

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA TASA DE EVAPORACIÓN EN PISCINAS CUBIERTAS MEDIANTE CFD

FONCUBIERTA BLÁZQUEZ, Juan Luis⁽¹⁾; RODRÍGUEZ MAESTRE, Ismael⁽¹⁾

GONZÁLEZ GALLERO, Francisco Javier⁽¹⁾; IGLESIAS BAHÍA, Óscar

juanluis.foncubierta@uca.es

⁽¹⁾Universidad Cádiz, Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica

RESUMEN

El consumo de los sistemas de climatización, según la IEA, supone un 36% en el sector de la edificación a nivel mundial. En edificios, como gimnasios o spas, donde la generación de humedad debida a la evaporación de agua de piscinas es importante, el consumo de los equipos de deshumectación cobra una mayor importancia. El diseño eficiente de estos sistemas debe incluir tanto la correcta selección del equipo de deshumectación, como la adecuada distribución de aire en el recinto.

Uno de los factores más determinantes en el proceso de selección del equipo de deshumectación es la tasa de evaporación. Actualmente existen tres teorías que describen la física del fenómeno, las conocidas KTG, SRT y NET. Aunque estas teorías pueden describir la evaporación hasta un nivel molecular, en la práctica son complejas de aplicar debido a la incertidumbre existente en la interface líquido-gas. Por ello, algunos autores proponen la aplicación de estas teorías utilizando valores medios de aire y agua, y corregidas con coeficientes experimentales.

Otros autores, en cambio, proponen el uso de correlaciones experimentales, que normalmente son función de parámetros medios de las condiciones del agua y del aire del recinto. Aunque los resultados de estas últimas pueden llegar a ser precisos, el ámbito de aplicación se limita a las geometrías y distribuciones de aire en las cuales fueron obtenidas.

Por otro lado, el estudio preciso de la influencia de la distribución del aire en el recinto requiere de la resolución de las ecuaciones de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento del fluido así como del modelo turbulento. Este análisis puede llegar a ser complejo, por ello, algunos autores recurren a las metodologías CFD para su resolución. Además, se hace necesario el acoplamiento del modelo CFD con la tasa de evaporación. En los trabajos revisados este acoplamiento se realiza introduciendo un flujo de vapor cuyo valor se obtiene a partir de correlaciones experimentales. En la revisión realizada no se encuentran metodologías para el cálculo directo de la tasa de evaporación acoplada con el movimiento del aire, que permitan calcular de forma precisa la correcta distribución de temperaturas y humedades en el mismo.

En el presente trabajo se describe una metodología basada en CFD, utilizando el software ANSYS CFX, para el cálculo de la tasa de evaporación, así como su validación.

Palabras clave: Evaporación, CFD, sistemas de climatización.

1. Introducción

Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [1], el consumo de los sistemas de climatización supone el 36% dentro del sector de la edificación a nivel mundial. En edificios como gimnasios o spas, donde la generación de humedad debida a la evaporación de agua de piscinas es importante, el consumo de los equipos de deshumectación cobra una mayor importancia. El diseño eficiente de estos sistemas debe incluir tanto la correcta selección del equipo de deshumectación, como asegurar la adecuada distribución de aire en el recinto.

Uno de los factores más determinantes en el proceso de selección del equipo de deshumectación es la tasa de evaporación. Actualmente existen tres teorías, ampliamente extendidas, que describen la física del fenómeno, las conocidas como la Teoría Cinética de los Gases (KTG), Teoría Estadística (SRT), Ecuaciones fenomenológicas y de conservación (NET) [2]. Estas teorías están basadas en la mecánica estadística y/o mecánica cuántica, describiendo el proceso de la evaporación hasta un nivel molecular. Sin embargo, en la práctica son de compleja aplicación, debido a la incertidumbre existente en la interfase líquido-gas. Por ello, algunos autores proponen la aplicación de estas teorías utilizando valores medios de aire y agua, y corregidas con coeficientes experimentales [3]. El intervalo de variación de estos coeficientes es amplio, y depende tanto de la configuración geométrica como de las condiciones de operación. Así Ward et. al., experimentando sobre una configuración geométrica determinada y distintos puntos de operación, obtiene variaciones del coeficiente aplicado a una de las variantes de la teoría SRT de hasta el 113% [3].

Otros autores, en cambio, proponen el uso de correlaciones experimentales, que normalmente son función de parámetros medios de las condiciones del agua y del aire del recinto [4]. En general, estas correlaciones son de la forma:

$$E = (a + bV)(P_w - P_a) \quad (1)$$

Donde E es la tasa de evaporación por unidad de superficie de agua, a y b , son los coeficientes de la correlación, V , la velocidad media del aire, P_w , la presión parcial de vapor del aire saturado a temperatura del agua y P_a , presión parcial de vapor del aire del recinto.

Este tipo de correlaciones se obtienen para una geometría de piscina determinada. Por ello, algunos autores proponen el uso de correlaciones adimensionales [5]. En general, estas correlaciones pueden ser de la forma:

$$Sh = c \cdot Sc^a \cdot Ra^b \quad (2)$$

Donde Sh es el número de Sherwood, Sc , el número de Schmidt, Ra , el número de Rayleigh y a, b y c , los coeficientes de la correlación.

Aunque los resultados de estas últimas pueden llegar a ser precisos, el ámbito de aplicación se limita a las condiciones en las cuales fueron obtenidas. Además, no existe un consenso sobre cómo y dónde medir estas condiciones. A pesar de estas limitaciones, el uso de las correlaciones está muy extendido a falta de métodos más precisos [6].

El cálculo de las condiciones del aire del recinto (temperatura, humedad, velocidad, presión, etc.) está fuertemente acoplado con el mecanismo de evaporación. El cálculo de estas variables requiere de la resolución de las ecuaciones de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento del fluido así como del modelo turbulento. En este sentido, Li y Heiselberg [7] realizan un estudio sobre la influencia de la evaporación de una piscina cubierta en las condiciones del aire interior utilizando metodología CFD. Para ello, los autores imponen la tasa de evaporación como condición de contorno constante en la superficie del agua, la cual se calcula mediante correlaciones.

En la revisión realizada no se encuentran estudios concluyentes sobre el cálculo directo de la tasa de evaporación acoplada con la resolución del aire del recinto. En este sentido, Vinnichenko et. al. [8] calcula la tasa con un modelo sencillo, régimen laminar y sin velocidad de aire, utilizando metodología CFD para su resolución, donde se impone como condición de contorno, la humedad de saturación en el aire en contacto con la lámina de agua. Como apunta el propio autor, esta condición es

de difícil implementación en los paquetes comerciales más extendidos [9] [10], y aún estableciéndose, resulta complejo el cálculo del flujo de vapor debido a la evaporación.

Ante la carencia de métodos que permitan calcular la tasa de evaporación en piscinas cubiertas, junto con la resolución del aire del recinto para distintas condiciones y regímenes, el presente trabajo desarrolla una metodología para tal efecto. Ésta, está basada en técnicas CFD y pueden ser implementadas en la mayoría de softwares comerciales. Además se realiza la validación experimental de la misma.

2. Metodología propuesta

Los estudios experimentales confirman que, debido a la evaporación, existe una fina capa de aire que llega a saturarse en las proximidades de la superficie del agua, cuyo espesor puede ser del orden de milímetros [3]. Sin embargo, la imposición de la concentración de una especie como condición de contorno resulta compleja en los softwares de resolución CFD más extendidos. Así el método propuesto se basa en crear una generación de vapor en un volumen encima de la lámina de agua, de un cierto espesor, tal que mantenga las condiciones de saturación del aire en las proximidades de la lámina de agua.

En general la metodología podría dividirse en los siguientes pasos: a) Generación de un volumen encima de la lámina de agua en la geometría original, b) proceso de mallado, c) configuración del modelo y de las condiciones de contorno, d) comprobación de resultados.

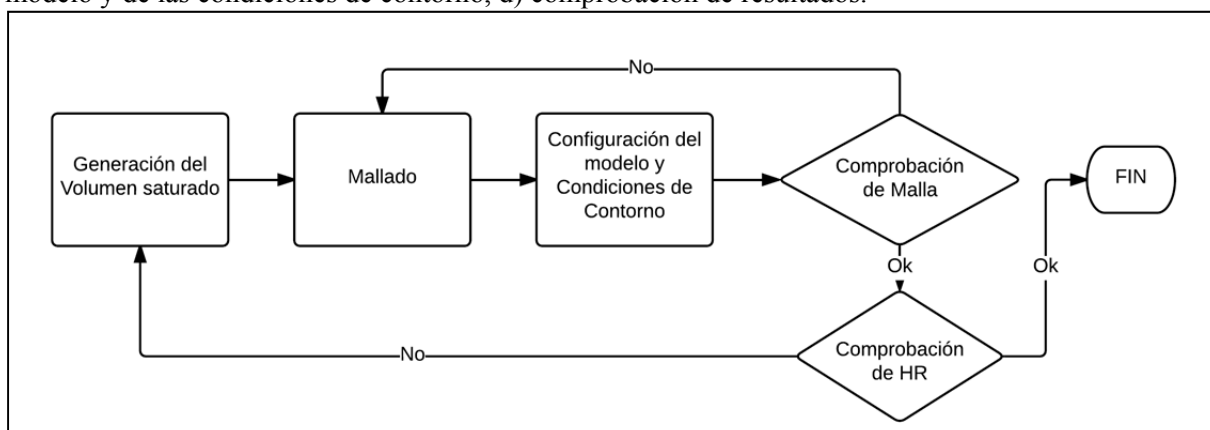


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

2.1. Generación del volumen saturado

Con el objeto de modelar la fina capa de aire saturado en las proximidades de la lámina, se añade a la geometría original, un volumen (V_g) encima de dicha lámina y de un cierto espesor inicial. Este volumen permitirá en fases posteriores añadir una generación volumétrica de vapor de agua. El espesor de V_g puede ser inicialmente del orden de milímetros, y deberá ser ajustado en fases posteriores de la metodología propuesta.

2.2. Proceso de Mallado

El mallado del dominio de aire del recinto no difiere del procedimiento requerido en el estudio CFD de aplicaciones dentro de marco de la energética de edificios [11]. Estas metodologías han sido ampliamente, estudiadas y por lo tanto, se prescinde en el presente artículo de consideraciones adicionales. Cabría destacar, que debido a las distintas escalas que existe entre el volumen V_g y el resto

de la geometría, se recomienda la realización de un mallado particular para dicho volumen, donde al menos exista un nodo intermedio.

2.3. Configuración del modelo y de las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno y configuración del modelo incluyen la modelización del aire húmedo, el modelo turbulento, las condiciones en la lámina de agua, el flujo volumétrico a aplicar y régimen de resolución.

La modelización del aire húmedo se realiza mediante el modelo de mezcla ideal de composición variable de aire como gas ideal y vapor de agua como gas ideal. Complementariamente se añaden las ecuaciones para el cálculo de humedades de saturación, absoluta y relativa en cada nodo. El modelo turbulento corresponde con el k-ε. Para las proximidades con paredes se utiliza la función pared escalable. Las condiciones de contorno para la lámina de agua se configuran para temperatura constante, y efectos de fricción despreciables.

El coeficiente de difusividad del vapor de agua en aire se establece como [12]:

$$D_{WA} = 2.6 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{298} \right)^{1.5} \quad (3)$$

Con D_{WA} en m^2/s y donde T es la temperatura del aire en Kelvin.

El flujo volumétrico a definir en el volumen generado en el paso primero para mantener las condiciones de saturación se define como:

$$\dot{m}_v = \frac{W_s - W}{\Delta t} \rho \quad (4)$$

Donde \dot{m}_v es la generación de vapor volumétrica ($kg/(s \cdot m^3)$), W_s , La humedad absoluta de saturación, W la humedad absoluta inicial, ρ , densidad del aire húmedo y Δt , paso de tiempo de simulación.

Debido a la difusión y el movimiento del aire en el recinto, el vapor de la capa saturada se desplazará. Así la ec. 4 calcula la cantidad de vapor que la evaporación repone en cada paso de tiempo de simulación para mantener condiciones de aire saturado en las proximidades de la lámina de agua en cada volumen diferencial. Por lo tanto, la tasa de evaporación vendrá dada por:

$$\dot{m} = \int_{V_g} \dot{m}_v dV \quad (5)$$

Donde \dot{m} es la tasa de evaporación (kg/s), y V_g el volumen generado.

Finalmente, la tasa de evaporación se incluye en el modelo CFD en la ecuación de conservación de especies:

$$\frac{D(\rho Y_w)}{Dt} = \nabla(\rho \cdot D_{WA} \cdot \nabla Y_w) + \dot{m}_v \quad (6)$$

Donde Y_w es la fracción másica de vapor de agua en el aire húmedo.

Debido a que el flujo de la ec. 4 depende del paso de tiempo de simulación la simulación se realiza en régimen transitorio, donde se recomiendan pasos de un segundo. Si las condiciones del problema son estacionarias, la tasa de evaporación podría alcanzar un régimen estable si el tiempo total de simulación es suficiente.

2.4. Comprobación de resultados

La ec. 5 calcula el flujo de vapor necesario para mantener las condiciones de saturación en el volumen. Estas condiciones se imponen según la ec. 6. Estas ecuaciones están acopladas con las de continuidad y momento. Por este motivo, y debido a que la condensación no se contempla en el modelo, se podrían

obtener acumulaciones de vapor en lugares cercanos a la lámina de agua, donde se pueden alcanzar humedades relativas mayores del 100%.

Si esto es así, una disminución del espesor del volumen generado V_g se hace necesaria. Por otro lado, la situación contraria también es posible, es decir, no conseguir saturar el aire en las inmediaciones de la lámina de agua. En este caso, se requiere el aumento del espesor de V_g . Es decir, la metodología propuesta consiste en ajustar dicho espesor hasta alcanzar el 100% de humedad relativa en la lámina de agua. Se define como espesor crítico a aquel que reúne las condiciones de saturación en la lámina descritas.

Cabe destacar que el modelado no considera el agua líquida. Por lo tanto, los nodos situados en la lámina de agua representan el aire húmedo que está en contacto directo con el agua.

Además del ajuste de V_g , se pueden realizar las comprobaciones de malla convencionales, como la comprobación del $y+$, GCI, OQ, etc. [13] (ver Figura 1).

3. Validación

La validación de la metodología se realiza comparando los resultados de tasa de evaporación obtenidos en el experimento realizado por Asdrubali [14]. El autor mide la cantidad de agua evaporada en una hora en un modelo construido a escala de una piscina cubierta (Figura 2). El experimento se realiza para distintas condiciones estables de aire (temperatura, humedad y velocidad) y distintas temperaturas de agua. El modelo CFD del experimento (Figura 3) se realiza mediante el software ANSYS CFX. La presente validación se realiza para las condiciones de aire de 28°C, 60% de humedad relativa y una velocidad de 0.08 m/s. El aire en contacto con el agua se establece a la misma temperatura del agua, 26°C. Las paredes del recinto se establecen como adiabáticas. Además, se modela una salida de aire a presión constante e igual a la atmosférica (1 atm). El resto de condiciones de contorno coinciden con lo expuesto en la metodología.



Figura 2. Modelo del experimento de Asdrubali. Fuente: [14]

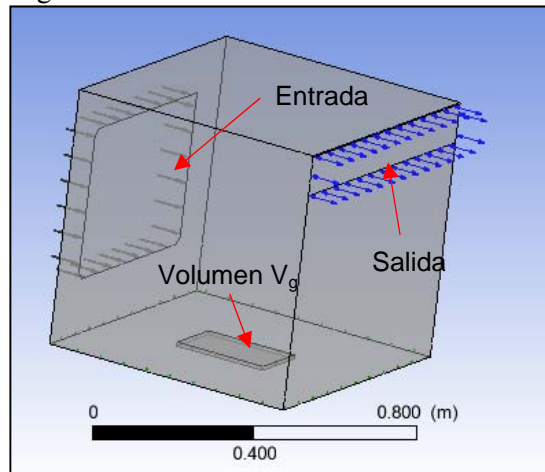


Figura 3. Modelo CFD.

La Figura 4 muestra la malla final generada. Cabe destacar el mallado de V_g con un nodo intermedio. Además se opta por realizar un degradado superficial de la malla (Figura 5). Aunque el modelado del perfil de velocidades en las proximidades de la pared se modelan con funciones pared estándar, donde no se hace necesario un mallado fino ($y^+ < 15$), Ansys CFX ofrece la posibilidad de aplicar automáticamente la función pared en aquellos nodos que reúnan las condiciones de y^+ , justificando el mallado realizado.

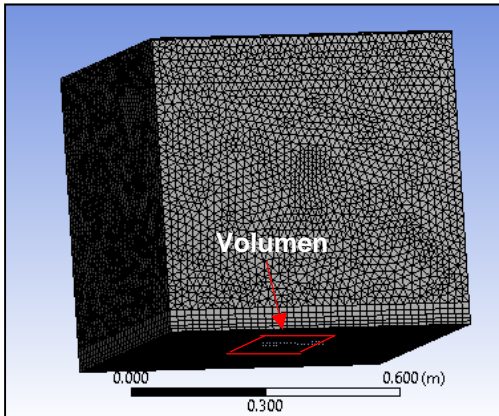


Figura 4. Mallado final del modelo.

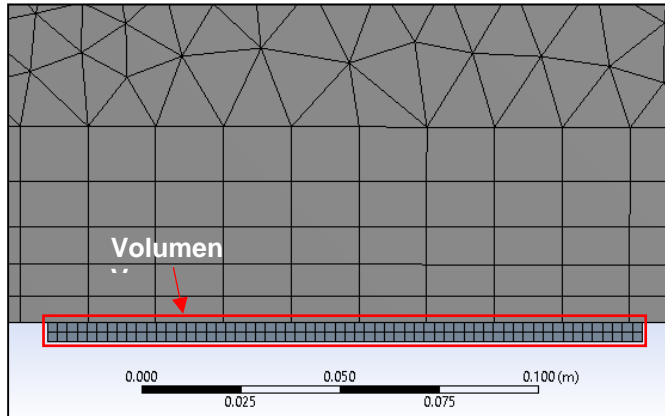


Figura 5. Detalle del mallado de V_g y proximidades.

La Figura 6 muestra la tasa de evaporación obtenida en la simulación transitoria realizada con pasos de tiempo de 1 s. Se observa como a partir de los 200 s. aproximadamente, la tasa llega a su régimen permanente, de valor $84.5 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Estos resultados corresponden al valor crítico de espesor de capa después del proceso iterativo, que se obtiene a 25 mm. El valor obtenido por Asdrubali ronda los $80 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ (ver Figura 7), que comparado con los resultados se obtiene un error del 5.6% aproximadamente.

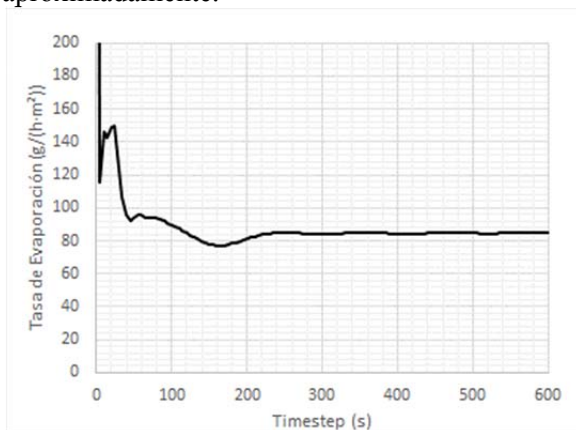


Figura 6. Tasa de evaporación para 25 mm de espesor.

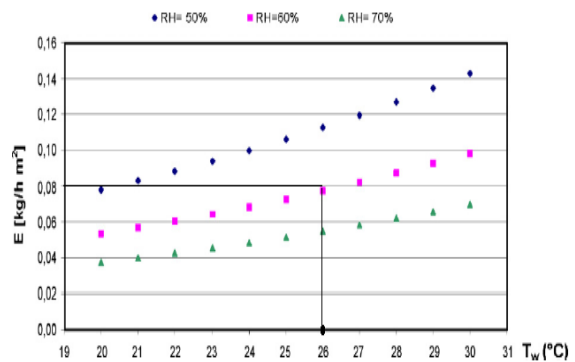


Figura 7. Resultados obtenidos por Asdrubali. Fuente: [14].

Por motivos de claridad, se han expuesto en primer lugar los resultados obtenidos para el espesor crítico. Sin embargo, como se ha expuesto anteriormente, la metodología propuesta consta de un proceso iterativo de ajuste de dicho espesor hasta obtener condiciones de saturación en las proximidades de la lámina. La

Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para distintos espesores, en las mismas condiciones de simulación. Así, para cada espesor, se muestra la tasa estable obtenida y la humedad relativa media en el aire en contacto con la lámina de agua.

Tabla 1. Resultados para distintos espesores.

Espesor [mm]	Tasa [g/(h·m²)]	HR [%]
2.5	46.87	79.6

5	69.39	85.2
10	86.09	91.8
15	89.46	93.7
20	92.26	98.3
25	84.54	100.0

4. Conclusiones

Actualmente una de las metodologías más extendidas para el cálculo de la tasa de evaporación en piscinas cubiertas es la basada en correlaciones experimentales. Estas correlaciones, aunque son ampliamente utilizadas en numerosas situaciones, sólo son válidas para un determinado rango de aplicabilidad.

En el presente trabajo se propone una metodología basada en CFD, de fácil implementación en los paquetes de software comerciales, que permite el modelado de la tasa de evaporación de agua en piscinas junto con la resolución del campo de velocidades y temperaturas del aire del recinto. El método se basa en mantener las condiciones de saturación en una delgada capa de aire en contacto con la lámina de agua. A modo ilustrativo, se incluye un caso práctico de aplicación del método propuesto, en una situación de la cual se dispone de solución experimental, resultando una tasa de evaporación con un error relativo inferior al 5%.

5. Referencias

- [1] International Energy Agency, «Key World Statistics,» 2009.
- [2] V. Badam, V. Kumar, F. Durst y K. Danov, «Experimental and theoretical investigations on interfacial temperature jumps during evaporation,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, n° 32, p. 276–292, 2007.
- [3] C. A. Ward y G. Fang, «Expression for predicting liquid evaporation flux: Statistical rate theory approach,» *Phys. Rev. E*, vol. 59, n° 1, pp. 429–440, 1999.
- [4] M. Shah, «Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces,» *ASHRAE Transactions*, vol. 120, n° 2, 2014.
- [5] S. Bower y J. Saylor, «A study of the Sherwood–Rayleigh relation for water undergoing natural convection-driven evaporation,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, n° 13–14, pp. 3055–3063, 2009.
- [6] E. Saroti, «A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces,» *Solar Energy*, vol. 68, n° 1, p. 77–89, 2000.
- [7] Z. Li y P. Heiselberg, «CFD Simulations for water evaporation and airflow movement in swimming baths indoor environmental engineering, Report for the project Optimization of ventilation system in swimming bath,» Denmark, 2005.
- [8] N. Vinnichenko, A. Uvarov, D. Vetukov y Y. Plaksina, «Direct computation of evaporation rate at the surface of swimming pool,» de *Recent Researches in Mechanics - Proc. of the 2nd Int. Conf. on FLUIDSHEAT'11, TAM'11, Proc. of the 4th WSEAS Int. Conf. UPT'11, CUHT'11*, 2011.

- [9] Ansys C. F. X., «Solver Theory Guide. Ansys CFX Release, 15,» 2013.
- [10] Ansys Fluent, «Solver Theory Guide. Ansys Fluent Release, 15,» 2013.
- [11] M. Hajdukiewicz, M. Geron y M. M. Keane, «Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments,» *Building and Environment*, vol. 59, pp. 290-302, 2013.
- [12] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass transfer*, 7th ed., John Wiley & Sons.
- [13] P. Roache, «Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies,» *J Fluids Eng*, vol. 3, n° 116 , p. 405–413, 1994.
- [14] F. Asdrubali, «A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools,» *Energy and Buildings*, vol. 41, n° 3, pp. 311-319, 2009.