza Circular, en pleno

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

centro de Murcia. Esta instalación dispone de conexión a la red de gas natural, por lo que sus calderas se alimentan con dicho combustible. Dispone de un vaso de dimensiones semiolímpicas (25,5 por 12,5 metros) y de otro de chapoteo de 12,5 por 8 metros. La edificación se ha llevado a cabo mediante bloques de hormigón y dispone de grandes ventanales en su cerramiento de orientación sur, si bien dispone de protecciones solares.



Figura 51. Imágenes exterior e interior de la piscina Mar Menor, en Murcia

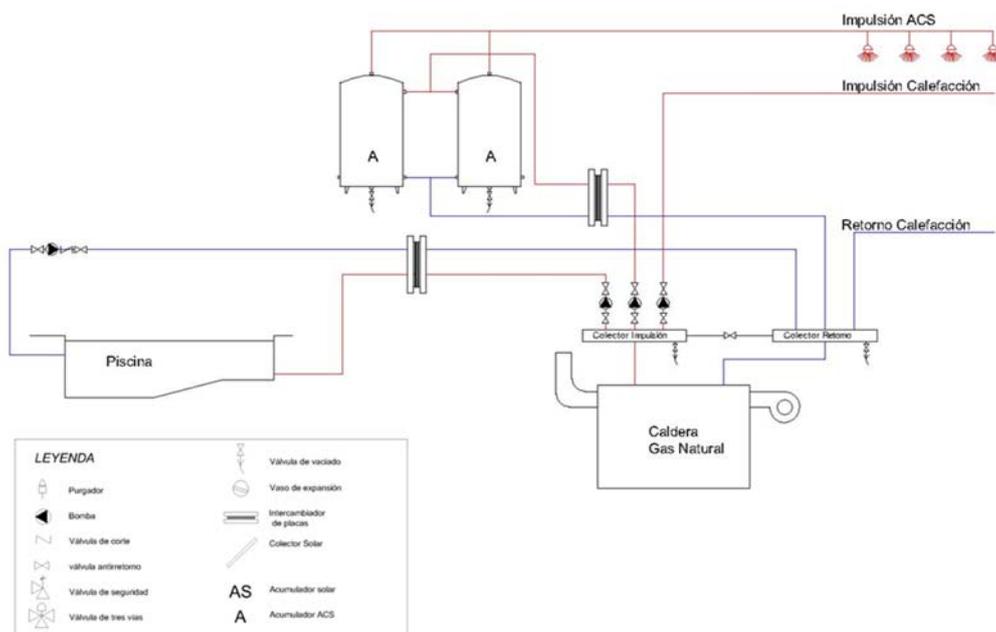


Figura 52. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina Infante, en Murcia

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

La instalación térmica de la piscina está compuesta por los siguientes sistemas (Figura 52):

- 2 Calderas ROCA CPA 500 de 581 kW de potencia cada una de ellas. Estas calderas pueden aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Vaso de natación
 - Vaso de chapoteo
 - Batería de calefacción de la deshumectadora para el ambiente de las piscinas
 - Agua caliente sanitaria
 - Calefacción de los vestuarios y demás dependencias



Figura 53. Imágenes exterior e interior de la piscina de Puente Tocinos, en Murcia

4.5. Piscina de Puente Tocinos, Murcia

La piscina se encuentra ubicada en la pedanía de Puente Tocinos. Dispone de un vaso semiolímpico de 25,5 por 12,5 metros y de otro de chapoteo de 12,5 por 8 metros. Utiliza gasóleo C como combustible principal para sus instalaciones térmicas.

La instalación térmica de la piscina está compuesta por los siguientes sistemas (Figura 54):

- 1 Caldera ROCA CPA 500 de 581 kW de potencia, 1 Caldera ROCA CPA 300 de 349 kW y 1 Caldera ROCA CPA 60 de 58 kW. Estas calderas pueden aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Vaso de natación (CPA 500)

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

- Vaso de chapoteo (CPA 500)
- Batería de calefacción de la deshumectadora para el ambiente de las piscinas (CPA 300)
- Agua caliente sanitaria (CPA 300 y CPA 60)
- Calefacción de los vestuarios y demás dependencias (CPA 60)
- Instalación solar térmica que consta de 18 captadores, con una superficie total aproximada de 36,5 m², lo que hace una potencia estimada de 25,5 kW. Esta unidad puede aportar calor a las siguientes instalaciones:
 - Agua caliente sanitaria

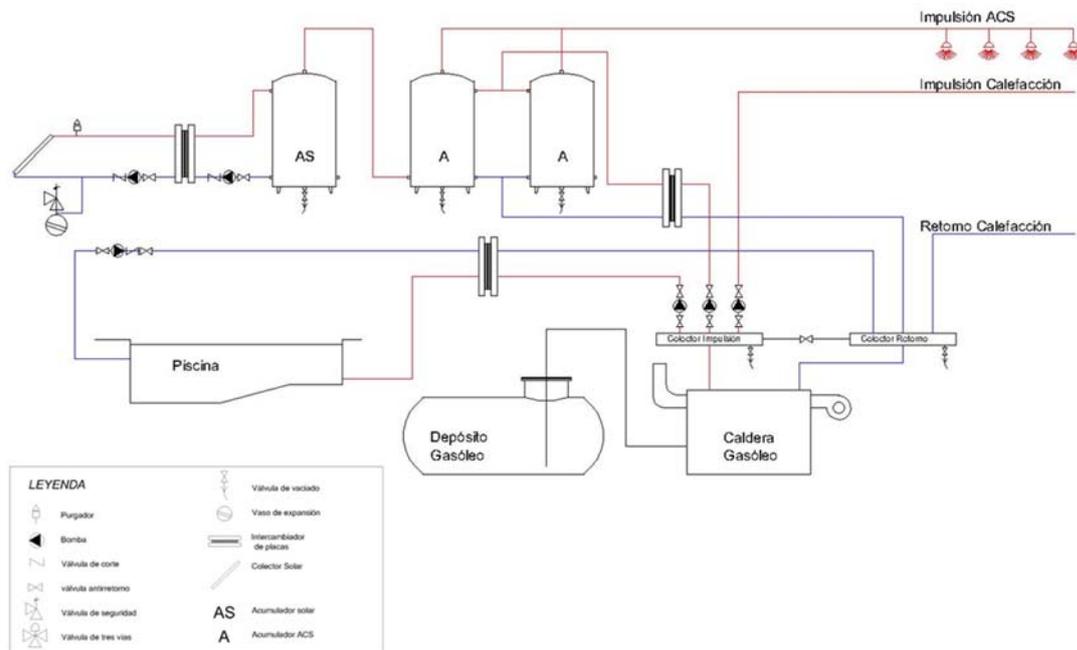


Figura 54. Esquema simplificado de las instalaciones de la piscina de Puente Tocinos, en Murcia

4.6. Instrumentación, control y sistema de adquisición de datos de la piscina de Archena

Como se ha comentado con anterioridad, la causa principal de las pérdidas de calor en una piscina es la evaporación del agua del vaso hacia el ambiente. Los mecanismos que gobiernan este proceso son complejos, ya que son muchos los factores que influyen en el mismo, como por ejemplo:

- la temperatura ambiente,

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

- la humedad relativa y específica en el ambiente,
- la temperatura del agua del vaso,
- la velocidad del aire sobre la piscina, o
- el nivel de agitación del agua.

Esto hace que sea complicado, a priori, conocer la demanda energética de la piscina. Por otro lado, dada la complejidad de las instalaciones térmicas de la piscina de Archena, con dos fuentes de energía distintas (biomasa y solar) y cinco puntos de consumo (vasos de natación y chapoteo, calefacción de la sala -batería de la deshumectadora-, ACS y calefacción de vestuarios), se hace necesario disponer de mecanismos de control avanzado que sean capaces de priorizar aporte a las demandas en función de los recursos energéticos disponibles en cada instante. Para ello es imprescindible medir las condiciones de funcionamiento en cada instante. Esto se realiza mediante una completa instrumentación de la instalación. Los parámetros que se miden, quedan registrados cada 10 minutos, pudiendo disponer de un histórico diario del comportamiento real de la piscina, para poder analizarlos y obtener conclusiones que realimentan la estrategia de control. Los parámetros registrados son los siguientes:

- C1: Caudal de alimentación a la batería de calefacción de la deshumectadora con la caldera
- C2: Caudal de alimentación al calentamiento del vaso grande con la caldera
- C3: Caudal de alimentación al calentamiento del vaso pequeño con la caldera
- C4: Caudal de alimentación a la calefacción de los vestuarios con la caldera
- C5: Caudal de alimentación al calentamiento del ACS con la caldera
- C6: Caudal de alimentación al calentamiento del vaso grande con energía solar
- C7: Caudal de alimentación al calentamiento del vaso pequeño con energía solar
- C8: Caudal de aporte solar al ACS
- C9: Caudal de consumo de ACS
- T0: Temperatura del agua fría de la red
- T1: Temperatura de retorno de la deshumectadora a la caldera
- T2: Temperatura de retorno del vaso grande a la caldera
- T3: Temperatura de retorno del vaso pequeño a la caldera
- T4: Temperatura de retorno del circuito de calefacción de vestuarios a la caldera
- T5: Temperatura de retorno del ACS a la caldera
- T6: Temperatura de salida tras aporte solar al vaso grande
- T7: Temperatura de salida tras aporte solar al vaso pequeño
- T8: Temperatura de salida tras aporte solar al ACS, en el circuito secundario
- T9: Temperatura de salida del acumulador solar al acumulador principal de ACS

- T10: Temperatura en captadores
- T11: Temperatura del agua en el vaso grande
- T12: Temperatura ambiente en la sala de las piscinas
- T13: Temperatura del agua en el vaso pequeño
- T14: Temperatura ambiente en los vestuarios
- T15: Temperatura de salida del acumulador solar al intercambiador de calor, circuito secundario de la instalación solar.
- T16: Temperatura en el acumulador solar de ACS
- T17: Temperatura de suministro de ACS
- T18: Temperatura en colector principal de la caldera
- H1: Humedad relativa en el ambiente de la sala de las piscinas

Con todos estos datos, una centralita es capaz de ofrecer información como energías y potencias generadas y consumidas, en tiempo real. Toda esta información es almacenada en archivos diarios para su análisis. La Figura 55 muestra un detallado esquema de la instalación con los parámetros registrados.

4.6.1. Arquitectura del control implementado

Dado el gran número de parámetros a registrar, se hace complicado y poco eficaz llevar a cabo el cableado de toda la instalación. Por tal motivo, se implementa un sistema de comunicaciones inalámbricas. De esta manera, la centralita, compuesta por un computador conectado a internet para tener acceso remoto, recibe señales encriptadas desde 7 módulos inalámbricos que reciben a su vez las señales de las 29 sondas instaladas. El diagrama de funcionamiento del control se puede observar en la Figura 56.

Las distintas interfaces de control están disponibles vía web, de manera que se puede tener acceso a todos los parámetros desde cualquier ordenador, tablet o smart phone.

Debido a las condiciones de trabajo de todos los componentes (elevada temperatura y humedad), se ha seleccionado de grado industrial. La centralita posee certificación CE y EMC, y ha sido adecuadamente protegida. Las entradas y salidas están protegidas contra descargas electrostáticas.

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

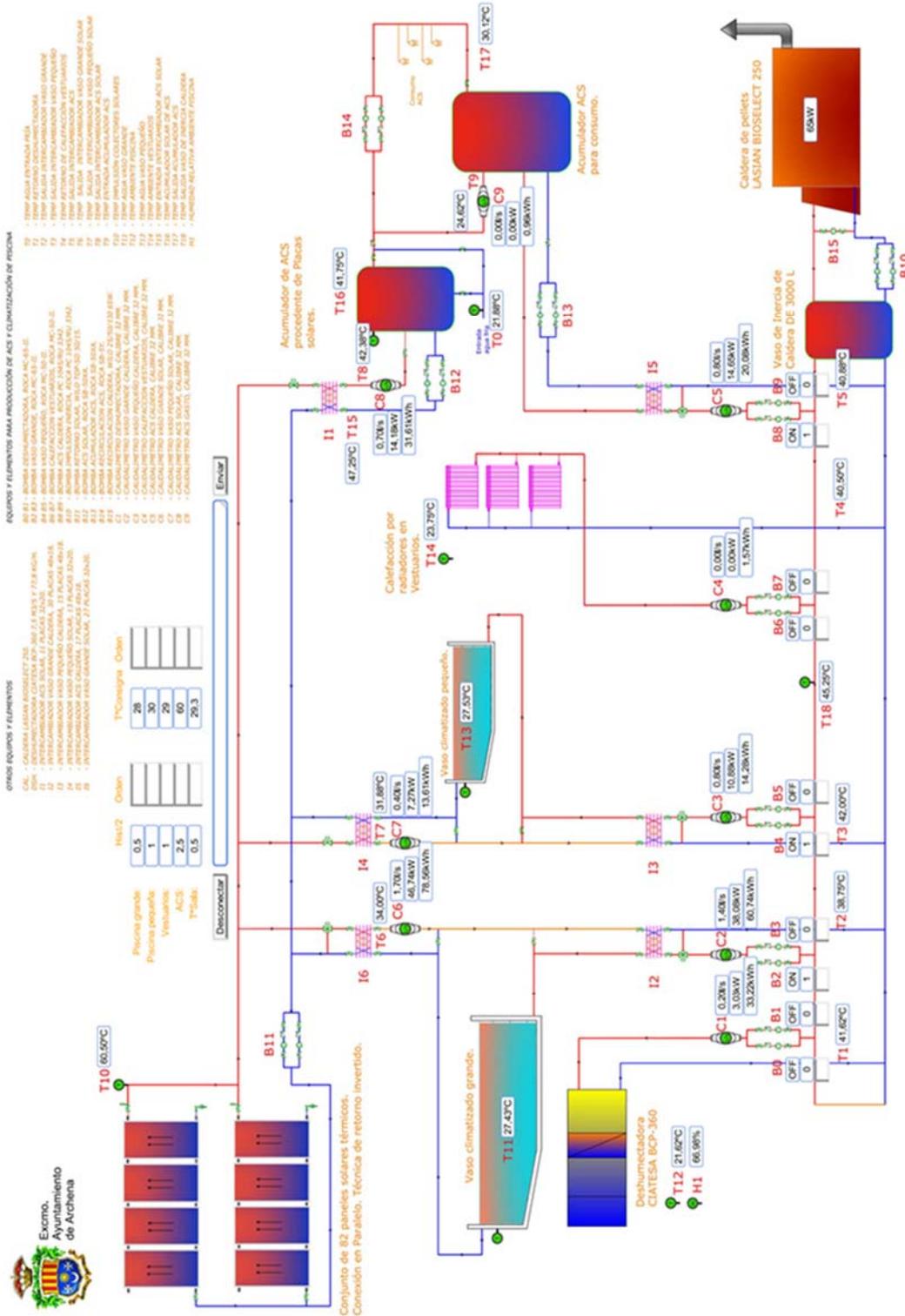


Figura 55. Esquema detallado de la instalación de la piscina de Archena. Imagen de la interfaz de control modo SCADA con los datos registrados

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

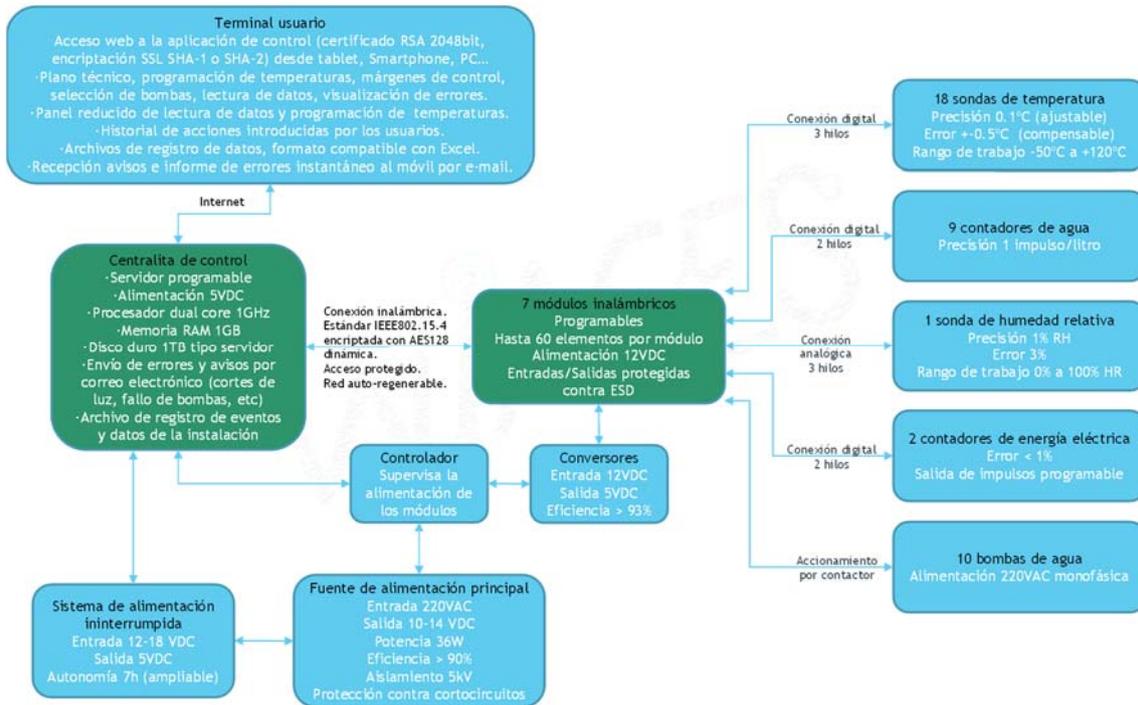


Figura 56. Flujograma de funcionamiento del control y sistema de adquisición de datos desarrollado en la piscina municipal de Archena



Figura 57. Centralita de control con batería en su armario

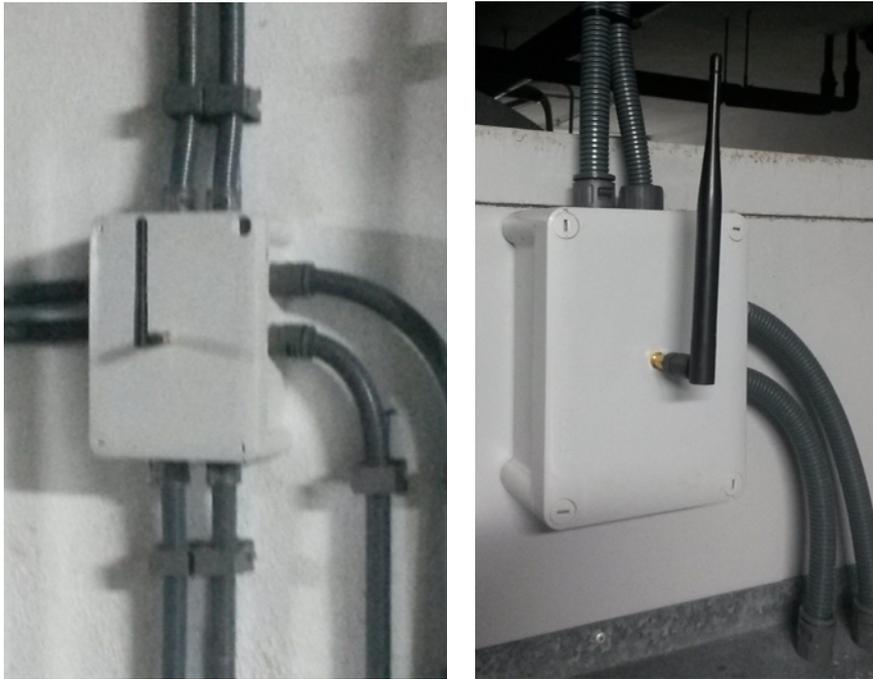


Figura 58. Módulos de comunicación entre las diferentes sondas y la centralita

Los registros se almacenan en un disco duro de gran capacidad, diseñado para trabajar los 365 días del año, 24 horas al día, de forma ininterrumpida. A los datos almacenados se tiene acceso de forma telemática, a través de internet. Todas las comunicaciones se realizan con un protocolo de encriptación dinámica AES128bit, de manera que la propia red de módulos inalámbricos actualiza la clave de encriptación periódicamente para una conexión segura sin riesgo de intromisión. La red auto-regenerable garantiza que los módulos inalámbricos nunca pierdan la conexión por error en la recepción de la clave privada, cortes de luz etc. La centralita es capaz de detectar y corregir automáticamente cualquier error fortuito producido por ruido eléctrico en la memoria de los módulos.

El tiempo de actualización de los parámetros medidos en la aplicación de control web es de 2 segundos. Sin embargo, el programa de control almacena todos los datos de la instalación cada 10 minutos. El control registra:

- energías térmicas consumidas,
- potencias térmicas instantáneas,
- temperaturas,
- humedad,
- caudales,

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

- volúmenes de agua trasegados,
- energía eléctrica consumida,
- potencia eléctrica instantánea.

Para acceder al control web, se realiza un gestor de seguridad mediante credenciales, de manera que sólo los usuarios autorizados disponen de acceso. El usuario puede configurar las consignas de los diferentes elementos de la instalación así como su rango de trabajo. También puede seleccionar qué bomba debe ser gobernada por el control, de entre las disponibles. Esto permite alternar o desactivar temporalmente el funcionamiento de cada una de ellas en una reparación o cambio de bombas.

Cualquier fallo en la instalación es identificado y notificado pasado un tiempo de confirmación. En este sentido el aviso de mayor gravedad se produce cuando la caldera deja de funcionar. En tales casos, tras un tiempo de seguridad se envía el aviso, tanto a través de la web como por correo electrónico, informando del problema.



Figura 59. Medidores de consumo eléctrico conectados con la centralita, el primero específico de la deshumectadora, el segundo corresponde al consumo global

El sistema supervisa de forma permanente el correcto funcionamiento de las bombas, evitando que una bomba activa trabaje en vacío sin circulación del caudal esperado. En tal caso también se envía un aviso al responsable de la instalación, tanto por web y como a través de un correo electrónico. El sistema también es capaz de supervisar cortes en el suministro eléctrico. Superado un periodo de 10 minutos sin alimentación, si ésta no se reestablece, se envía un aviso inmediatamente al supervisor de la instalación. Los cortes de alimentación no afectan a la centralita de control, ya que dispone de una batería que le aporta suficiente autonomía en caso de falta de suministro.

De igual forma, en caso de fallo de la conexión a internet, dicho evento será registrado por la centralita para el posterior informe y análisis realizado por el servicio técnico. El funcionamiento local del control no se ve afectado por la pérdida de conexión a internet.

4.6.2. Medios de acceso al control

Como ya se ha mencionado anteriormente, el acceso a los parámetros de control se realiza a través de interfaces diseñadas para ser utilizadas vía web. Existen tres modos distintos de acceso, dependiendo del nivel de detalle de información que se requiera.

El primer modo está basado en un control SCADA (Supervisory, Control And Data Acquisition – Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Esta forma es la más completa de todas, ofreciendo una imagen global de la instalación de la piscina y reflejando todos los valores registrados de forma instantánea. Una imagen de este modo se puede observar en la Figura 55. En todos los modos de acceso al control, el tiempo de refresco de la información es de 2 segundos.

Además, con el fin de facilitar el acceso al control a través de dispositivos con tamaño de pantalla reducido, como es el caso de los teléfonos móviles inteligentes (smart phones), se ha implementado un modo de acceso simplificado. Este modo ofrece una información básica y la posibilidad de actuar sobre los valores de las distintas consignas de control. De esta manera, los operadores de la piscina pueden modificar el control sin estar presentes en la instalación, lo que reduce de forma considerable el desplazamiento a las instalaciones cuando se produce alguna anomalía.

El tercer modo de acceso a la información que ofrece la centralita se ha diseñado para ofrecer la información necesaria a los usuarios de la piscina, por lo que no permite actuar sobre el control, sino sólo observar el comportamiento de la instalación en tiempo real. En el hall de entrada a la piscina se ha colocado una pantalla plana que ofrece de forma permanente esta información a

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

los bañistas. La información ofrecida en este caso, está dirigida de modo particular al ciudadano, por lo que se muestra el ahorro económico que está produciendo por el uso de energías renovables, así como las emisiones de CO₂ evitadas. Todo ello con el fin de informar de lo eficaces que son las energías renovables y del compromiso de este Ayuntamiento en pro de la eficiencia energética, la optimización de los recursos y el empleo de las fuentes de energía más sostenibles.



Figura 60. Modo reducido de acceso al control

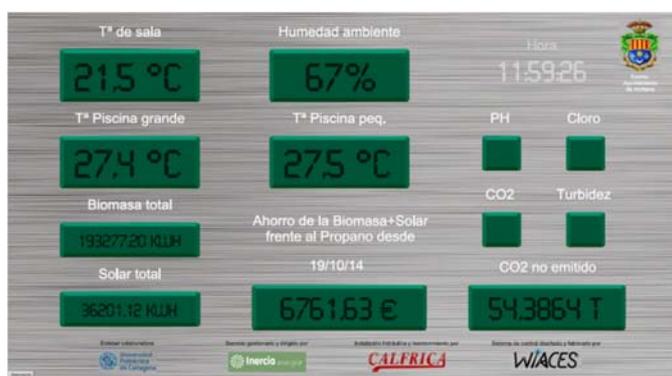


Figura 61. Pantalla de información dirigida al ciudadano

4.6.3. Ventajas del sistema de control y adquisición de datos implementado

El sistema de control avanzado implementado supone un paso adelante para la incorporación de las energías renovables en nuestras instalaciones, permitiendo su utilización más eficiente en cada momento. Esto supone innumerables ventajas. Las más importantes se enumeran a continuación:

- Sistema de comunicaciones entre sondas y centralita de control inalámbrico, lo que evita la necesidad de cablear toda la instalación.
- Centralita de diseño robusto pensada para resolver de forma autónoma una infinidad de problemas que pudieran surgir, como se ha mencionado en esta memoria.
- Sistema de adquisición de datos, quedando a disposición del grupo de investigación para desarrollar más conocimiento sobre el comportamiento energético de las piscinas climatizadas.
- Colaboración entre el Ayuntamiento de Archena y la Universidad Politécnica de Cartagena, poniendo a disposición toda la instalación y sus registros con el fin de generar conocimiento.
- Facilita la integración de distintas fuentes de energía renovable en una misma instalación, favoreciendo una u otra en función de su eficiencia en cada instante.
- Sistema abierto, que facilita la incorporación de nuevos módulos y sondas en caso necesario.
- Información divulgativa ofrecida al ciudadano, en tiempo real, sobre el funcionamiento de la piscina.
- Acceso remoto al control, sin necesidad de tener presencia física en la instalación.
- Dos posibilidades distintas de acceso al control: una completa, en modo SCADA, para acceso desde un ordenador; y otra simplificada para acceso desde equipos móviles como un teléfono móvil o una tableta.
- Retroalimentación de la experiencia registrada en forma de datos, de manera que el sistema va mejorando con el tiempo, suponiendo una optimización en cuanto al uso eficiente de los recursos.

4.7. Consumo de energía registrado en las piscinas climatizadas analizadas

Como se ha comentado anteriormente en este capítulo, se han utilizado cinco piscinas públicas climatizadas para validar el modelo propuesto en condiciones reales (Tabla 8). La primera de ellas, la del municipio de Archena, ha sido completamente sensorizada y monitorizada tal como se ha descrito en el apartado anterior. Por ello, la cantidad de información disponible es mucho más abundante y detallada. Sin embargo, los datos de consumo energético de las otras cuatro piscinas ubicadas en el municipio de Murcia provienen del informe de auditorías energéticas llevadas a cabo por la propiedad. En cualquier caso, la información aportada es suficiente para confirmar la validez del modelo propuesto en este trabajo.

Tabla 8. Piscinas en condiciones reales de uso empleadas para validar el modelo propuesto

Piscina	Tamaño del vaso	Usuarios/d
Archena	25 x 12,5	350
El Palmar	25 x 12,5	280
Infante	25,5 x 12,5	450
Mar Menor	25,5 x 12,5	500
Puente Tocinos	25,5 x 12,5	400

En todos los casos únicamente se han tenido en cuenta los vasos destinados a la actividad de la natación, no teniendo en cuenta el consumo energético generado por los vasos de chapoteo, ya que lo que se pretende es validar un modelo que luego se pueda aplicar a cualquier vaso del tamaño que sea.

La instalación térmica correspondiente a la piscina de Archena sigue el esquema representado en la Figura 43. En ella destacan la caldera de biomasa de 250 kW de potencia y la instalación solar térmica de 156 m² de superficie de captación solar. Los datos de consumo se extraen directamente del sistema de adquisición y almacenamiento de datos, que registra 9 caudales, 19 temperaturas, más la humedad relativa de la sala en la que se encuentra el vaso. La velocidad del aire sobre la superficie de la piscina no ha sido monitorizada, pues su valor es muy bajo en todas las condiciones (con usuarios, sin ellos, con la ventilación en marcha o apagada). Por tal motivo, dicha velocidad se ha considerado constante de un valor igual a 0,2 m/s.

Dada la importancia de la evaporación de agua en la demanda térmica del vaso, es importante recordar los mecanismos que gobiernan dicha evaporación [Rzeźnik \(2017\)](#)

- temperatura de la sala,
- humedad relativa y específica del ambiente,
- temperatura del agua en el vaso y

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

- nivel de agitación del agua que se tiene en cuenta a través del número de bañistas presentes en un momento determinado y que se ha registrado de manera precisa en el caso de la piscina de Archena.

De entre los datos medidos y registrados en la piscina de Archena, se han tenido en cuenta aquellos que definen los flujos de calor en los circuitos secundarios tanto de la caldera como de la instalación solar térmica, además de los que definen las condiciones del ambiente:

- caudal de agua proveniente de la caldera (en realidad proviene directamente del intercambiador conectado a su depósito de inercia),
- caudal de agua en el circuito secundario de la instalación solar,
- temperatura del agua en el vaso,
- temperatura del agua proveniente de la caldera (circuito secundario a partir del depósito de inercia),
- temperatura del agua proveniente del sistema solar térmico,
- temperatura del aire ambiente de la sala,
- humedad relativa del aire ambiente de la sala.

La Figura 62 muestra el aporte de calor necesario en el vaso de la piscina de Archena para mantener su temperatura, en un día típico. Durante las horas centrales del día, el aporte de calor depende principalmente de la instalación solar térmica, mientras que durante la noche es la caldera la que efectúa el único aporte de calor. En la gráfica también se puede observar el número de bañistas presentes cada hora tal y como se han registrado.

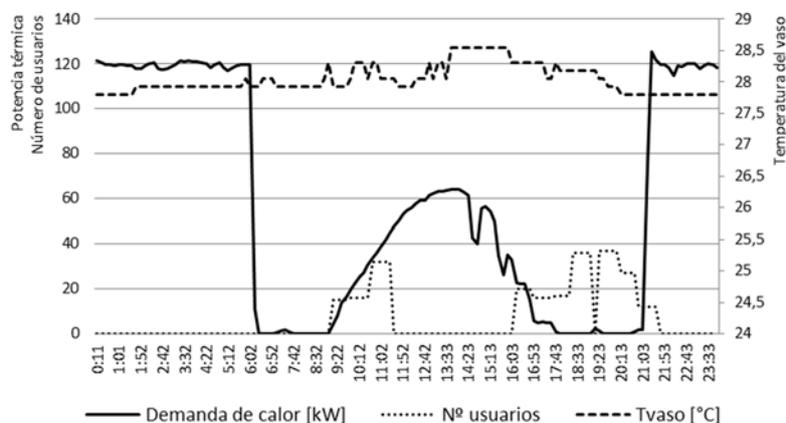


Figura 62. Demanda de calor del vaso principal de la piscina de Archena en un día típico de marzo

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

Tras una temporada completa de funcionamiento en la que se ha monitorizado el consumo de energía, desde noviembre a mayo (la instalación permanece cerrada desde junio a octubre), la demanda total es de 237.957,52 kWh (Figura 63)

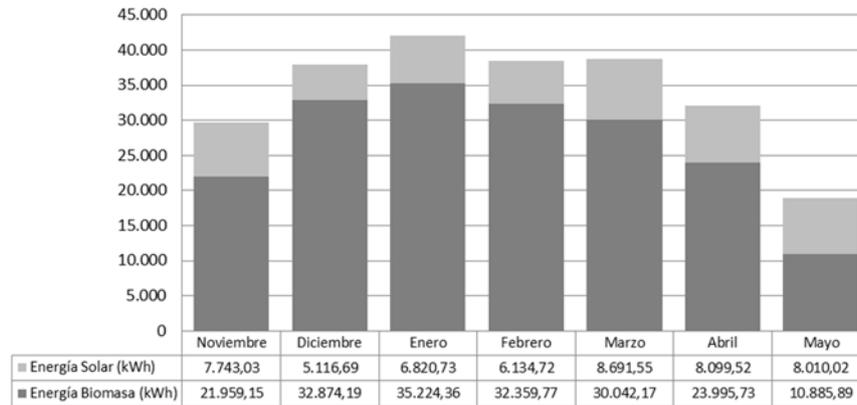


Figura 63. Demanda de calor del vaso principal de la piscina de Archena durante una temporada de utilización completa

4.8. Validación del modelo propuesto para estimar la demanda térmica de una piscina climatizada

Con el fin de validar el modelo, el módulo se alimenta de los datos registrados en la piscina de Archena, en condiciones reales, analizando los resultados durante un periodo comprendido entre los meses de noviembre y mayo, lo que equivale a una temporada completa de uso de la piscina. El resultado correspondiente a algunos días típicos se puede observar en las Figuras 64 a 66. Hay que destacar la relación existente entre la presencia de bañistas y la demanda térmica del vaso, al igual que ocurría en los resultados del modelo definido.

La validación del modelo se ha llevado a cabo en dos fases distintas. La primera contrasta los resultados mensuales obtenidos con los registros de datos reales obtenidos a través del sistema de monitorización de la piscina de Archena, durante una temporada completa. La segunda fase analiza de nuevo la piscina de Archena más otras cuatro instalaciones provenientes del municipio de Murcia. En este caso, se comparan los resultados totales anuales con los valores de demanda anual correspondientes a las cinco piscinas.

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

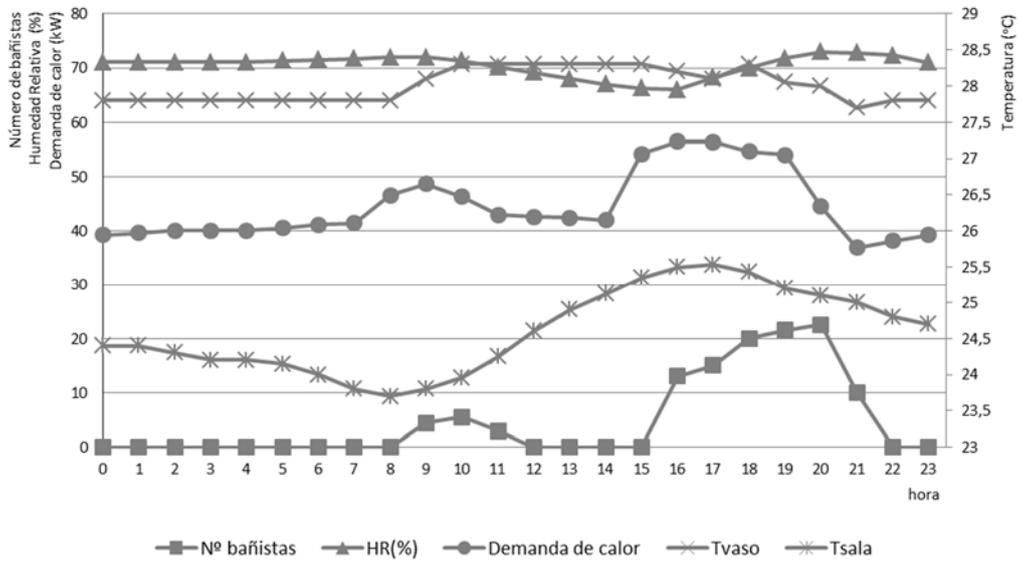


Figura 64. Registros obtenidos en la piscina de Archena en un día típico de marzo

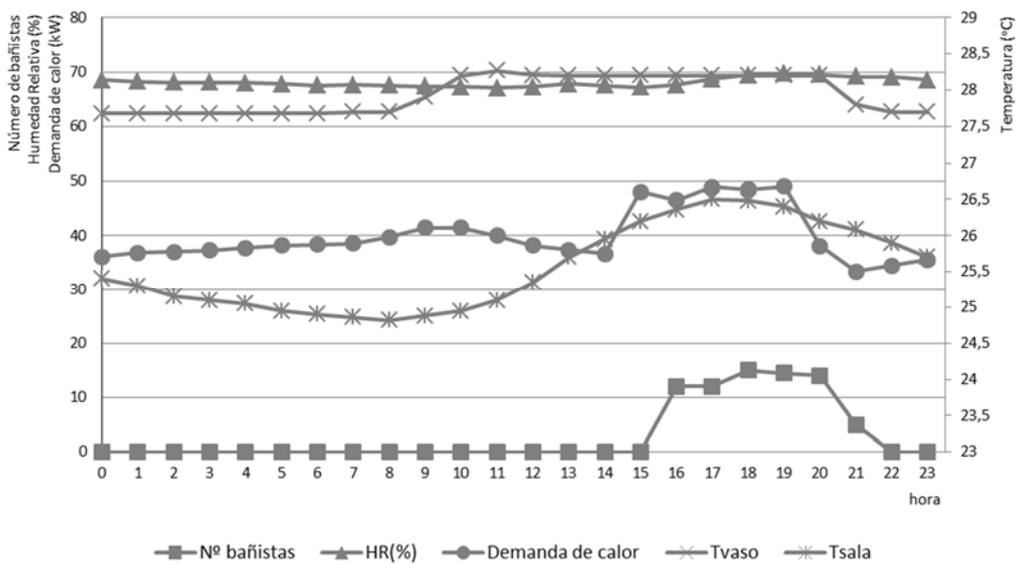


Figura 65. Registros obtenidos en la piscina de Archena en un día típico de abril

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

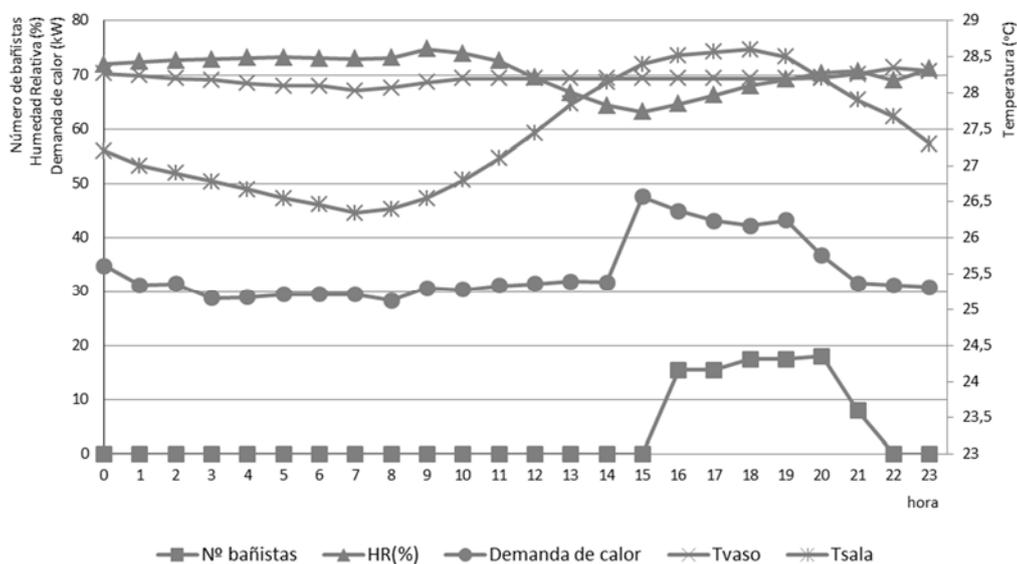


Figura 66. Registros obtenidos en la piscina de Archena en un día típico de mayo

Tanto en la Figura 62, como en las Figuras 64 a 66 se puede observar que el aporte de calor se realiza de una manera más continua que en las curvas ofrecidas por el modelo (Figuras 18 a 23). Esto es debido a que en la instalación real, la caldera no llegó a ofrecer más de 120 kW de potencia durante la temporada de prueba. Además, el hecho de disponer de un depósito de inercia del que se demandaba continuamente energía, no permitía elevar su temperatura, ofreciendo una potencia térmica baja pero continua.

Además de este hecho, durante la operación de la piscina de Archena se han detectado otras anomalías a destacar. El intenso mantenimiento que requieren las calderas de biomasa hace que con demasiada frecuencia sea necesario proceder a su limpieza, para lo que se ha de parar y dejar enfriar. Dicha operación dura prácticamente un día completo, durante el que la caldera no puede aportar calor al vaso. También fueron frecuentes las paradas de caldera por problemas de alimentación del combustible (principalmente atascos en los conductos con tornillo sin fin que trasiegan el combustible). Todo ello hace que el comportamiento de la piscina en periodos de tiempo cortos sea muy dispar y difiera notablemente del modelo definido. Sin embargo, a nivel global, veremos que el modelo refleja con bastante fidelidad lo que ocurre en realidad.

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

4.8.1. Fase 1: Validación del modelo con la piscina monitorizada de Archena

Los resultados mensuales del modelo en comparación con los registros reales se pueden observar en la Tabla 9 y Figura 67. El error relativo entre la estimación del modelo y la realidad se ha calculado en base a la Ecuación 14:

$$Error (\%) = \frac{Q_{model} - Q_{real}}{Q_{real}} \cdot 100 \quad (14)$$

Tabla 9. Demanda energética real de la piscina de Archena comparada con los resultados del modelo propuesto. Error relativo en %

	Demanda energética registrada (kWh)	Demanda energética estimada por el modelo (kWh)	Error relativo
Noviembre	29.702,18	32.254,86	8,59%
Diciembre	37.990,88	33.878,46	-10,82%
Enero	42.045,10	37.253,57	-11,40%
Febrero	38.494,49	31.183,26	-19,99%
Marzo	38.733,72	36.237,75	-6,44%
Abril	32.095,24	34.708,84	8,14%
Mayo	18.895,91	21.067,66	11,49%
Total	237.957,52	226.584,40	4,78%

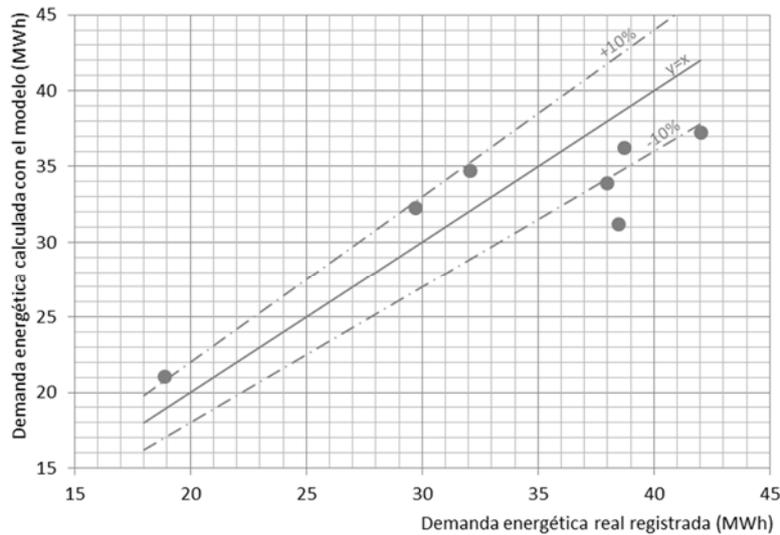


Figura 67. Comparación de la demanda estimada por el modelo propuesto con los registros de demanda real de la piscina de Archena

4. Validación del modelo definido para estimar el comportamiento dinámico de la piscina

El error relativo difiere entre el -20,0% correspondiente al mes de febrero y el +11,5% de mayo. Esto significa que el modelo propuesto sobrestima la demanda en los meses cálidos mientras que la infraestima en los meses más fríos. Sin embargo, el error cometido en la estimación de la demanda durante toda la temporada permanece acotado con un valor de +4,78%. Este error es coherente con otros análisis llevados a cabo sobre la evaporación del agua de la piscina, existentes en la bibliografía, en los que el modelo de estimación de la tasa de evaporación de Shah ofrece una desviación media del 14,5% (Shah 2014). Sin embargo, estos análisis previos se realizaron en base a registros empíricos llevados a cabo por otros autores, y no a un sistema de monitorización completo como el utilizado en la piscina de Archena para este trabajo.

4.8.2. Fase 2: Validación del modelo con la demanda térmica anual en cinco piscinas

En esta segunda fase, los resultados ofrecidos por el modelo han sido confrontados con los datos de consumo anual provenientes de cuatro piscinas climatizadas de Murcia más la de Archena. En las cuatro primeras, los datos de consumo han sido extraídos de sendas auditorías energéticas llevadas a cabo sobre estas instalaciones por la propiedad. En su caso, la temporada de baño se alarga desde septiembre hasta mayo. Comparando los resultados de nuestro modelo, adaptado a cada instalación, con los consumos anuales reales, los errores relativos se estrechan aún más, oscilando entre -11,96% correspondiente a la piscina de Puente Tocinos y +8,23% en la piscina Mar Menor (Tabla 10). El error relativo medio para las 5 instalaciones es de -1,77%, siendo en 4 de los 5 casos la diferencia inferior al 10% (Figura 68)

Tabla 10. Demanda energética real de las piscinas analizadas comparada con los resultados del modelo propuesto. Error relativo en %

	Demanda energética registrada (kWh)	Demanda energética estimada por el modelo (kWh)	Error relativo
Archena	257.957	270.415	4,83%
El Palmar	472.775	433.479	-8,31%
Infante	423.363	436.084	3,00%
Mar Menor	323.931	350.603	8,23%
Puente Tocinos	379.477	334.076	-11,96%
Total	1.857.503	1.824.657	-1,77%

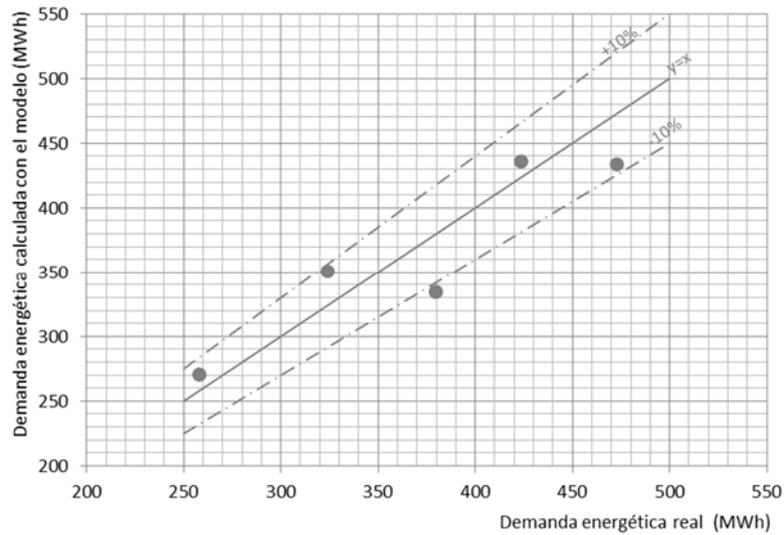


Figura 68. Comparación de la demanda estimada por el modelo propuesto con la demanda real en las cinco piscinas analizadas

4.9. Conclusiones del proceso de validación del modelo

Como resultado del proceso de validación, se puede concluir que, mientras otros trabajos previos se han centrado en la estimación de la tasa de evaporación del agua del vaso, este va más allá y evalúa la demanda térmica en su conjunto. Además, el conocimiento del comportamiento dinámico de la piscina permite una mejor gestión de los sistemas. Además, el nivel de precisión obtenido es muy elevado, constituyendo una herramienta útil para proyectistas y diseñadores de piscinas climatizadas, tanto para el dimensionado de sus instalaciones térmicas, como para una estimación más precisa de los consumos energéticos de la instalación y sus costes de operación.

5. Análisis de sensibilidad

Disponer de un modelo de simulación dinámica diseñado para conocer el comportamiento de una instalación térmica tan compleja como la de una piscina climatizada, permite realizar análisis de sensibilidad que permitan establecer el impacto sobre el consumo producido por la modificación de las variables principales de operación en la instalación. Aprovechando dicha posibilidad, se han llevado a cabo tres análisis distintos para conocer el impacto sobre la demanda anual de energía de una piscina, en función de tres parámetros operacionales clave: las temperaturas del agua del vaso y del ambiente de la sala, y la humedad relativa de la sala.

Aunque la mayoría de las regulaciones internacionales recomiendan una temperatura del agua del vaso de 26°C para la práctica de la natación, con un diferencial de +1/2°C para la temperatura de la sala, y una humedad relativa del 65%, la experiencia demuestra que las condiciones usuales de operación difieren considerablemente de estas consignas, elevando la temperatura del vaso hasta 28°C y de forma equivalente la de la sala.

5.1. Relación entre demanda y temperatura del vaso

El primer análisis llevado a cabo estudia la demanda térmica del vaso para distintos valores de temperatura del agua entre 24 y 30°C, manteniendo constantes el resto de parámetros. La temperatura de la sala queda definida con 1°C por encima de la del agua del vaso, para cumplir normativa.

El resultado ofrece que la relación entre la demanda energética del vaso y su temperatura resulta muy lineal (Tabla 11 y Figura 69), siguiendo la expresión: $34,902 \cdot T_p - 546,57$ (MWh), con $R^2 = 0,9978$. De tal manera, el impacto del incremento de temperatura en el vaso desde los 26°C que recomienda la normativa hasta los 28°C utilizados en las 5 instalaciones analizadas, representa un incremento del 16,13% en la demanda del vaso y hasta del 17,30% si se tiene en cuenta también la calefacción de la sala. Esto significa un incremento en la demanda de 69,3 MWh para el calentamiento del vaso y de 176,70 MWh si se tiene en cuenta además la calefacción de la sala.

Dicho análisis ofrece, como resultado global, un incremento del 9,53% de la demanda de energía en el vaso por cada grado Celsius de incremento de temperatura en el agua.

Tabla 11. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de temperatura en el vaso (°C), siendo $T_r = T_p + 1$ y $\Phi = 65\%$

Temperatura vaso	24	25	26	27	28	29	30
Demanda Vaso	287,19	331,20	360,34	397,82	429,64	461,24	503,15
Demanda Vaso + Sala	672,21	763,85	844,54	935,33	1021,24	1107,72	1204,88

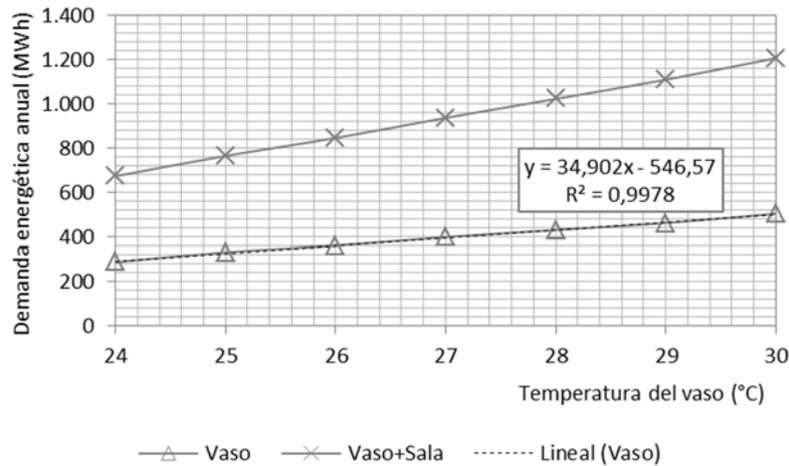


Figura 69. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de temperatura en el vaso (°C), en las mismas condiciones que la Tabla 11

5.2. Relación entre demanda y diferencia de temperatura entre el ambiente de la sala y el agua del vaso

Por otro lado, el sistema piscina-sala es también sensible a la diferencia de temperatura entre el ambiente de la sala y el agua del vaso. Por ello, se ha llevado a cabo un análisis para relacionar la demanda de energía con esta diferencia de temperatura, manteniendo la temperatura del vaso constante a 28°C, al igual que el resto de parámetros. La temperatura de la sala se ha hecho variar desde 25 hasta 31°C, por lo que la diferencia $T_r - T_p$ adquiere valores comprendidos entre -3 y +3°C.

El análisis ofrece una relación polinómica de grado 2 (Tabla 12 y Figura 70), resultando que la demanda del vaso sigue la expresión: $2,7369 \cdot (T_r - T_p)^2 - 20,183 \cdot (T_r - T_p) + 276,7$ (MWh), con $R^2 = 0,9962$. Es decir, un incremento en la temperatura de la sala se traduce en una reducción en la demanda del vaso, de manera que incrementar 1 o 2°C la temperatura de la sala con respecto a

la del vaso supone una reducción del 3,38% y 9,19% de la demanda respectivamente, con respecto a la situación en la que ambas temperaturas sean iguales. Sin embargo, un análisis conjunto de la demanda del vaso más la calefacción de la sala supone incrementos del 5,55% y 10,39% respectivamente.

Tabla 12. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de T_r-T_p , siendo $T_p = 28^\circ\text{C}$ y $\Phi = 65\%$

ΔT (sala-vaso)	-3	-2	-1	0	1	2	3
Vaso	360,55	330,99	299,76	271,94	262,75	247,04	240,48
Vaso + Sala	745,58	763,65	783,94	809,41	854,31	893,49	942,18

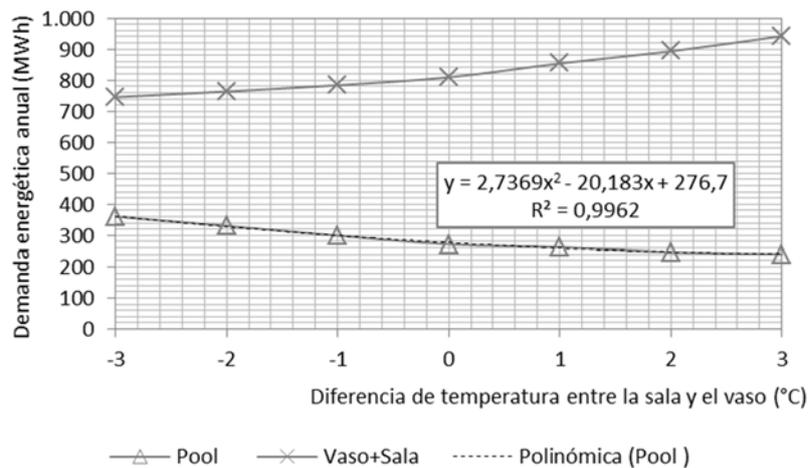


Figura 70. Demanda energética anual del vaso y del vaso y la sala, calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de T_r-T_p , en las mismas condiciones que la Tabla 12

5.3. Relación entre demanda y humedad relativa del aire de la sala

Por último, se ha llevado a cabo un análisis para evaluar la dependencia entre la demanda y la humedad relativa del ambiente de la sala. Para ello se ha calculado dicha demanda para niveles de humedad entre 50% y 80%, manteniendo la temperatura del vaso en 28°C , un grado por encima la temperatura del aire de la sala, sin modificar el resto de parámetros.

El análisis ofrece como resultado una relación polinómica de grado 2 entre la demanda del vaso y la humedad relativa ambiente (Tabla 13 y Figura 71), de manera que la demanda sigue la expresión: $1049,1 \cdot \Phi^2 - 1815,5 \cdot \Phi + 1167,1$ (MWh), con $R^2=0,9989$.

El modelo ofrece incrementos medios del 8,08% en la demanda por cada 5 puntos de reducción en la humedad relativa ambiente. Sin embargo, el análisis del impacto sobre la demanda de calefacción de la sala ofrece, en una primera aproximación, una práctica independencia con la humedad relativa de la sala.

Tabla 13. Demanda energética anual del vaso calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de humedad relativa de la sala (%), siendo $T_p = 28^\circ\text{C}$ y $T_r = 29^\circ\text{C}$

Humedad relativa	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%
Demanda energética	519,97	487,72	457,11	429,64	407,67	396,19	386,67

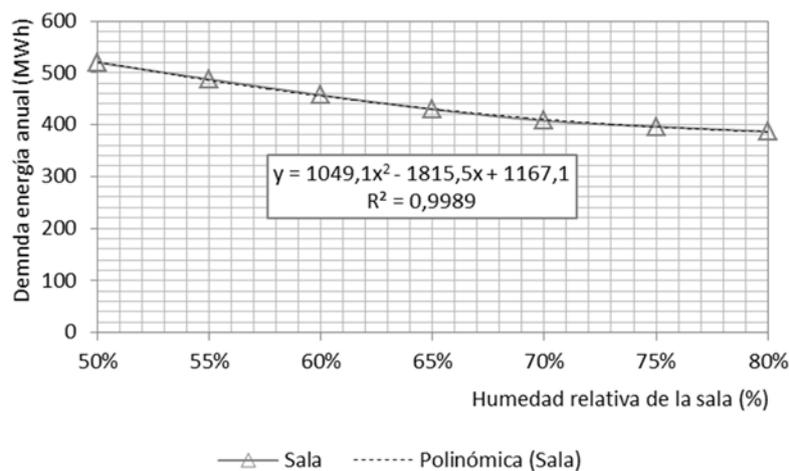


Figura 71. Demanda energética anual del vaso calculada con el modelo (MWh) para diferentes valores de humedad relativa de la sala (%), en las mismas condiciones que la Tabla 13

Como resultado de este análisis de sensibilidad, se puede concluir que las condiciones de operación que significan una menor demanda y un mayor nivel de eficiencia energética, cumpliendo los requisitos establecidos en los distintos reglamentos, deben perseguir puntos de consigna con una temperatura en el vaso de 26°C , con 27°C en la sala y una humedad relativa del 65%.

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

Como se ha podido observar a lo largo del presente trabajo, en general, las instalaciones energéticas de las piscinas climatizadas son complejas y presentan dificultades para implementar medidas de mejora en su eficiencia. Por ello, es muy importante identificar dónde y cuándo se consume energía, y hemos visto que fundamentalmente el aporte de calor se necesita para:

- compensar las pérdidas de calor en el vaso;
- calentar el ambiente de la sala; y
- suministrar agua caliente para otros servicios, como las duchas de los bañistas.

En cuanto a las pérdidas de calor producidas en el vaso, se ha visto la importancia que adquiere la evaporación de agua y su efecto refrigerante en su demanda de calor. Y esto ocurre incluso con la piscina cerrada y sin usuarios, lo que significa que el suministro de energía térmica se ha de mantener durante las 24 horas del día, todos los días del año.

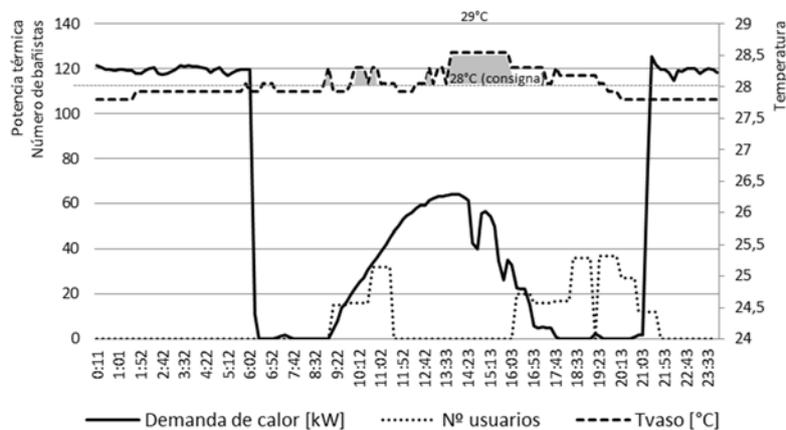


Figura 72. Demanda energética del vaso de la piscina de Archena durante un día típico de marzo. La zona sombreada representa el sobrecalentamiento producido por la instalación solar

También se ha podido demostrar, a través de un análisis de sensibilidad, que un incremento en la temperatura del agua del vaso supone un incremento de la demanda por unas mayores pérdidas por evaporación, entre otras. Además, esta mayor tasa de evaporación supone una

superior carga de trabajo para la deshumectadora, que ha de mantener la humedad relativa fijada como consigna, lo que se traduce en un consumo eléctrico mayor.

Debido a esta complejidad de los mecanismos que generan la demanda de calor en el vaso, se necesita un conocimiento más profundo de los procesos para conseguir una mejora en la eficiencia de los sistemas y una reducción en sus costes energéticos y de operación.

6.1. El problema del sobrecalentamiento del vaso

El completo sistema de monitorización implementado sobre la piscina municipal de Archena ha permitido el registro de mucha información, válida para entender el funcionamiento de sus instalaciones térmicas. El análisis de estos datos muestra que la caldera es el principal suministro de calor durante la noche, mientras que durante el día, si el aporte de la instalación solar es suficiente, la caldera permanece inactiva.

En ocasiones, tras el calentamiento nocturno del vaso por parte de la caldera, un elevado nivel de radiación solar durante el día produce un aporte adicional de calor que conduce al sobrecalentamiento del vaso, por encima de su temperatura de consigna (Figura 72). Esto ocurre en días soleados, porque la instalación solar no puede dejar de generar calor mientras recibe radiación solar. En efecto, una parada del sistema solar mientras recibe un nivel de radiación importante deriva en el sobrecalentamiento de su circuito primario, pudiendo llegar a la vaporización del fluido caloportador y generando una situación de difícil gestión. Por tal motivo, las instalaciones solares ligadas a piscinas fuerzan el vertido del calor generado sobre el vaso aun habiéndose alcanzado la temperatura de consigna.

El sobrecalentamiento producido sobre el vaso de la piscina genera un efecto multiplicador: una mayor temperatura del agua supone una mayor tasa de evaporación, lo que se traduce en mayores pérdidas de calor, mayor consumo de la deshumectadora para controlar el grado de humedad en el ambiente y una reducción del rendimiento de la instalación solar por incremento de su temperatura de funcionamiento. Pero la mayor ineficiencia resulta del hecho de la piscina no necesita ser calentada hasta ese nivel, produciendo un gasto energético sin sentido.

En este trabajo se ha valorado la mejora potencial de la eficiencia energética en las instalaciones térmicas, derivada de la implantación de estrategias de control basadas en modelos predictivos, en el caso de una piscina climatizada mediante el aprovechamiento de energías renovables como son la energía solar y la biomasa. De esta manera se pretende una mejor integración de los flujos energéticos provenientes de la caldera de biomasa y de la instalación solar térmica, armonizando

su funcionamiento, maximizando el aprovechamiento de la instalación solar frente al consumo de combustible, y evitando el desperdicio energético.

Para ello se ha utilizado el modelo previamente desarrollado para la simulación dinámica del comportamiento de la piscina de Archena, una vez validados sus resultados mediante la comparación con datos reales. Este modelo ha servido para la definición del control predictivo basado en un proceso de aprendizaje llevado a cabo a partir de los datos registrados, para la estimación de los ahorros energéticos en comparación con un control convencional del tipo PID, y para la definición de los ajustes del control predictivo mediante la simulación dinámica con distintos valores de los parámetros clave.

6.2. Construcción de un modelo de control predictivo para una piscina climatizada

Este trabajo pretende demostrar que el uso de controles predictivos puede mejorar la eficiencia energética de piscinas climatizadas que dispongan de una instalación solar térmica. Como se puede observar en la Figura 72, el aporte de la instalación solar al calentamiento del vaso es muy importante. Sin embargo, este flujo de energía no puede ser correctamente gestionado, pues calienta el vaso en todo momento que reciba radiación solar y sea capaz de calentar el agua, aunque no sea realmente necesario dicho calor en ese instante. Los controles predictivos podrían permitir una mejor integración de las fuentes de energía renovable que componen el binomio solar térmica y biomasa.

Las piscinas son sistemas de muy elevada inercia térmica. En el caso particular de la piscina municipal de Archena, teniendo en cuenta su volumen de agua (625 m^3), la energía necesaria para incrementar su temperatura en un grado Celsius es $726,56 \text{ kWh}$ (Ecuación 15). Además, aunque la potencia térmica de la caldera de biomasa sea de 250 kW , la demanda punta del vaso no es superior a 120 kW . Esto significa que la inercia térmica del vaso permite una pérdida de temperatura inferior a 1°C durante un periodo de tiempo de 6 horas sin ningún aporte térmico. Estos parámetros dependen, lógicamente, de la piscina objeto del estudio.

$$Q_{1^\circ\text{C}} = m_{wp} \cdot c_w = 726,56 \text{ kWh} \quad (15)$$

El objetivo del control propuesto no es otro que maximizar el aprovechamiento del flujo calor procedente de la instalación solar térmica para calentar el vaso en lugar de sobrecalentarlo. Para ello se tiene en cuenta su inercia térmica, así como el rango de oscilación térmica permitido por la reglamentación con respecto a la temperatura de consigna del vaso ($\pm 1^\circ\text{C}$). Con este fin, se forzaría una parada anticipada de la caldera durante las noches previas a días soleados (aun existiendo demanda por parte del vaso), con el fin de maximizar el aprovechamiento de la

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

energía solar térmica durante el día inmediatamente posterior, reduciendo así el consumo de combustible en la caldera.

En este caso, como ocurre en edificios (Mieziš et al. 2017), un control basado en la estrategia de apagado anticipado (ESO) puede ser suficiente para dicho propósito, evitando complejas formulaciones y algoritmos que conduzcan a controles predictivos más precisos. Sin embargo, el control ESO propuesto es también de tipo predictivo, debido a la necesidad de conocer con antelación el nivel de radiación solar que habrá durante el día siguiente. Esta predicción del nivel de radiación permite estimar la energía solar térmica producida durante las horas que siguen a la parada forzada de la caldera, horas antes de que comience la generación térmica por parte de la instalación solar.

Una vez definido el algoritmo que se implemente en el nuevo control, se lleva a cabo la simulación dinámica de la piscina con el programa TRNSYS para estimar el ahorro anual de combustible en la caldera.

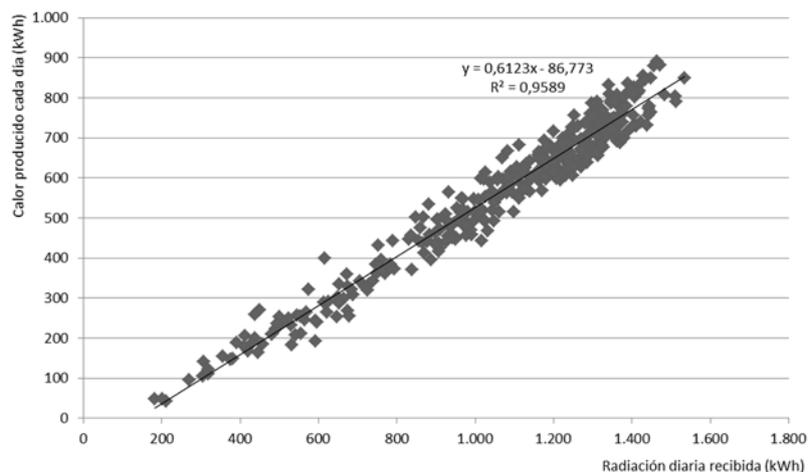


Figura 73. Relación entre la radiación solar recibida y la energía solar generada cada día del año

6.2.1. Estimación de la energía térmica generada por la instalación solar

El primer paso para desarrollar el modelo de control predictivo consiste en estimar la energía generada por la instalación solar térmica en relación con la cantidad de radiación solar recibida. El nuevo control predictivo tendrá acceso a la predicción meteorológica a través de internet para conocer la previsión del nivel de radiación solar durante el día siguiente y así poder estimar la

cantidad de calor que será generada por la instalación solar térmica. Como esta instalación ha sido previamente modelada en TRNSYS, esta estimación puede ser directamente obtenida a partir de los resultados de la simulación. La Figura 73 representa la relación entre la radiación solar diaria recibida y la energía térmica producida, cada día del año. Además, se ha llevado a cabo un análisis de regresión lineal con estos datos, ofreciendo una correlación según la expresión de la Ecuación 16, que relaciona la energía térmica generada por la instalación solar (y) en función de la radiación solar recibida (x), ambas en kWh. Un valor de $R^2=0,9589$ asegura una buena estimación de la energía producida por un cierto nivel de radiación solar.

$$y = 0.6123x - 86.773 \quad (16)$$

La ecuación 15 será utilizada por el control propuesto para estimar la cantidad de calor que podrá generar la instalación solar a partir del nivel de radiación definido en la predicción meteorológica. Obviamente, dicha relación es solo aplicable al caso concreto de la piscina analizada, definida por sus dimensiones, ubicación e instalación solar. Para casos distintos a este, la ecuación debe ser re-estimada mediante un proceso de autoaprendizaje continuo basado en el registro de datos. De esta manera, el control irá adquiriendo precisión conforme se incrementa el número de registros que relacionen la energía solar generada con el nivel de radiación recibido a lo largo del día.

6.2.2. Fundamentos del control predictivo propuesto

El objetivo básico del control propuesto será mantener la temperatura del agua del vaso lo más próxima posible a la que establezca el valor de consigna. Pero dado que situar la temperatura del vaso exactamente en la consigna sería imposible, además, el control ha de ser capaz de mantener la temperatura en el rango de $\pm 1^\circ\text{C}$ que establece la reglamentación.

Con el fin de comprobar cómo se comporta la temperatura del vaso durante todo el año, se ha llevado a cabo un análisis estadístico de su evolución para una temperatura de consigna de $T_{sp} = 28^\circ\text{C}$, ofreciendo los resultados mostrados en la Tabla 14. Para ello se han definido cuatro parámetros que representan el cumplimiento de una condición que relaciona la temperatura del vaso con la consigna. El parámetro *Cond1* cuenta las horas del año en las que la temperatura del agua es inferior a la de consigna; *Cond2* refleja las horas con una temperatura inferior a la de consigna menos un grado Celsius; *Cond3* marca las horas con temperatura del agua superior a la de consigna; y *Cond4* hace un recuento de las horas del año en la que el agua del vaso se ha sobrecalentado por encima del valor de consigna más un grado Celsius.

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

Como resultado de dicho análisis, mientras que el 10,87% del tiempo la temperatura del vaso se encuentra por debajo del valor de consigna, el resto del tiempo (89,13%) se encuentra por encima, estando un 2,05% de las horas por encima de 29°C, es decir, más de un grado sobre la consigna, momento en el que dicho valor no cumpliría con el reglamento.

Tabla 14. Análisis estadístico de la temperatura del vaso en función de los 4 parámetros definidos

Parámetro	Condición	Número de horas	%
Cond1	$T_{wp} < T_{sp}$ (28°C)	952	10.87%
Cond2	$T_{wp} < T_{sp} - 1$ (27°C)	0	
Cond3	$T_{wp} > T_{sp}$ (28°C)	7808	89.13%
Cond4	$T_{wp} > T_{sp} + 1$ (29°C)	180	2.05%

T_{wp} = temperatura del vaso; T_{sp} = temperatura de consigna (28°C)

Esto significa que la temperatura del agua se sitúa por encima del valor de consigna durante la mayor parte del año, aun con valores permitidos entre 27 y 28°C. El nuevo control se centrará en esos momentos en los que la temperatura del agua asciende por encima de 28°C y hasta más allá de los 29°C, tratando de reducir este valor mediante un seguimiento más estrecho. El control tipo ESO deberá impedir el uso de la caldera durante la noche cuando la instalación solar sea capaz de producir suficiente energía durante todo el periodo soleado del día siguiente, para cubrir las necesidades térmicas del vaso. Todo ello sin olvidar lo más importante: que la temperatura del vaso no descienda por debajo de $T_{sp} - 1^\circ\text{C}$, de acuerdo con la normativa actual.

Además de lo anterior, se ha definido un nuevo parámetro para ayudar en el proceso de toma de decisión del control predictivo. Este parámetro C representa la capacidad que tiene la energía aportada por la instalación solar para elevar la temperatura del vaso en un grado Celsius. Como se ha indicado en la Ecuación 15, la energía necesaria para incrementar en un grado Celsius la temperatura del vaso es 726,56 kWh/K. Así:

$$C = \frac{Q_{sol}}{726.56} \quad (17)$$

donde Q_{sol} es el calor generado diariamente por la instalación solar térmica (kWh). Las dimensiones de C son las de la temperatura.

El control propuesto debe ligar el valor de C con el periodo de anticipación del apagado de la caldera (control ESO), siempre observando el ahorro de energía y la temperatura del agua gracias a los cuatro parámetros mostrados en la Tabla 14. Esto significa que, a lo largo del año, T_{wp} no puede ser inferior a T_{sp} menos un grado. Además, con el fin de no correr el riesgo de que la temperatura del vaso sea inferior a la mínima permitida, y siempre teniendo en cuenta el valor

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

de C , será necesario que el valor mínimo de T_{wp} sea igual a $T_{sp}-1^{\circ}\text{C}$ para hacer actual al control ESO. Así, el control propuesto actuará apagando la caldera si y sólo si se cumplen las dos condiciones siguientes:

- $T_{wp} > T_{sp} - 1^{\circ}\text{C}$
- $C > C_{limit}$, siendo C_{limit} igual a un cierto valor que permite una aportación solar mínima durante el día siguiente.

El algoritmo principal del control propuesto se muestra en la Figura 74. Es necesario destacar que en caso de que no se actúe con el apagado anticipado, la gestión de la caldera permanece dependiente del control PID convencional.

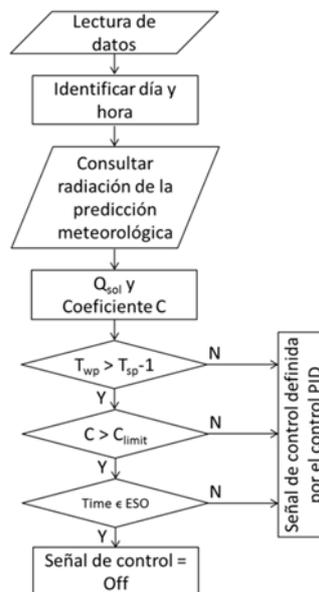


Figura 74. Flujograma correspondiente al algoritmo propuesto para el control predictivo ESO

6.3. Modelado de la piscina en TRNSYS incluyendo el control predictivo

El análisis del ahorro energético anual conseguido en la piscina por la aplicación de un control ESO predictivo se ha llevado a cabo mediante simulaciones del comportamiento del sistema utilizando el programa TRNSYS. Para ello, el modelo descrito anteriormente ha sido debidamente modificado para introducir un tamaño de instalación solar más ajustado a las

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

necesidades de la piscina, pasando de 82 a 100 captadores solares, así como el control previamente definido.

Para ello se ha definido un nuevo componente que integra los algoritmos de control definidos en la Figura 74. El modelo final en TRNSYS se compone de los siguientes conjuntos de elementos (Figura 75):

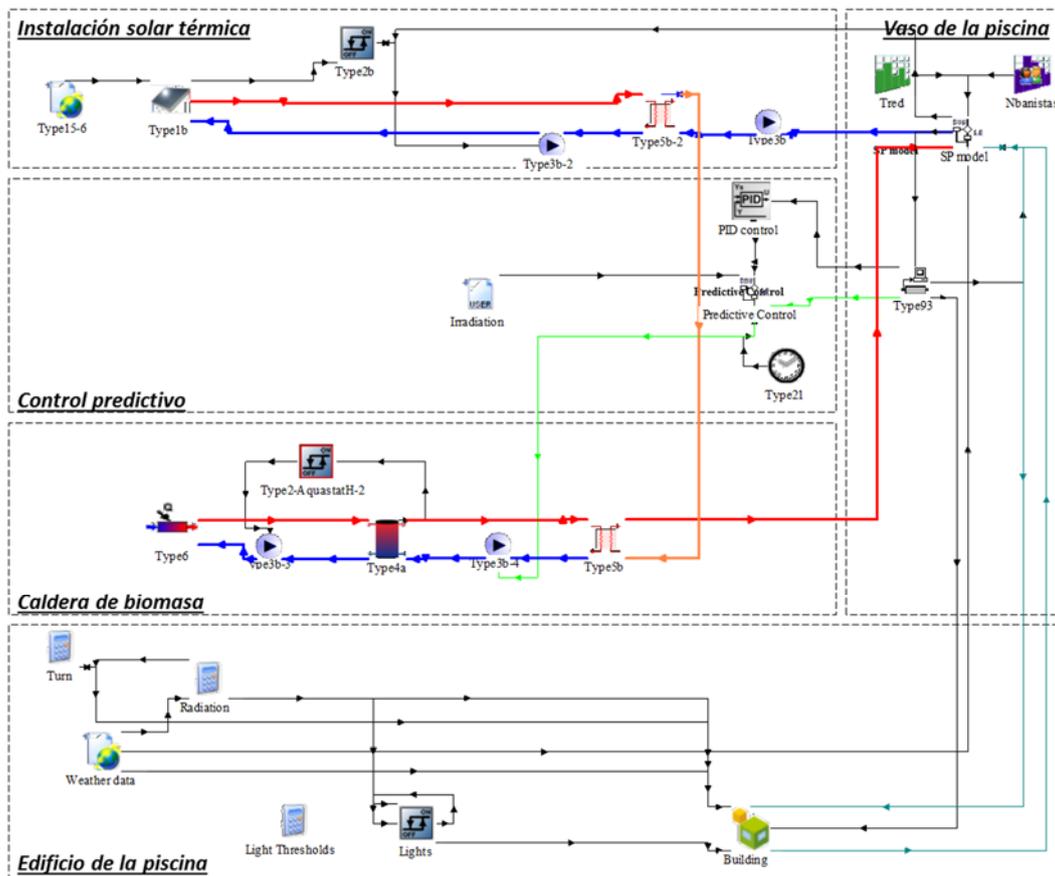


Figura 75. Modelo desarrollado en TRNSYS para implementar el Nuevo control predictivo ESO

- **Edificio:** Se ha definido en base al módulo específico de TRNSYS denominado TRNSBuild, componente que permite la evaluación de edificios multizona utilizando la función de transferencia. De esta manera, las condiciones de la sala pueden ser calculadas hora a hora durante todo el año.
- **Instalación solar térmica:** Se ha definido en base a los componentes convencionales de TRNSYS, que permiten el diseño de una instalación solar completa, en este caso, de acuerdo con las características de la piscina.

- **Caldera de biomasa:** Este conjunto incluye, no sólo la caldera en sí, sino su tanque de inercia y los elementos auxiliares necesarios.
- **Vaso de la piscina:** Este conjunto incluye el componente *SP model*, previamente desarrollado y validado en condiciones reales como ya se ha explicado en este trabajo.
- **Control predictivo:** El conjunto comprende el nuevo componente desarrollado a tal fin y denominado *Predictive Control*, que actúa en serie y aguas abajo del control PID convencional de la caldera. Este componente fuerza el apagado de la caldera, en ciertas condiciones y de manera independiente a lo indicado por el control PID.

6.4. Aplicación y prueba del control predictivo

El objetivo del nuevo control es definir un cierto periodo de tiempo, anterior al arranque de la instalación solar cada mañana, en el que se fuerce el apagado de la caldera. Para tomar esta decisión, el control usa el parámetro C , previamente definido, que representa el posible incremento de temperatura en el vaso debido únicamente al aporte solar correspondiente al día siguiente. En una primera aproximación, cuanto mayor sea el tiempo de anticipación del apagado, mayor será el ahorro energético. Sin embargo, esta estrategia podría conllevar el riesgo de un nivel de temperatura en el vaso por debajo de las exigencias reglamentarias. Para evitar esto, las condiciones representadas en los parámetros *Cond1* a *Cond4*, definidos en la Tabla 14, han sido debidamente monitorizados en cada paso de la simulación y en cada bucle del control. De entre los cuatro, el más crítico es *Cond2*, que representa el número de horas del año en las que el agua del vaso se encuentra a por debajo de la temperatura de consigna menos un grado Celsius. Así, el número de horas del año en las que se cumpla esta condición ha de ser nulo para que los ensayos se consideren válidos.

Por otro lado, para definir un periodo de apagado anticipado, es necesario definir el momento exacto en el que la caldera para, en condiciones normales, por acción del control PID. Como no es posible conocer dicho instante por adelantado, se han definido distintos periodos de tiempo, empezando durante la noche y terminando durante el día, cuando arranca la instalación solar. Durante las pruebas de simulación llevadas a cabo, la caldera será forzada a parar durante estos periodos, en ciertas condiciones y en función del valor del parámetro C .

Con el fin de definir las horas de funcionamiento habitual de la caldera (muy a menudo durante las noches) y el momento de arranque de la instalación solar, tras una serie de simulaciones y la observación de sus resultados, se proponen periodos para el apagado anticipado de la caldera que comienzan en la media noche (00:00) y acaban a cuatro diferentes horas durante el día

[11:00,13:00,15:00,17:00]. Otras simulaciones llevadas a cabo con periodos ESO retrasados, comenzando a las 2:00 o 4:00, han dado resultados menos interesantes.

Además de lo anterior, doce valores de C_{limit} han sido definidos para ser utilizados en la segunda condición que activa el control ESO. Dado que el máximo valor de C es 1,17 (calculado en base al máximo aporte solar diario durante el año), los valores límites elegidos son [0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1]. Esto significa que el control sólo fuerza la parada de la caldera cuando C es superior a uno de estos valores. Cuando el valor límite es 0,0, el control para la caldera cada noche del año, y cuando es 1,1, el control sólo actúa un número limitado de noches durante el año.

6.4.1. Ajuste del control ESO predictivo

En total son 48 las combinaciones posibles a testar, utilizando los valores propuestos de C_{limit} y los periodos de apagado anticipado definidos. Todas ellas han sido simuladas, controlando siempre el parámetro $Cond2$ y evaluando la mejora en la eficiencia energética del sistema. Para analizar esta mejora en la eficiencia energética se han calculado cuatro parámetros distintos, en cada ensayo, para el conjunto del año y comparado con los resultados utilizando el control PID convencional (Tabla 16):

- Reducción de la demanda térmica del vaso (Figura 76)
- Incremento de la producción solar debido a la reducción de la temperatura media en el vaso, lo que incrementa el rendimiento del campo de colectores solares (Figura 77)
- Factor de aporte solar (porcentaje de calor aportado por la instalación solar térmica con respecto al total aportado) (Figura 78)
- Ahorro energético en la caldera de biomasa, lo que representa una reducción directa de los costes energéticos de la instalación (Figura 79)

Los resultados indican que actuando sobre la caldera en el periodo de tiempo comprendido entre la media noche y las 13:00, con un $C_{limit} = 0,7$, la demanda energética del vaso se reduce en un 18,76% (Figura 76). Además, aunque el incremento de la generación solar térmica no es significativa (0,14%, Figura 77), la contribución solar es la mayor de todos los ensayos, pasando del 55,83% en caso de utilizar el control PID, al 68,82% con el control ESO predictivo propuesto (Figura 78), lo que representa un incremento de 12,99 puntos absolutos.

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

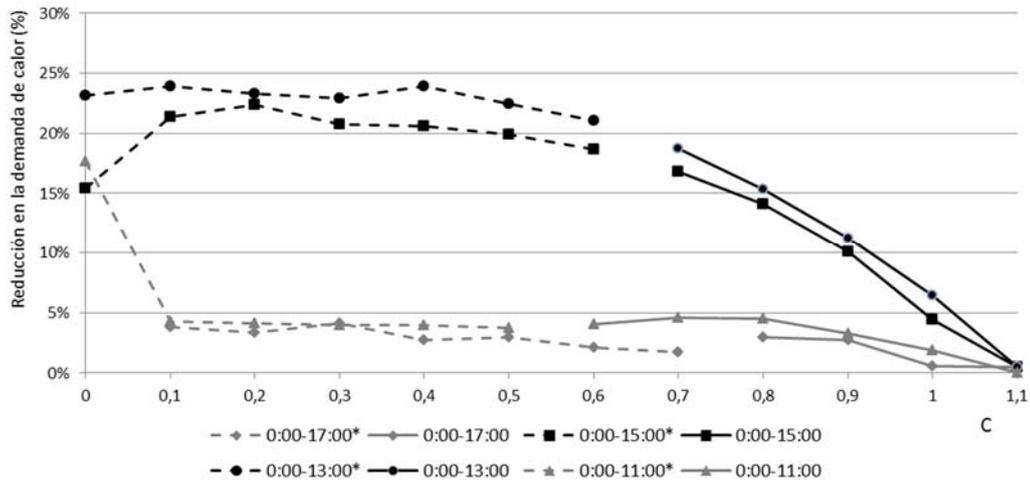


Figura 76. Reducción en la demanda energética del vaso en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición *Cond2*

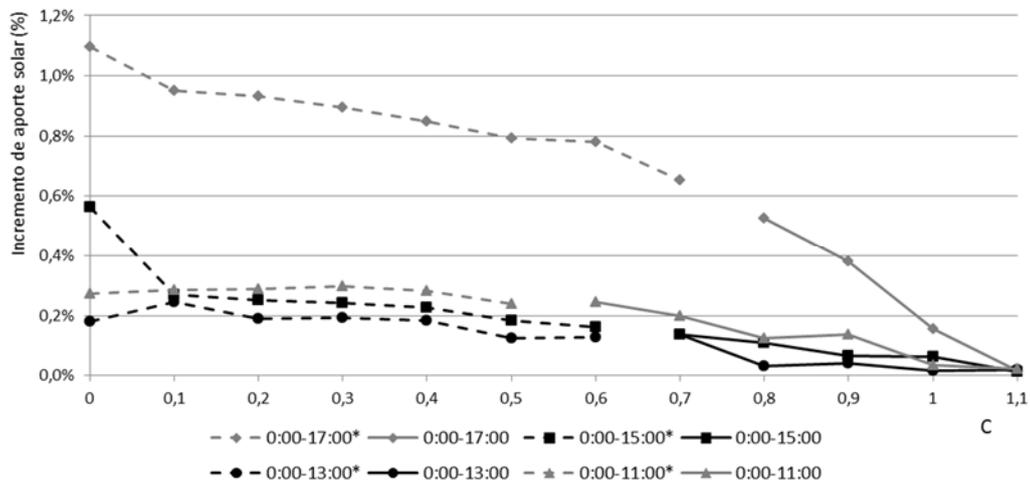


Figura 77. Incremento de calor aportado al vaso por la instalación solar térmica en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición *Cond2*

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

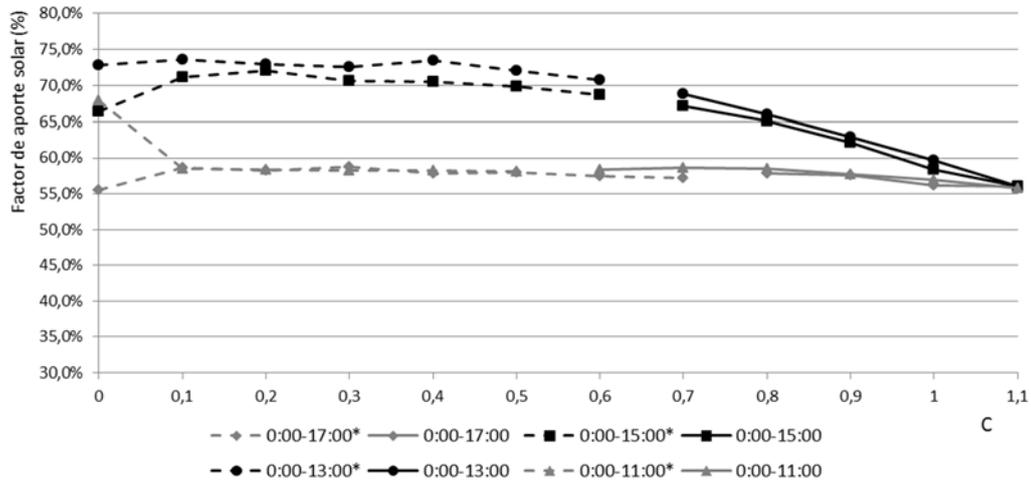


Figura 78. Factor de aporte solar (porcentaje de calor aportado por la instalación solar térmica con respecto al total aportado) en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición *Cond2*

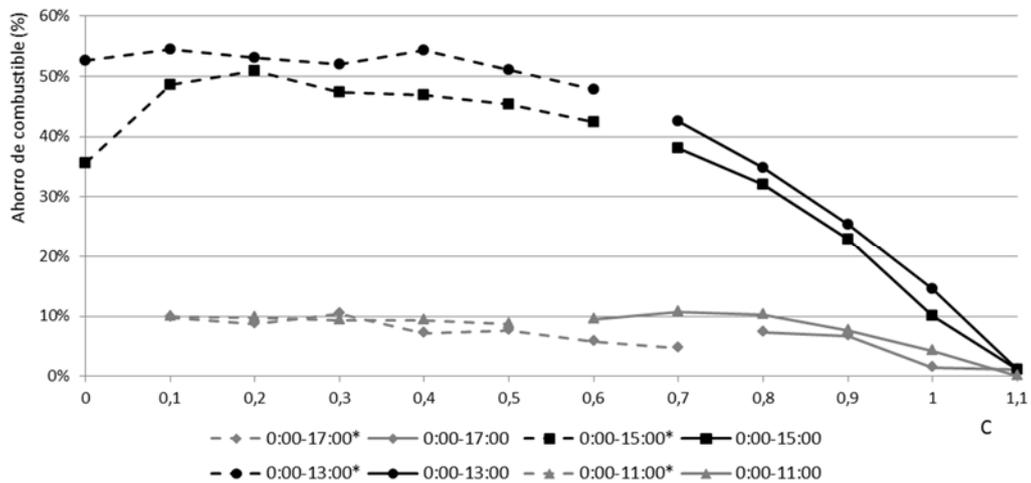


Figura 79. Porcentaje de ahorro de combustible (biomasa) en cada ensayo llevado a cabo. *Ensayos no válidos por no cumplir la condición *Cond2*

6.4.2. Valoración de los ahorros energéticos

La reducción de la demanda energética, asociada al mayor aprovechamiento de la instalación solar, resulta una importante reducción de la aportación energética de la caldera y, por tanto, del consumo de combustible. La opción seleccionada, que define los parámetros de ajuste del nuevo control ESO predictivo, permite reducir el consumo de la caldera en un 42,64%. Dicho valor representa el valor óptimo para la operación de la piscina, manteniendo su temperatura entre los márgenes establecidos por la reglamentación. Además, esta reducción en el consumo de combustible supone una mejora directa en la viabilidad económica de la instalación deportiva. La Tabla 15 presenta los valores porcentuales del ahorro de combustible en la caldera para cada caso (también representados en la Figura 79). Los valores de ahorro energético producidos por el control ESO predictivo ajustado se muestran en la Tabla 16.

Tabla 15. Porcentaje de ahorro de combustible (biomasa) en cada ensayo llevado a cabo

C_{limit}^{**}	Periodo de apagado anticipado			
	00:00 11:00	00:00 13:00	00:00 15:00	00:00 17:00
0,0	-	52,67%	35,56%	-
0,1	9,96%	54,55%	48,68%	9,81%
0,2	9,76%	53,04%	50,90%	8,68%
0,3	9,35%	52,09%	47,33%	10,46%
0,4	9,39%	54,40%	46,97%	7,22%
0,5	8,74%	51,03%	45,29%	7,69%
0,6	9,51%	47,81%	42,37%	5,82%
0,7	10,70%	42,64%	38,14%	4,75%
0,8	10,28%	34,78%	32,11%	7,31%
0,9	7,63%	25,47%	22,87%	6,62%
1,0	4,27%	14,53%	10,05%	1,43%
1,1	0,05%	1,15%	1,12%	1,05%

** Condición principal $C > C_{limit}$ para activar el apagado anticipado

Sólo se han incluido ahorros positivos. Valores en negrita representan casos que aseguran $T_{wp} > T_{sp} - 1^{\circ}C$

Tabla 16. Resultado de ajustar el control predictivo ESO con los parámetros $C_{limit}=0.7$ y periodo de apagado anticipado [00:00-13:00]. Unidades en kWh

Tipo de control	Producción solar	Producción caldera	Calor aportado total
PID	206.949	163.720	370.669
CP ESO	207.235	93.908	301.143
Reducción de demanda de calor en el vaso		18,76%	
Incremento en producción de energía solar		0,14%	
Incremento en el factor de aporte solar		12,99%	
Ahorro de combustible (biomasa)		42,64%	

6.4.3. Análisis del valor de la temperatura en el vaso

El uso de un control ESO predictivo produce una reducción en la temperatura media del vaso, ya que permite que esta decrezca hasta aproximarse al límite legal del valor de la consigna menos un grado (27°C en los ensayos realizados). Sin embargo, la reducción en el valor de la temperatura media es muy pequeña. Las Figuras 80 a 84 representan la evolución de la temperatura del agua del vaso durante algunos meses representativos del año. En las mismas gráficas, también se ha trazado una línea con el nivel de la temperatura media mensual utilizando ambos sistemas de control. Se puede observar que, dependiendo de la época del año, el control predictivo propuesto reduce levemente la temperatura media del vaso (meses más fríos), o lo incrementa (meses estivales). Una cuantificación de este efecto se incluye en la Tabla 17.

Se puede observar cómo en ningún caso la caída de temperatura media supera el 1% en valor relativo, ni el cuarto de grado Celsius en valor absoluto. Además, analizando el periodo anual completo, la reducción del valor de la temperatura media del vaso varía de $28,27^{\circ}\text{C}$ hasta $28,20^{\circ}\text{C}$. Esto significa una reducción en valor absoluto de 7 centésimas de grado Celsius, equivalente al 0,25%.

Se puede concluir que la función principal del nuevo control es prevenir el sobrecalentamiento del vaso, manteniendo su temperatura media anual siempre por encima del valor de consigna.

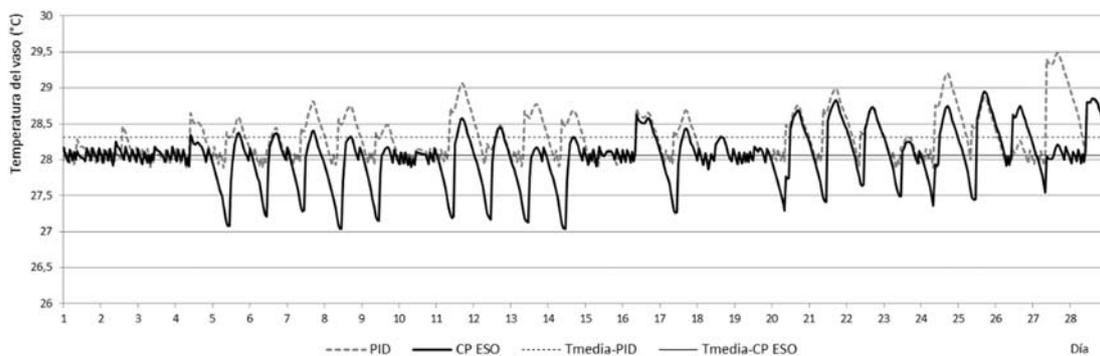


Figura 80. Temperatura del agua del vaso durante el mes de febrero, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

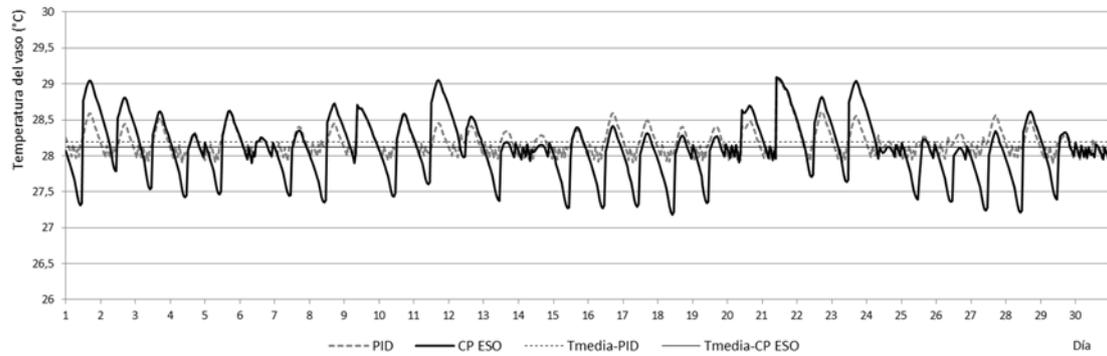


Figura 81. Temperatura del agua del vaso durante el mes de abril, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto

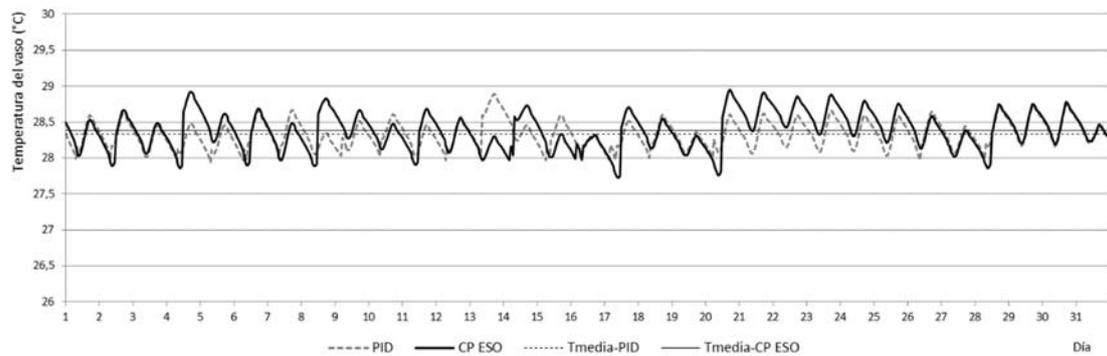


Figura 82. Temperatura del agua del vaso durante el mes de julio, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto

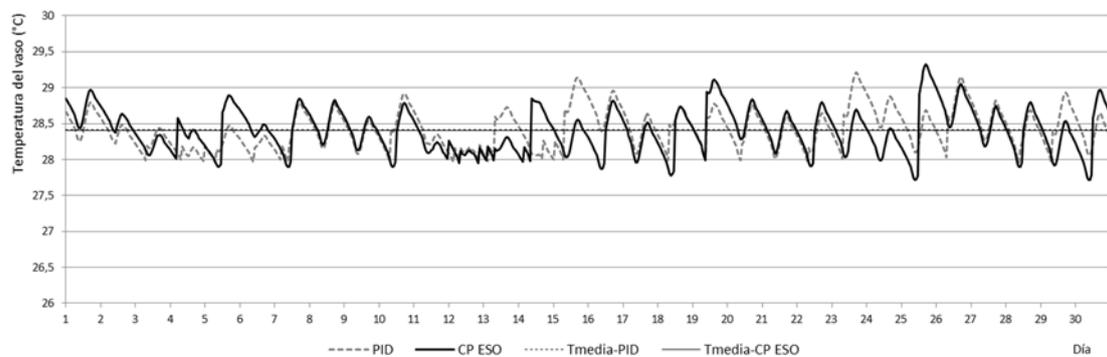


Figura 83. Temperatura del agua del vaso durante el mes de septiembre, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

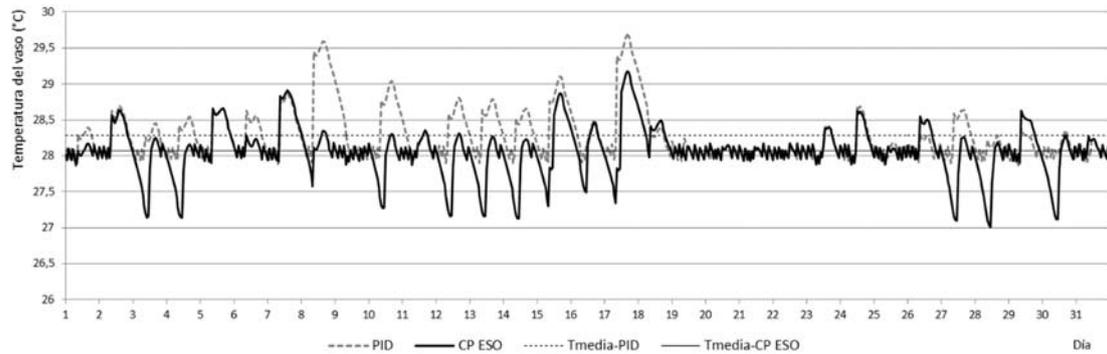


Figura 84. Temperatura del agua del vaso durante el mes de diciembre, utilizando un control PID y el control predictivo ESO propuesto

Tabla 17. Valor de la temperatura media mensual y anual del vaso utilizando un control convencional PID y el control predictivo ESO propuesto

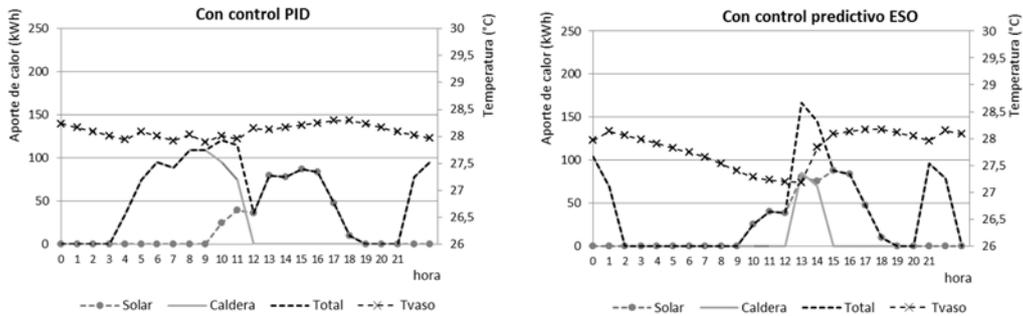
Mes	PID	CP ESO	Variación (°C)	Variación (%)
Enero	28,24	28,09	-0,15	-0,55%
Febrero	28,31	28,06	-0,25	-0,88%
Marzo	28,26	28,07	-0,19	-0,67%
Abril	28,20	28,12	-0,08	-0,28%
Mayo	28,19	28,16	-0,04	-0,13%
Junio	28,24	28,29	0,05	0,18%
Julio	28,33	28,38	0,05	0,19%
Agosto	28,39	28,42	0,03	0,10%
Septiembre	28,41	28,40	-0,01	-0,04%
Octubre	28,23	28,20	-0,03	-0,12%
Noviembre	28,21	28,12	-0,09	-0,32%
Diciembre	28,28	28,07	-0,21	-0,75%
Anual	28,27	28,20	-0,07	-0,25%

También es interesante analizar los flujos de calor y el valor de la temperatura en el vaso durante algunos días típicos. La Figura 85 representa el aporte de calor de la instalación solar y de la caldera de biomasa, así como la temperatura del vaso, durante 3 días representativos, siempre contrastando el comportamiento de la piscina con el nuevo control ESO y con el control PID convencional:

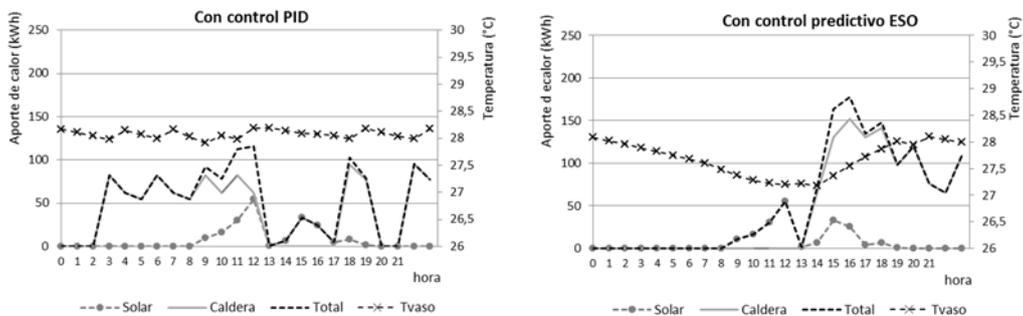
- **Día 5 de enero.** Representa un día típico de invierno. Durante este día, la caldera trabaja durante la noche para evitar una excesiva reducción de la temperatura del vaso. El uso del control ESO predictivo permite que la temperatura del agua se vea reducida a

6. Aplicación del modelo para evaluar la mejora de la eficiencia energética por el uso de controles predictivos

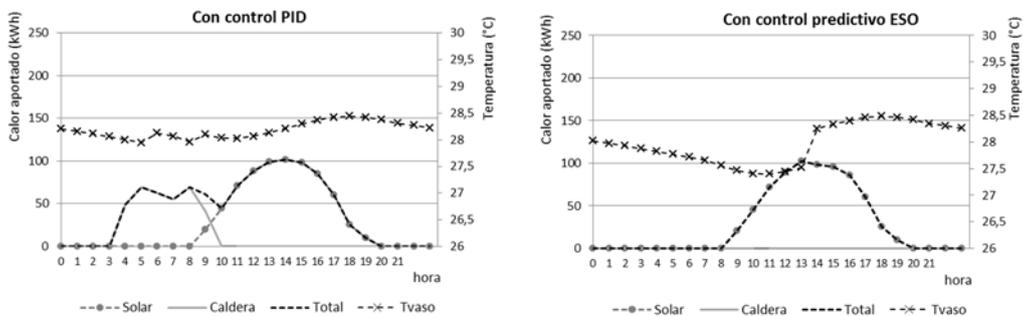
un nivel inferior, siempre manteniéndose por encima del límite marcado por la reglamentación. Esto permite que con el nuevo control la caldera trabaje menos.



5 de enero



30 de abril



30 de mayo

Figura 85. Calor aportado al vaso de la piscina (solar y caldera) junto con la evolución de la temperatura del vaso, utilizando un control PID convencional (izda.) y el control predictivo ESO propuesto (decha.), en tres días representativos del año

- **Día 30 de abril.** Representa un día típico de primavera. Evitando el funcionamiento de la caldera durante la noche, la temperatura del vaso también se reduce más que en el caso convencional. Aquí, al ser la producción solar baja, la caldera ha de trabajar durante la segunda mitad del día para elevar la temperatura del vaso hasta el nivel

requerido. En días como este, podemos concluir que el consumo de la caldera no se ve afectado por la utilización del nuevo control.

- **Día 30 de mayo.** Representa un día típico estival. Durante estos días la caldera suele funcionar por la noche para mantener la temperatura del vaso más elevada durante el día. La utilización del control ESO predictivo evita el funcionamiento de la caldera y permite aprovechar al máximo la instalación solar. Así, se consigue mantener la temperatura del vaso dentro de los límites sin hacer uso de la caldera. Un aspecto a destacar en estos días es que un valor de temperatura media inferior en el vaso favorece una ligera mejora en el aprovechamiento de la producción solar, ya que su rendimiento mejora por una reducción en su temperatura de funcionamiento.

7. Conclusiones

El trabajo muestra en detalle un nuevo modelo específicamente desarrollado para la caracterización del comportamiento energético de una piscina climatizada, cubriendo la brecha de conocimiento existente para el correcto diseño de las instalaciones térmicas correspondientes a este tipo de infraestructuras de muy elevada demanda energética. Se han identificado las variables y parámetros que más afectan a la demanda de energía térmica del vaso de la piscina: temperaturas del agua del vaso, temperatura y humedad relativa del aire de la sala y número de bañistas ocupando la piscina.

Teniendo en cuenta el importante peso de los mecanismos de evaporación en la demanda energética del vaso (más allá del 60%), se ha prestado especial atención a las correlaciones, existentes en la bibliografía, que definen estos mecanismos. En concreto, la demanda ocasionada por la evaporación del agua del vaso se ha determinado con las expresiones sugeridas por Shah, a diferencia de lo que habitualmente se encuentra en la literatura. Por otro lado, las expresiones utilizadas para determinar el resto de pérdidas de calor son las tradicionales extraídas de la literatura de transmisión de calor. Basado en ellas, se ha programado un módulo e integrado como nuevo componente en TRNSYS, programa utilizado para la simulación dinámica del problema. Su definición y contenido ha sido debidamente detallado.

Por otro lado, se ha implementado un completo sistema de medida y monitorización del comportamiento energético de la piscina municipal de Archena, en la Región de Murcia. Este complejo sistema incluye la instalación de 9 caudalímetros, 19 sondas de temperatura y un sensor de humedad relativa para la sala, con el fin de conocer, en cada momento, las condiciones reales de funcionamiento de la piscina y sus instalaciones térmicas, que incluyen una instalación solar térmica apoyada por una caldera de biomasa. Los datos registrados por este completo sistema han sido utilizados para validar el nuevo modelo propuesto, incluido la pertinencia en la utilización de las correlaciones utilizadas para estimar la tasa de evaporación de agua del vaso. Además, para la validación del modelo, también se han utilizado datos de demanda energética provenientes de otras 4 piscinas en condiciones reales de funcionamiento.

El trabajo llevado a cabo demuestra la utilidad de las herramientas de modelado dinámico para resolver instalaciones térmicas complejas, como es el caso de las piscinas climatizadas, con una precisión aceptable. De hecho, el modelo propuesto estima la demanda térmica del vaso con una desviación relativa respecto a los registros reales de entre -11,96% y +8,23%, estando la media situada en -1,77%.

Asimismo, se ha llevado a cabo un completo análisis de sensibilidad sobre el impacto que las variables principales tienen en la demanda energética del vaso. Como resultado de ello, se ha demostrado que un incremento de 1°C en la temperatura del vaso conlleva un aumento de su demanda térmica del 9,5%. Este análisis también relaciona la demanda energética con la temperatura y la humedad del aire de la sala, ayudando a los operadores de las piscinas en su toma de decisiones sobre los parámetros de consigna.

El modelo también permite predecir la demanda térmica del vaso en tiempo real. Este hecho es muy importante para poder implantar acciones de mejora de la eficiencia energética o el uso de controles predictivos que mejoren la integración del binomio solar térmica más biomasa. Por ello, se ha analizado en detalle la ventaja de incorporar un nuevo modelo de control predictivo basado en el apagado anticipado de la caldera, lo que mejora de forma decidida el aprovechamiento de estas energías renovables.

La configuración del control y el análisis energético llevado a cabo para comprobar su viabilidad también se ha llevado a cabo utilizando el programa de simulación dinámica TRNSYS. Para ello, se ha programado un control específico para simular la demanda de la piscina municipal de Archena, durante un año completo. El trabajo demuestra que el uso en piscinas climatizadas de controles predictivos puede permitir un mejor aprovechamiento de la energía solar térmica, reduciendo el uso de la caldera y, por tanto, el consumo de combustible, logrando así un ahorro económico considerable.

Los resultados ofrecen una reducción de la demanda energética del vaso de 18,76%, debido a una menor temperatura media del agua. Esto unido al mejor aprovechamiento solar, resulta en una reducción del 42,64% en el consumo de combustible en la caldera. Este ahorro reduce de manera considerable los costes energéticos en la operación de la piscina, mejorando su viabilidad económico-financiera.

Como conclusión final, el modelo de simulación propuesto para el vaso se ajusta de manera apropiada a su comportamiento energético real y puede ser utilizado para predecir su demanda y diseñar de una manera más precisa y eficaz sus complejas instalaciones térmicas. También es válido para simular estrategias de eficiencia energética en la operación de la piscina. Además, el uso de controles predictivos mejora la eficiencia energética del binomio solar-biomasa en piscinas climatizadas, reduciendo sus costes de operación

8. Bibliografía

- ASHRAE, *ASHRAE Handbook HVAC Applications*, ASHRAE, Atlanta, GA, 2007
- Biasin K, and Krumme W. *Die wasserverdunstung in einem innenschwimmbad*. *Electrowaerme International* 32(A3): A115—A129 (1974).
- Blázquez JLF, Maestre IR, Gallero FJG. *A new practical CFD-based methodology to calculate the evaporation rate in indoor swimming pools*. *Energy and Buildings* 149 (2017) 133-141.
- Box T. 1876. *A Practical Treatise on Heat*. Quoted in Boelter et al. (1946).
- Boelter LMK, Gordon HS, and Griffin JR. *Free evaporation into air of water from a free horizontal quiet surface*. *Industrial & Engineering Chemistry* 38(6):596–600 (1946).
- Bohlen WV. *Waermewirtschaft in privaten, geschlossenen Schwimmbaedern—Überlegungen zur Auslegung und Betriebserfahrungen*. *Electrowaerme International* 30(A3):A139–A142 (1972).
- Brambley MR, Wells SE. *Energy-conservation measures for indoor swimming pools*. *Energy* Vol. 8, No. 6, pp. 403-418 (1983)
- Buonomano A, De Luca G, Figaj RD, Vanoli L. *Dinamic simulation and thermos-economic analysis of a photovoltaic/thermal collector heating system for an indoor-outdoor swimming pool*. *Energy Conversion and Management* 99 (2015) 176-192.
- Carrier WH. *The temperature of evaporation*. *ASHVE Transactions* 24 (1918) 25–50.
- Chen TY. *Application of adaptive predictive control to a floor heating system with a large thermal lag*. *Energy and Buildings* 34 (2002) 45-51.
- Chow TT, Bai Y, Fong KF, Lin Z. *Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating*. *Applied Energy* 100 (2012) 309-317.
- Consejo Superior de Deportes. *Normativa sobre instalaciones deportivas y de esparcimiento (NIDE)*. 2005. http://www.csd.gob.es/csd/estaticos/inst-dep/nide/piscinas/nat/nat_natacion.pdf
- Cutler CR, Ramaker BL. *Dynamic matrix control: A computer control algorithm*. Joint Automatic Control Conference (1980).
- Delgado JP, García JR. *Modelado dinámico de una piscina climatizada asistida con energía solar*. TFM (2013) Repositorio Digital Universidad Politécnica de Cartagena.
- Delgado Marín JP, García Cascales JR, Caballero García, G, López JM. *Sistema de instrumentación y control para la optimización energética de una piscina climatizada*. IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica (2015) ISBN 978-84-606-8931-7 531-538.
- Doering, E. *Zur auslegung von luftungsanlagen fur hallenschwimmbaeder*. *HLH* 30(6):211–16 (1979).

Fédération Internationale de Natation. *FINA Facilities rules 2017–2021*. http://www.fina.org/sites/default/files/2017_2021_facilities_16032018_full_medium.pdf

Haniff MF, Selamat H, Yusof R, Buyamin S, Ismail FS. *Review of HVAC scheduling techniques for buildings towards energy-efficient and cost-effective operations*. Renewable Sustainable Energy Rev. 27 (2013) 94–103.

Hanssen SO, Mathisen HM. *Evaporation from swimming pools*. Roomvent 90: 2nd International Conference, June 13–15, Oslo, Norway (1990).

Himus GW, Hinchley JW. *The effect of a current of air on the rate of evaporation of water below the boiling point*. Chemistry and Industry 1924; 43:840–5.

Howell JR, Menguc MP, Siegel R. *Thermal radiation heat transfer*. 6th Edition (2015). CRC Press.

Hyldgaard CE. *Water evaporation in swimming baths*. Roomvent 90, International Conference on Engineering Aero- and Thermodynamics of Ventilated Rooms, Oslo, Norway (1990).

Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th Edition (2006). John Wiley & Sons Inc.

Leven K. *Betrag zur Frage der wasserverdunstung*. Wärme und Kältetechnik 44(11):161–67.

Lurie M, Michailoff N. *Evaporation from free water surface*. Industrial and Engineering Chemistry 1936;28(3):345–50.

Mančić MV, Živković DS, Milosavljević PM, Todorović MN. *Mathematical modelling and simulation of the thermal performance of a solar heated indoor swimming pool*. Thermal Science 18 Vol.18 No.3 (2014) 999-1010.

Marek R, Straub J. *Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water*. International Journal of Heat and Mass Transfer 44 (2001) 39–53.

Miezis M, Jaunzems D, Stancioff N. *Predictive control of a building heating system*. Energy Procedia 113 (2017) 501-508.

Meyer AF. *Evaporation from lakes and reservoirs*. Minnesota Resources Commission, 1942.

Oró E, Allepuz R, Martorell I, Salom J. *Design and economic analysis of liquid cooled data centres for waste heat recovery: A case study for an indoor swimming pool*. Sustainable Cities and Society 36 (2018) 185-203.

Prívarva S, Široký J, Ferkl L, Cigler J. *Model predictive control of a building heating system: The first experience*. Energy and Buildings 43 (2011) 564-572.

Reeker, J. *Wasserverdunstung in hallenbaedern*. Klima + Kaelte-Ingenieur 84(1):29–33 (1978).

Restuccia B, Vera-García F, Delgado Marín JP. *Estudio de la viabilidad técnica y económica para la optimización de los sistemas térmicos en piscinas climatizadas en Murcia* (2016) TFM – Repositorio Digital Universidad Politécnica de Cartagena.

- Rohwer D. *Evaporation from free water surface*. Technical Bulletin No. 271, US Department of Agriculture, 1931.
- Ruiz E, Martínez PJ. *Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model*. Solar Energy 84 (2010) 116–123.
- Rzeźnik, I. *Study on water evaporation rate from indoor swimming pools*. E3S Web of Conferences 22, 00150 (2017).
- Shah MM. *Rate of evaporation from undisturbed water pools: evaluation of available correlations*. International J. HVAC&R Research 8 (2002) 125–132.
- Shah MM. *Methods for calculation of evaporation from swimming pools and other water surfaces*. ASHRAE Transactions, Vol. 120, Part 2 (2014)
- Shah MM. *Improved method for calculating evaporation from indoor water pools*. Energy and Buildings 49 (2012) 306–309
- Shah MM. *Analytical formulas for evaporation from water pools*. ASHRAE Transactions (2008).
- Sharpley BF, and Boelter LMK. *Evaporation of water into quiet air from a one-foot diameter surface*. Industrial & Engineering Chemistry 30(10):1125–31 (1938).
- Smith CC, Jones R, Lof G. *Energy requirements and potential savings for heated indoor swimming pools*. ASHRAE Transactions 99 (2) (1993) 864–874.
- Tang R, Etzion Y. *Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface*. Building and Environment 39 (2004) 77 – 86
- Tang, TD, Pauken MT, Jeter SM, and Abdel-Khalik SI. *On the use of monolayers to reduce evaporation from stationary water pools*. Journal of Heat Transfer 115(1993):209–14.
- Yantong L, Gongsheng H, Tau X, Xiaoping L, Huijun W. *Optimal design of PCM thermal storage tank and its application for winter available open-air swimming pool*. Applied Energy 209 (2018) 224-235.
- Zuccari F, Santiangeli A, Orecchini F. *Energy Analysis of swimming pools for sports activities: cost effective solutions for efficiency improvement*. Energy Procedia 126 (2017) 123-130