

Anexo I: Peso relativo de cada fuente de energía eléctrica en los mix europeos.

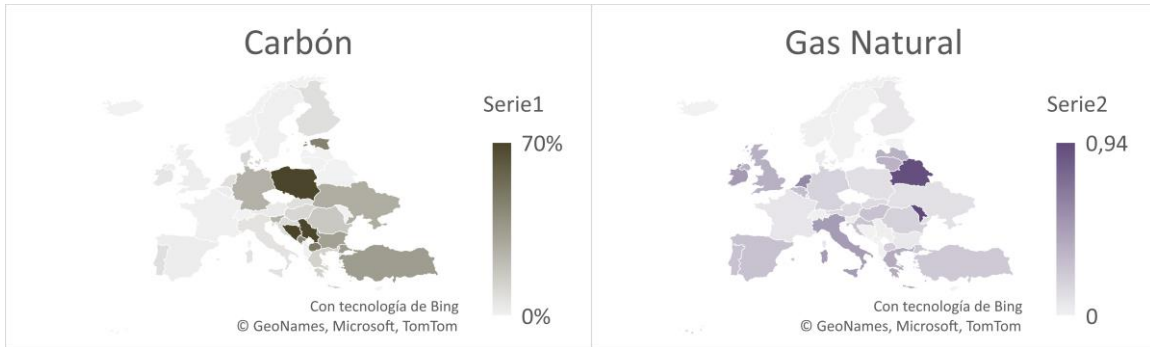


Figura 41: Peso relativo del Carbón y el Gas Natural como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elab.propia

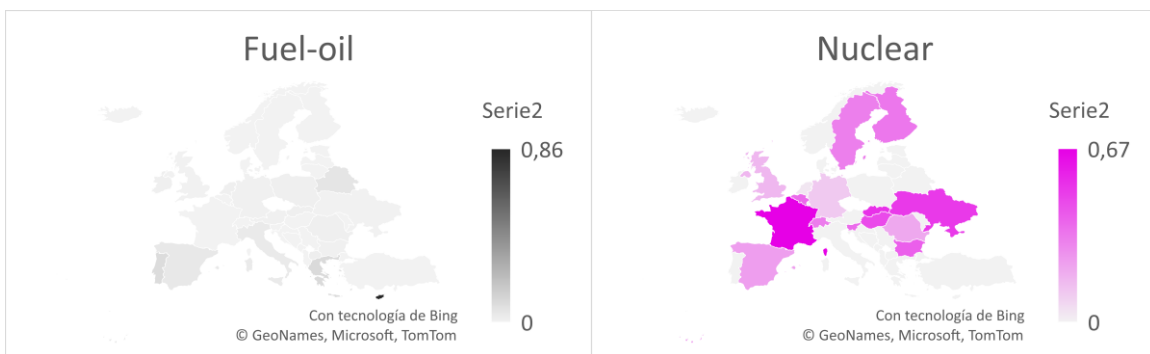


Figura 42: Peso relativo del Fuel-oil y la Nuclear como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elaboración.propia

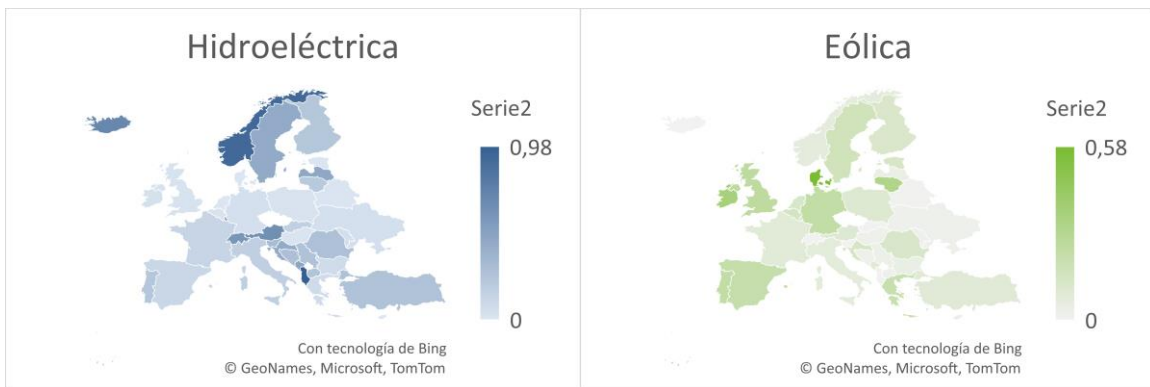


Figura 43: Peso relativo de la Hidroeléctrica y la Eólica como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elab.propia

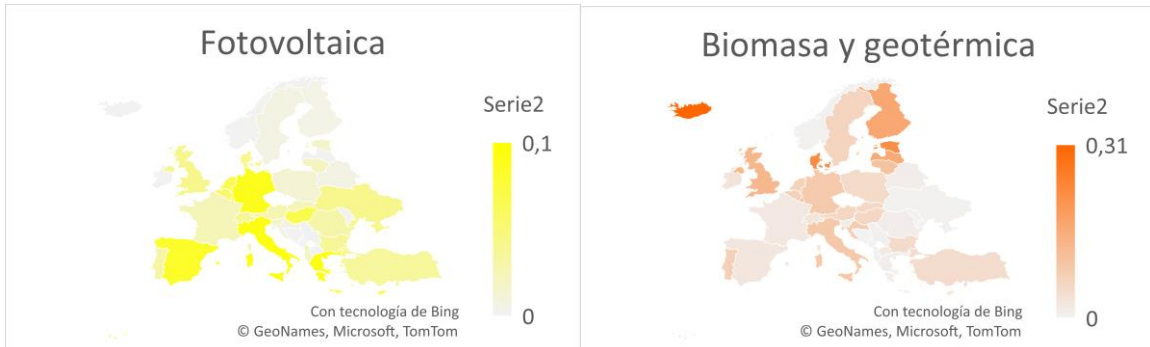


Figura 44: Peso relativo de la Fotovoltaica y la Biomasa como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elab.propia

Comparación del consumo global de agua en condensadores adiabáticos y condensadores enfriados por aire

Anexo II: Publicaciones derivadas

Extended Abstract

COMPARISON OF GLOBAL WATER CONSUMPTION IN ADIABATIC AND AIR-COOLED CONDENSERS

Jaime Illera-Riesgo¹, Ana Tejero-González^{1*}, Manuel Andrés-Chicote¹

¹ Dept. Energy Engineering and Fluidmechanics, Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid, Spain.

Emails: jaime.illera@alumnos.uva.es; anatej@eii.uva.es; manuel.andres@uva.es

* Correspondence: anatej@eii.uva.es

† Presented at Innovations-Sustainability-Modernity-Openness Conference (ISMO'22), Bialystok, Poland, May 2022.

Published: date (leave it empty)

Abstract: Chillers can perform more efficiently in hot and dry climates if equipped with adiabatic rather than air-cooled condensers; however, the former imply water consumption. Because the power generation also require a certain water consumption, the energy savings achieved in adiabatic condensers would yield indirect water savings. This work provides a preliminary evaluation of the suitability of both condenser types in terms of water consumption and energy efficiency, based on a case study in Valladolid (Spain).

Keywords: *adiabatic condensers, air-cooled condensers, chillers, energy efficiency, energy mix, water consumption.*

1. Introduction

The phenomenon of evaporative cooling can be either used for cooling air or reject heat from processes, like in the chillers' evaporative condensers and cooling towers. Compared to air-cooled condenser units, evaporative condensers and cooling towers can entrain large energy savings, but entail water consumption and risk of Legionella disease. The adiabatic condensers, based on the use of evaporative cooling to precool the air before the condensing coils, can improve the energy efficiency of the chiller with less water consumption (Martínez et al., 2020). Because the power generation also yields water consumption, better energy efficiencies of the system also indirectly imply a reduction in water consumption. This work is intended to evaluate the hypothesis that the use of adiabatic condensers versus air-cooled condensers may result in global water savings of chillers in certain climatic zones.

2. Materials and methods

It is first necessary to gather information about different overall electricity mix in the target countries, with which it has been estimated the water consumption associated to electricity generation. Then, the chiller Energy Efficiency Ratio (EER) is related to the condensing temperature, which enables the estimation of the electric energy consumption in terms of the climate conditions. The actual global water

consumption is finally calculated through both the direct water use and the water derived from the generation of the electricity consumed. Eventually, the present document provides results of case study.

Adiabatic condensers and air-cooled condensers have been chosen because of their similarities. Basically, in adiabatic condensers heat is removed into the environment by heat gain of the air flowing over the condenser, the same way that in air-cooled condensers. The only difference is that air gets pre-cooled before getting into contact with the condenser coils, almost reaching its wet bulb temperature.

Other types of devices, such as cooling towers or evaporative condensers, are not included in this work. Although they can be more efficient in energy consumption terms, their water consumption is higher and they imply larger risk of developing Legionella because of their high working temperatures.

Global water consumption in an adiabatic condenser includes both the direct consumption due to the humidification of the air through the adiabatic cooling pad previous to the condenser, and the indirect consumption of water in the generation of the power required to operate the chiller. To determine this second term, it is necessary to know the electricity mix of each country in Europe, as water consumption in electricity generation differs between different technologies.

3. Results and discussion

3.1. European electric mix

To determine the indirect water consumption due to the electricity consumption, the electric mix from every European country have been collected (International Energy Agency, 2022), noting that there are substantial disparities between countries that will have an impact on their indirect water consumption.

3.2. EER evolution according to condensing temperature.

One of the first steps is to relate the Energy Efficiency Ratio (EER) of the chiller to the condensing temperature, which depends on the environmental temperature. This justifies the interest to reduce the condensing temperatures of the air-cooled condenser through adiabatic cooling of the air.

3.3. Indirect water consumption due to electricity consumption.

The published literature shows significant differences both in the methodology to obtain data and in the assumptions made about each generation technology [3]-[7]. Moreover, this is a relatively unexplored field with scarce information available.

To gathering of reliable data about water consumption in every single power plant around the continent is a vast work, so some assumptions and approximations must be set. In summary, the values given in Table 1 have been determined [3]-[7]:

Technology	Coal/Oil	Nuclear	Gas	Hydro	Solar PV	Wind	Biomass
l/kWh	2.4	2.5	0.9	70	0.4	0.3	90

Table 1. Average water consumption depending on the source of electricity generation.

For thermal power plants, it is assumed that they are located in river basins and their refrigeration systems are closed loop. Other alternative power sources have been disregarded in this study. Neither have been taken into account any specific countries' legislation.

Energy transition to low-carbon power generation may result in an increase or decrease of indirect water consumption. It will depend on whether hydroelectric and biomass sources, which involve great consumptions, are developed along with other renewable sources.

In countries whose electric mix is dominated by thermal power plants, water consumption in power generation is quite low. On the other hand, countries with a strong hydroelectric or with a significant biomass share have a much larger water consumption. That is to be found in mountainous countries such as Norway, Albania, Iceland or Switzerland (Figure 1).

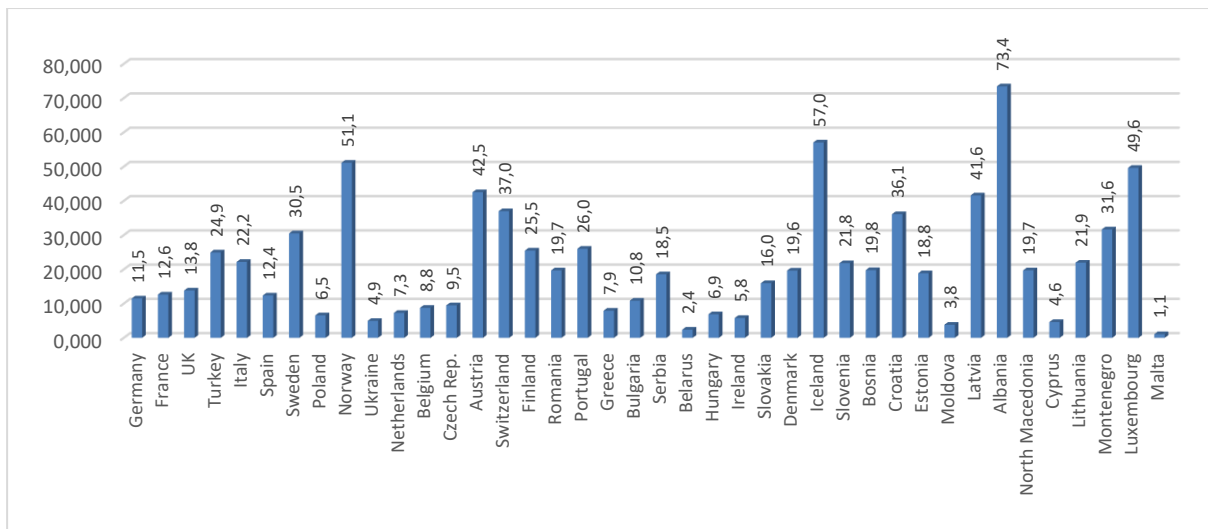


Figure 1. Water consumption in electricity generation (l/kWh) [1] [3]-[7].

3.4 Case study

In order to illustrate the comparison of the the global water consumption in adiabatic condensers and air-cooled condensers, a particular case has been studied. The facility consists of six air-cooled condensers of total cooling power is 8400 kW. The air-cooled condensers are equipped with a structure to put evaporative cooling pads at the air inlet, to increase their energy efficiency. For a preliminary study, it is considered that during the summer season (from May to September) load varies between 50% and 75%. The EER is improved through the adiabatic precooling of air as given in Table 2 (Martínez et al., 2020).

Period	% Load	EER without pad	EER with pad	Days
May, Jun, Sep	50%	3.78	4.95	91
Jul, Aug	75%	3.22	4.2	62

Table 2. EER of air-cooled condensers and adiabatic condensers depending on their load rate (Martínez et al., 2020).

The predicted electric power consumed is calculated for each period, through the expression (1):

$$\text{Electric power consumed} = \frac{\text{Cooling load}}{\text{EER}} \cdot t \quad (1)$$

Water consumption in energy generation varies widely according to the electric mix. In this particular case in Spain, with the assumptions made, it can be estimated at 13 l/kWh. This yields 34,696 m³ and 26,553 m³ of water consumed indirectly by the air-cooled condenser and the adiabatic condenser, respectively, being the former 8,143 m³ higher than that of adiabatic condenser in the same summer conditions.

Direct consumption refers to the on-site water use, which is zero in air-cooled condensers and relatively high in adiabatic condensers (Sohani & Sayyaadi, 2018). It can be calculated with the following expression (2):

$$\text{Water consumption} = \dot{M}_{in} * (\Delta x) \quad (2)$$

Where \dot{M}_{in} is the inlet mass flow of air and Δx is specific humidity increase at the outlet of the evaporative cooling pads.

First, dry bulb temperature (DBT) and relative humidity (RH) have been calculated for each period by taking the average of the twelve warmest hours of each day in the city. Then, assuming an ideal adiabatic humidification efficiency that reaches the wet bulb temperature (WBT), final conditions have been obtained. Initial and final temperature, relative and specific humidity conditions are shown in Table 3.

Period	Initial			Final		
	DBT (°C)	% RH	x (g/kg)	WBT (°C)	% RH	x (g/kg)
May, Jun, Sep	20.9	40%	6.6	12.8	100%	9.9
Jul, Aug	26.4	30%	6.9	15.1	100%	11.5

Table 3. Average predicted initial and final air conditions in an adiabatic cooler in Valladolid.

From this data, the predicted direct water consumption with evaporative pad during a summer season is 16,341 m³. Comparing this value with the previously calculated indirect consumption, the seasonal global water consumption would be 8,198 m³ higher than with the air-cooled condensers.

4. Conclusions

Electric mix varies largely among countries, and the EER of the chillers is heavily reliant on temperature. That is why global water consumption differs greatly from country to country according to their climate and mix. The present preliminary study predicts that it can be generally higher in adiabatic condensers, but in some specific circumstances of air temperature or electric mix it may be higher in air-cooled condensers.

References

- [1] F. J. R. Martínez, J. F. S. J. Alonso, E. V. Gómez, A. T. González, P. M. Esquivias, and J. M. R. Hernández, "Energy consumption reduction of a chiller plant by adding evaporative pads to decrease condensation temperature," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 9, May 2020, doi: 10.3390/en13092218.
- [2] International Energy Agency, "Countries and regions - IEA," <https://www.iea.org/countries>, Apr. 22, 2022.
- [3] T. Pistochini and M. Modera, "Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2–3, pp. 631–638, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.004.
- [4] M. Krarti and M. Aldubyan, "Mitigation analysis of water consumption for power generation and air conditioning of residential buildings: Case study of Saudi Arabia," *Applied Energy*, vol. 290, May 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116767.
- [5] P. Torcellini, N. Long, and R. Judkoff, "Consumptive Water Use for U.S. Power Production," 2003. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [6] J. Macknick, R. Newmark, G. Heath, and K. C. Hallett, "Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: A review of existing literature," *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 4, 2012, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/045802.
- [7] Y. Jin, P. Behrens, A. Tukker, and L. Scherer, "Water use of electricity technologies: A global meta-analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2019. doi: 10.1016/j.rser.2019.109391.
- [8] A. Sohani and H. Sayyaadi, "Thermal comfort based resources consumption and economic analysis of a two-stage direct-indirect evaporative cooler with diverse water to electricity tariff conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 172, pp. 248–264, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.07.008.

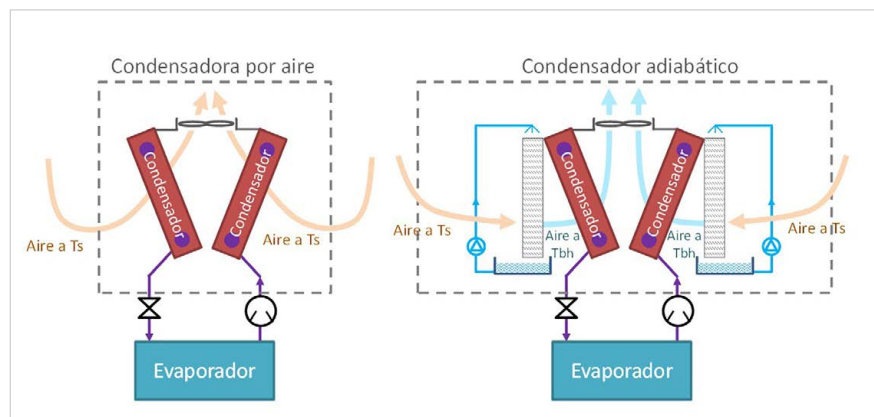
CONSUMO GLOBAL DE AGUA EN CONDENSADORES ADIABÁTICOS FRENTE A UNIDADES CONDENSADORAS ENFRIADAS POR AIRE

La Unión Europea, liderada por naciones como Alemania y su entorno, establece recomendaciones e imposiciones sobre el uso de algunas tecnologías con el objetivo de alcanzar una homogeneidad en el desarrollo técnico. A priori puede parecer una buena idea, sin embargo, no siempre lo es. Este es el caso de los sistemas de condensación en las enfriadoras. En Europa predominan los climas fríos, lo que justifica energéticamente el uso extendido de las unidades condensadoras enfriadas por aire frente a las alternativas más exigentes en mantenimiento basadas en agua. Sin embargo, en la práctica, al emplear este tipo de sistemas en climas más cálidos como los mediterráneos su rendimiento se ve gravemente perjudicado.

Jaime Illera Riesgo, Ana Tejero González, Manuel Andrés Chicote y Eloy Velasco Gómez

En este artículo no se busca evaluar dicha eficiencia energética, sino el consumo de agua asociado. Como alternativa a las condensadoras por aire y sin necesidad de entrar a valorar los condensadores evaporativos y las torres de enfriamiento, se presenta una solución de compromiso: los condensadores adiabáticos.

Estos equipos se están popularizando cada vez más en el mercado dada su posición equilibrada entre eficiencia energética y seguridad [1][2]. Si bien está ampliamente demostrado que su eficiencia es considerablemente superior a las condensadoras por aire en condiciones climáticas cálidas, su principal defecto es un importante consumo directo de agua.



Principio de funcionamiento de una condensadora por aire y un condensador adiabático.

Contrastaremos ahora una hipótesis que se plantea de forma recurrente: el consumo de agua global puede ser menor en condensadores adiabáticos que en condensadoras por aire.

Al mejorar la eficiencia se reduce el consumo eléctrico, lo que repercute en una menor necesidad hídrica en la generación eléctrica.

CONSUMO DE AGUA EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Un aspecto que se pasa por alto habitualmente cuando se habla de la eficiencia en el consumo de agua de los equipos es el que concierne al gasto indirecto necesario en las centrales de potencia para generar la energía eléctrica consumida. Ese empleo de agua en algunos casos puede resultar desmesurado pese a ser “invisible” a ojos del consumidor final, y depende del mix eléctrico de cada territorio.

En el caso de las centrales termoeléctricas, su modo de operación es similar por lo general, contando con uno o varios ciclos de potencia que requieren una refrigeración constante. La diferencia en el requerimiento de agua asociado radica fundamentalmente en el rendimiento de las centrales, muy superior en los ciclos combinados a los ciclos convencionales [3]-[9].

En cuanto a las energías renovables, los escasos estudios publicados manifiestan enormes diferencias de consumo de agua entre tecnologías. El consumo de agua asociado a la generación fotovoltaica es ínfimo, siendo el único gasto relevante el referido a la limpieza de los paneles. De igual modo, el consumo asociado a la operación de las plantas eólicas es prácticamente inexistente.

Sin embargo, no todas las renovables presentan datos tan favorables.

Aunque pueda resultar contraintuitivo, el consumo de agua en centrales hidroeléctricas es uno de los más elevados. Pese a no requerir refrigeración de sus sistemas de generación, los estudios existentes coinciden en que el aumento de evaporación debido a la existencia de agua embalsada se ha de atribuir a la generación eléctrica si este es su principal cometido [4]-[6], [10], [11].

Por último y también sorprendente es el gasto de agua necesario para hacer posible la energía procedente de la biomasa, dado que hay que contar con el regadío de los cultivos destinados a ese fin [6], [11]. La tabla 1 muestra los valores obtenidos para cada tecnología a partir de las fuentes existentes en la literatura.

En realidad, los consumos totales asociados a la generación son mayores, pues los mencionados se refieren solo a la operación de las centrales, a lo que habría que sumar el gasto derivado de la obtención de los combustibles fósiles y su transporte, que según algunas fuentes podrían incrementar el total cerca de un 10% [6][9]. Por tanto, los valores totales reales serán al menos los expuestos, y en algunos casos superiores.

Asimismo, todos los valores anteriores van a sufrir variaciones en función del clima en el que se encuentren ubicadas las centrales de potencia, pues las tasas de evaporación en la refrigeración y en los embalses dependen

estrechamente de las condiciones de temperatura y humedad, además de otros factores como la velocidad del viento o la radiación solar.

Cabe destacar que, pese a que no puede considerarse consumo como tal, la masa de agua que requieren las centrales termoeléctricas continuamente para su refrigeración (de la cual devuelven gran parte al entorno) supone un enorme impacto en lugares con recursos hídricos limitados. Según la literatura al respecto, tanto en China como en EE. UU. el sector energético es el segundo con mayores necesidades de agua tan solo por detrás de la agricultura [5].

Para obtener el consumo aproximado de cada país del continente europeo es necesario ponderar el gasto asociado a cada tecnología de generación en función del mix eléctrico particular, el cual varía considerablemente entre naciones. En la tabla 2 se presentan como ejemplo para el caso de estudio los mix de España, Italia y Grecia a fecha de realización de este estudio, a fin de comparar los resultados en climas similares con tecnologías de generación diferentes.

A modo de referencia, el consumo diario de electricidad en un hogar en España es de unos 10 kWh, lo que se traduce en 121 L/día tan solo para generar esa energía eléctrica.

TECNOLOGÍA	CARBÓN/ FUELOIL	NUCLEAR	GAS	HIDRO	SOLAR FV	SOLAR TÉRMICA	EÓLICA	BIOMASA
L/K WH	2.4	2.5	0.9	70	0.1	3.4	0.0	90

Tabla 1. Consumo medio de agua en la generación de electricidad. Fuentes:[4]-[11]

	CARBÓN	GAS NATURAL	FUEL-OIL	NUCLEAR	HIDRO	EÓLICO	SOLAR FV	SOLAR TÉRMICA	CONSUMO (L/KWH)
ESPAÑA	2%	27%	4%	23%	12%	21%	6%	2%	12,13
ITALIA	6%	48%	4%	0%	17%	7%	9%	0%	20,68
GRECIA	13%	39%	10%	0%	7%	21%	9%	0%	6,71

Tabla 2: Mix eléctrico de España, Italia y Grecia en 2020 (Fuente: [12]) y consumo medio de agua asociado.



1. Condensadoras por aire 2. Mismos equipos con paneles de preenfriamiento adiabático.

CASO DE ESTUDIO

Una vez establecida la tasa de consumo de agua indirecto de los equipos asociado al consumo eléctrico, se plantea un caso de estudio en el que comparar el consumo global de agua (directo más indirecto) de condensadores adiabáticos frente al consumo indirecto de condensadoras por aire. Para ello, se considera una condensadora por aire, la cual se puede convertir en adiabática incorporando paneles de relleno que proporcionan enfriamiento evaporativo directo a la entrada del flujo de aire exterior (imagen 1 y 2).

Se ha modelado el caso de estudio con un programa de simulación de uso interno, basado en funciones de transferencia, con el que se obtienen las demandas horarias de refrigeración anuales para el año meteorológico tipo correspondiente a Madrid. A partir de la carga máxima de refrigeración resultante de 144 kW, se selecciona un equipo de 150 kW de capacidad nominal. El consumo eléctrico se determina tomando el EER del equipo con y sin sistema de preenfriamiento adiabático. A partir de dichos consumos y

con las tasas previamente estimadas, se ha obtenido el consumo de agua indirecto a lo largo de un año.

Por su parte, el consumo directo con panel adiabático se calcula a partir de las condiciones exteriores simuladas de temperatura y humedad, suponiendo una eficiencia en la humidificación de 0,9. Se ha asumido que el control del sistema no modifica los flujos del aire de trabajo en función de las temperaturas de paso del aire a través de la batería.

Este mismo estudio se extiende para Italia y Grecia, donde pueden encontrarse climatologías semejantes a Madrid, pero en las que el mix eléctrico es notablemente diferente. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3 y la figura 1.

CONCLUSIONES

Los resultados reflejan que, para unas condiciones climáticas dadas, la diferencia viene marcada por el mix eléctrico que determina el consumo indirecto de agua en los equipos. Teniendo en cuenta que los valores de consumo en las centrales recogidos por la literatura no incluyen el gasto en todo el ciclo de vida de los combustibles y que se verán afectados por climas cálidos como los mediterráneos, el consumo de agua indirecto será superior al estimado por este procedimiento. En cualquier caso, por lo general (y en particular para España) el consumo de agua indirecto debido al uso de electricidad es superior al gasto que se pueda producir en el equipo.

Dos factores clave a tener en cuenta son la evolución climática en los próximos años y el cambio de paradigma esperable en el sector eléctrico. Por un lado, con el aumento previsto de las temperaturas en Europa las condensadoras por aire verán reducida su eficiencia también en regiones en las que actualmente son favorables. Además, en la generación de electri-

	CONSUMO TOTAL SIN PREENFRIAMIENTO ADIABÁTICO (m ³)	CONSUMO TOTAL CON PREENFRIAMIENTO ADIABÁTICO (m ³)	DIFERENCIA
ESPAÑA	1723	2065	19,8%
ITALIA	2851	2923	1,0%
GRECIA	948	1479	56,0%

Tabla 3: Consumo de agua total anual con y sin sistema adiabático.

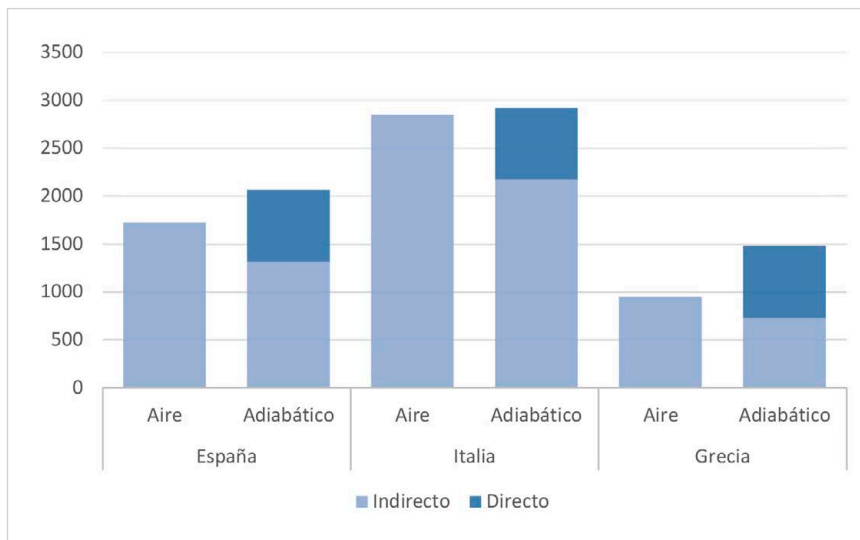


Figura 1: Consumo global anual de agua (m³) para los equipos con y sin paneles adiabáticos.

cidad unas condiciones más calurosas también repercutirán en un consumo mayor de agua. Por otra parte, y dado que la composición del mix eléctrico es fundamental en los resultados, la transición energética será determinante para este consumo indirecto de agua. Una transición hacia fuentes eólica o fotovoltaica permitirá reducir los consumos indirectos. Un resurgimiento de la tecnología nuclear supondría un incremento de las captaciones de agua necesarias para la refrigeración, pero no implicaría un mayor consumo de agua. Por último, un posible desarrollo de las centrales de biomasa supondría el mayor crecimiento esperable en el consumo de agua asociado a la generación de potencia. ■



BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. R. Puckorius, P. T. Thomas, and R. L. Augspurger, "Why Evaporative Coolers Have Not Cause Legionnaires' disease," 1995.
- [2] Boletín Oficial del Estado, Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. 2003.
- [3] A. Cooperman, J. Dieckmann, and J. Brodrick, "Water/Electricity Trade-Offs in Evaporative Cooling, Part 2," 2012. [Online]. Available: www.ashrae.org.
- [4] T. Pistochini and M. Modera, "Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 631-638, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.004.
- [5] P. Torcellini, N. Long, and R. Judkoff, "Consumptive Water Use for U.S. Power Production," 2003. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [6] Y. Jin, P. Behrens, A. Tukker, and L. Scherer, "Water use of electricity technologies: A global meta-analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, Elsevier Ltd, Nov. 01, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109391.
- [7] L. Karimi et al., "Water-energy tradeoffs in data centers: A case study in hot-arid climates," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 181, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106194.
- [8] J. Macknick, R. Newmark, C. Heath, and K. C. Hallett, "Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: A review of existing literature," *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 4, 2012, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/045802.
- [9] J. Meldrum, S. Nettles-Anderson, C. Heath, and J. Macknick, "Life cycle water use for electricity generation: A review and harmonization of literature estimates," *Environmental Research Letters*, vol. 8, no. 1, 2013, doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015031.
- [10] L. Scherer and S. Pfister, "Global water footprint assessment of hydropower," *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 711-720, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.07.021.
- [11] M. Krarti and M. Aldubyan, "Mitigation analysis of water consumption for power generation and air conditioning of residential buildings: Case study of Saudi Arabia," *Applied Energy*, vol. 290, May 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116767.
- [12] International Energy Agency, "Countries and regions - IEA," <https://www.iea.org/countries>, Apr. 22, 2022.