



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

COMPARACIÓN DEL CONSUMO GLOBAL DE AGUA EN CONDENSADORES ADIABÁTICOS Y CONDENSADORES ENFRIADOS POR AIRE

Autor: D. Jaime Illera Riesgo
Tutor: Dña. Ana Tejero González

Valladolid, Julio de 2022

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Máster tiene por objeto comprobar la idoneidad de los sistemas de condensación por aire y su variación adiabática en distintas regiones climáticas del continente europeo, desde el punto de vista del consumo de agua y la eficiencia energética.

En el estudio se pretende demostrar una hipótesis sencilla: el empleo de condensadores adiabáticos frente a condensadores por aire puede resultar en un ahorro global de agua en determinadas zonas climáticas. Para ello es necesario contar con la información de los diferentes mix eléctricos de cada país, con los cuales se ha calculado el consumo de agua asociado a la generación de energía eléctrica. Por otra parte, el Ratio de Eficiencia Energética depende de la temperatura de condensación, lo que permite estimar el consumo en función de las condiciones climáticas. El consumo global efectivo se relaciona finalmente tanto con el uso directo de agua como con el derivado de la generación de la energía consumida.

Por último, se exponen los cálculos de consumo de agua global asociado tanto a condensadores adiabáticos como a condensadoras por aire según el clima y el mix eléctrico.

PALABRAS CLAVE

Condensadoras por aire, Condensadores adiabáticos, Consumo de agua, Eficiencia energética, Mix eléctricos

ABSTRACT

The main objective of this Master's Dissertation is to check the suitability of different refrigeration systems according to their condenser type in diverse climate zones around the European continent, all of it in terms of water consumption and energy efficiency.

In this paper it is intended to demonstrate a simple hypothesis: the use of adiabatic condensers versus air-cooled condensers may result in global water savings of chillers in certain climatic zones. With this aim, it is first necessary to have the 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 is related to the condensing temperature, which enables the estimation of the electric energy consumption. The actual global water consumption is finally related with both the direct water use and the water derived from the generation of the electricity consumed.

Eventually, the present document sets out the key findings of the study, with calculated results about global water consumption associated to adiabatic condensers and air-cooled chillers depending on climate zone and electricity mix.

KEYWORDS

Adiabatic condensers, air-cooled condensers, chillers, energy efficiency, energy mix, water consumption

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Contexto	1
1.2. Justificación del TFM.....	3
1.3. Objetivos.....	5
2. Estado de la técnica	7
2.1. Tipos de instalaciones en función del sistema de disipación del calor de condensación	7
2.2. Condensadores adiabáticos	10
2.3. Rendimiento de los equipos generadores de frío	14
2.4. Consumo de agua y de electricidad en distintos equipos	16
3. Metodología.....	21
3.1. Caso de estudio.....	21
3.2. Climatologías.....	21
3.3. Selección de equipos.....	23
3.4. Cálculo de consumos indirecto y directo	23
4. Rendimiento y consumo de los equipos enfriadores en función del clima.....	27
4.1. Climas presentes en Europa.....	27
4.2. EER en función de la temperatura de condensación.....	30
5. Mix eléctricos en Europa.....	33
5.1. Mix energético de Europa	37
5.2. Mix energético de España	37
6. Consumo de agua asociado a la producción de electricidad	39
6.1. Centrales termoeléctricas	39
6.1.1. Centrales de carbón	42
6.1.2. Centrales de ciclo combinado	43
6.1.3. Centrales nucleares	43
6.2. Centrales hidroeléctricas	45
6.3. Parques eólicos	47
6.4. Centrales solares fotovoltaicas	48
6.5. Centrales de biomasa.....	48
6.6. Hipótesis particulares para este estudio	49
6.7. Factores de corrección de consumo de agua en la generación de energía eléctrica según el clima.....	51

6.7.1.	Relación del consumo hídrico con la depresión de bulbo húmedo	55
6.8.	Consumo de agua indirecto por unidad de energía generada y por país	59
6.9.	Caso de estudio: consumo de agua indirecto.....	62
6.9.1.	Consumo indirecto de agua por hora SIN panel adiabático:.....	63
6.9.2.	Consumo indirecto de agua por hora CON panel adiabático:.....	63
7.	Consumo de agua directo	65
7.1.	Caso de estudio: consumo de agua directo.....	69
7.1.1.	Consumo directo de agua por hora:.....	70
7.1.2.	Consumo horario global de agua.	70
8.	Resultados y discusión	73
8.1.	Resultados en la climatología Csa	74
8.2.	Resultados en la climatología Csb	76
8.3.	Resultados en la climatología Cfa.....	77
8.4.	Resultados en la climatología Cfb	78
8.5.	Resultados en la climatología Dfb	79
8.6.	Resultados en la climatología Dfc	80
8.7.	Resultados en las climatologías BSk y BSh	81
8.8.	Comparativa de países con mix similar en distintos climas.....	82
8.8.1.	Reino Unido y Alemania	82
8.8.2.	Turquía y Finlandia	84
8.8.3.	Bosnia y Macedonia	85
9.	Conclusiones y líneas futuras	89
	Líneas futuras:.....	92
10.	Bibliografía.....	93
	Anexo I: Peso relativo de cada fuente de energía eléctrica en los mix europeos.	99
	Anexo II: Publicaciones derivadas.....	100
1.	Introduction.....	100
2.	Materials and methods.....	100
3.	Results and discussion	101
4.	Conclusions.....	103
	References.....	103

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de un refrigerador de Carnot y diagrama T-S del ciclo invertido de Carnot. Fuente: (Çengel & Boles, 1989)	2
Figura 2: Esquema de funcionamiento de una condensadora por aire y un condensador adiabático. Fuente: Grupo de Termotecnia de la UVa.....	8
Figura 3: Funcionamiento de un panel de enfriamiento evaporativo directo. Fuente: (Evapco Brazil, 2022).....	9
Figura 4: Esquema de funcionamiento de torres de enfriamiento abiertas y cerradas, y de condensadores evaporativos. Fuente: Grupo de Termotecnia de la UVa.....	10
Figura 5: Esquema de funcionamiento de un sistema de enfriamiento evaporativo mixto Fuente: (HMX Ate Group, 2021)	12
Figura 6: Factores y coeficientes para el cálculo del ESEER. Fuente: (Marinhas, 2013)	15
Figura 7: Relación entre consumos hídrico y eléctrico en los equipos de refrigeración. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 8: Clasificación climática de Koppen-Geiger. Fuente: Elaboración propia	22
Figura 9: Mapa mundial de la clasificación climática de Koppen-Geiger. Fuente:(Beck et al., 2018)	23
Figura 10: Esquema resumen de la metodología seguida en el desarrollo de este trabajo. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 11: Mapa Koppen-Geiger de Europa entre 1980-2016. Fuente: (Beck et al., 2018).....	27
Figura 12: evolución del EER con la temperatura ambiente en una condensadora por aire y una adiabática.	32
Figura 13: Mix eléctrico en Europa en 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)	37
Figura 14: Mix eléctrico en España en 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)	38
Figura 15: Esquema de funcionamiento de los sistemas de refrigeración por circuito abierto y circuito cerrado con recirculación. Fuente: (Gosse & Samie, 2020)	40
Figura 16: Distribución de los distintos tipos de centrales de generación de energía eléctrica con una potencia instalada superior a 50 MW en el continente europeo. Fuente: (Lohrmann et al., 2021)	49
Figura 17: Consumo de agua en centrales termoeléctricas según la DBH. Fuentes: (Bumbacher & Schmid, 2011; EIA, 2021; Gosse & Samie, 2020; Jin et al., 2019; Sesma & Rubio-Varas, 2019)	57

Figura 18: consumo de agua en centrales hidroeléctricas según la DBH. Fuentes: (Chazarra et al., 2018; Earp & Moreo, 2021; IGN, n.d.; Junta de Andalucía, 2015; López Moreno, 2008; Tremblay et al., 2014).....	57
Figura 19: Consumo de agua asociado a la generación de electricidad (L/kWh) en cada país de Europa según su mix y clima. Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 20: Consumo de agua en cada país desglosado por fuentes de generación eléctrica. Fuente: elaboración propia.	61
Figura 21: Relación del espesor del relleno con el consumo de agua en condensadores adiabáticos. Fuente: (Sohani & Sayyaadi, 2018)	66
Figura 22: Relación de la velocidad del aire en la admisión con el consumo de agua en condensadores adiabáticos. Fuente: (Sohani & Sayyaadi, 2018).....	66
Figura 23: Proceso psicrométrico desarrollado en el enfriamiento evaporativo directo. Fuente: (Pistochini & Modera, 2011).....	67
Figura 24: Proceso de humidificación adiabática desarrollado en el aire que atraviesa los paneles de preenfriamiento. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 25: Evolución de la demanda de frío a lo largo del año en diferentes climas.	73
Figura 26: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Csa, desglosando en consumo directo e indirecto.	74
Figura 27: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Csa, desglosados los consumos directo e indirecto.....	75
Figura 28: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Csb, desglosados los consumos directo e indirecto.	76
Figura 29: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Cfa, desglosados los consumos directo e indirecto.....	77
Figura 30: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Cfb, desglosados los consumos directo e indirecto.....	78
Figura 31: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Dfb, desglosados los consumos directo e indirecto.	79
Figura 32: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Dfc, desglosados los consumos directo e indirecto.....	80
Figura 33: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en los climas BSk y BSh, desglosados los consumos directo e indirecto.	81
Figura 34: Mix eléctricos de Reino Unido y de Alemania. Fuente de datos: (International Energy Agency, 2022)	83
Figura 35: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en Reino Unido y Alemania, desglosados los consumos directo e indirecto.	83

Figura 36: Mix eléctricos de Turquía y de Finlandia. Fuente de datos: (International Energy Agency, 2022).....	84
Figura 37: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en Turquía y Finlandia, desglosados los consumos directo e indirecto.	85
Figura 38: Mix eléctricos de Bosnia y de Macedonia. Fuente de datos: (International Energy Agency, 2022).....	85
Figura 39: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en Bosnia y Macedonia, desglosados los consumos directo e indirecto.	86
Figura 40: Mapa Koppen-Geiger de Europa previsto para la segunda mitad del siglo XXI. Fuente: (Beck et al., 2018).....	87

Índice de tablas

Tabla 1: Denominación y descripción cualitativa de los climas según la clasificación de Koppen-Geiger. Fuente: (Beck et al., 2018)	28
Tabla 2: evolución del EER con la temperatura ambiente en una condensadora por aire y una condensadora adiabática.	30
Tabla 3: Composición de los mix eléctricos en Europa para cada país en el año 2020. Fuente: elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)	35
Tabla 4: Composición relativa de los mix eléctricos en Europa para cada país en el año 2020. Fuente: elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)	36
Tabla 5: consumo de agua por unidad de energía eléctrica generada en estados de E.E.U.U. Fuente: (Torcellini et al., 2003)	52
Tabla 6: consumo de agua en la refrigeración de cuatro centrales iguales en distintos emplazamientos. Fuente: (Bumbacher & Schmid, 2011; EIA, 2021; Sesma & Rubio-Varas, 2019)	53
Tabla 7: depresión de bulbo húmedo en cada zona climática de Europa. Fuente: ASHRAE ...	55
Tabla 8: Consumo de agua en centrales termoeléctricas e hidroeléctricas en Europa. Fuentes: (AEMET, 2018; Bumbacher & Schmid, 2011; Earp & Moreo, 2021; EIA, 2021; Gosse & Samie, 2020; IGN, n.d.; Jin et al., 2019; Junta de Andalucía, 2015; López Moreno, 2008; Sesma & Rubio-Varas, 2019; Tremblay et al., 2014)	56
Tabla 9: factores de corrección de consumo de agua en la generación de electricidad (L/kWh) para distintos climas. Fuente: elaboración propia	58
Tabla 10: valores corregidos de consumo de agua en la generación de electricidad (L/kWh) para distintos climas. Fuente: elaboración propia	59
Tabla 11: Consumo de agua asociado a la generación de electricidad en cada país de Europa según su mix y clima. Fuente: elaboración propia	59
Tabla 12: Condiciones iniciales en una hora determinada. Fuente: Elaboración propia	62
Tabla 13: Condiciones iniciales en una hora determinada. Fuente: Elaboración propia	69
Tabla 14: Condiciones finales tras el preenfriamiento adiabático en una hora determinada. Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 15: Diferencia en las humedades específicas en el inicio y el fin del proceso de preenfriamiento adiabático en una hora determinada. Fuente: elaboración propia.	70
Tabla 16: Consumo global de agua en condensadoras por aire y condensadores adiabáticos en una hora determinada. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 17: Evolución de la demanda de frío a lo largo del año en diferentes climas en el caso de estudio propuesto.	73

1. Introducción

1.1. Contexto

Una máquina frigorífica es un equipo que transfiere energía térmica desde un foco frío a otro a mayor temperatura mediante la aportación de trabajo exterior, de modo que transforma energía mecánica en térmica. La transferencia de calor entre ambos focos se realiza a través de un fluido refrigerante que circula de forma cíclica.

El ciclo de una máquina frigorífica por compresión simple cuenta con cuatro etapas principales comprendidas entre dos niveles de presión y temperatura, siendo el nivel superior el correspondiente a la condensación del fluido refrigerante y el inferior el correspondiente a su evaporación. En el evaporador se absorbe calor del foco frío, cediéndolo a continuación en el condensador al ambiente a un nivel térmico mayor. Es en esta última etapa en la que se centra este estudio, comparando diferentes sistemas de condensación en función de sus consumos de agua directo e indirecto.

El coeficiente de efecto frigorífico (COP o EER) de los equipos enfriadores depende en gran medida de la temperatura exterior, que influye directamente en la temperatura de condensación. El COP máximo teórico, según el ciclo de Carnot, corresponde al cociente de la cantidad de calor absorbido del foco frío entre el trabajo exterior aportado.

$$COP_{MF} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

Donde:

Q_1 = Calor cedido al foco caliente

Q_2 = Calor absorbido del foco frío

W = Trabajo aportado

T_1 = Temperatura del foco caliente

T_2 = Temperatura del foco frío

La función esencial de la máquina frigorífica es trasladar calor del foco frío al foco caliente, para lo cual es necesario aportar una determinada potencia. A mayor proximidad térmica entre los focos, mayor es también el rendimiento máximo que se puede llegar a alcanzar, así

como el rendimiento real. Por el contrario, con un mayor salto térmico el rendimiento ideal y real alcanzables serán inferiores.

Un concepto importante que se debe tener en cuenta en el funcionamiento del condensador y que afecta de forma crítica a la eficiencia del equipo es que, para posibilitar la disipación del calor en el foco caliente, el elemento condensador evidentemente ha de encontrarse en un nivel térmico superior al del propio ambiente.

De esta breve descripción del funcionamiento de un ciclo frigorífico, y contando con que la temperatura del foco frío habitualmente se establece en una temperatura constante de unos 7°C, se concluye de manera sencilla que es conveniente que se trabaje a una temperatura de condensación lo más baja posible. Si se trabaja en temperaturas de condensación altas, las presiones necesarias son elevadas y es necesaria una mayor potencia en el compresor que resulta inevitablemente en un menor rendimiento de la máquina.

En la Figura 1 se presenta el esquema básico de la máquina frigorífica con sus elementos fundamentales, así como un diagrama temperatura-entropía para el ciclo ideal de Carnot. Se pueden apreciar sencillamente el nivel de presión y temperatura bajas (puntos 1 y 2) y el de presión y temperatura altas (3 y 4).

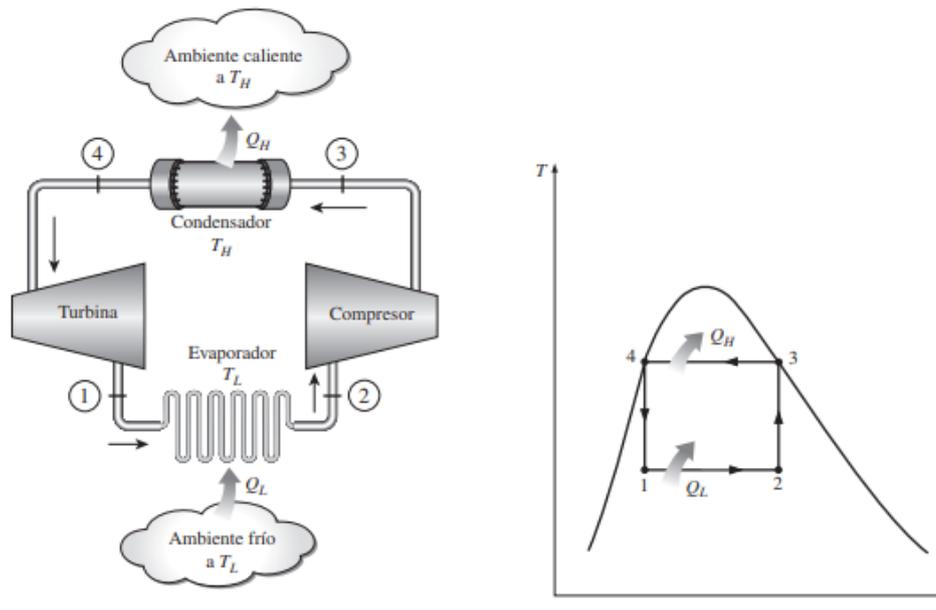


Figura 1: Esquema de un refrigerador de Carnot y diagrama T-S del ciclo invertido de Carnot. Fuente: (Çengel & Boles, 1989)

1.2. Justificación del TFM

La mejora continua en la eficiencia energética es una materia que cobra cada vez una mayor importancia en el actual contexto de desarrollo y evolución en el tejido industrial y energético hacia el horizonte sostenible que se marcan como objetivos tanto las empresas como las propias naciones.

En ese marco, el de la búsqueda de la máxima eficiencia energética y la reducción del impacto medioambiental de los equipos industriales, se desarrolla este proyecto de investigación. Concretamente se analiza y compara el consumo de agua global asociado al funcionamiento de condensadores adiabáticos y condensadoras por aire.

Existen diversos métodos de condensación dentro de los sistemas de enfriamiento industrial aparte de los dos mencionados y que toman parte en el estudio, tales como las torres de refrigeración, tanto abiertas como cerradas, y los condensadores evaporativos. No obstante, el empleo de estos otros sistemas supone un consumo de agua considerablemente mayor, además de comportar cierto riesgo de legionelosis, por lo que su instalación es cada vez más minoritaria y no es especialmente recomendable (BOE, 2003).

En este estudio se plantea la hipótesis que propone que los condensadores adiabáticos consumen menos agua que las condensadoras por aire, al menos en algunas climatologías, ya que trabajando a altas temperaturas su eficiencia es notablemente superior repercutiendo en un menor consumo energético y por tanto un menor consumo de agua en la generación eléctrica.

La legislación española, en consonancia con las directrices transmitidas por los organismos europeos, ha adoptado en sus Reales Decretos estrictos criterios para las instalaciones con torres de refrigeración y condensadores evaporativos por motivos higiénico-sanitarios. De este modo, se fomenta de forma no explícita la inclusión de equipos que no empleen agua (condensadoras por aire) en las nuevas instalaciones de sistemas de enfriamiento industrial (BOE, 2003). El motivo es comprensible y sencillo; la condensación por aire resulta totalmente segura frente al riesgo de legionelosis al no emplear agua en su utilización. Esa misma característica, la ausencia de agua de enfriamiento en la instalación, deriva en un menor impacto ambiental y un ahorro en el mantenimiento de los equipos, que sufren menor riesgo de corrosión y oxidación que el resto de los condensadores que sí emplean agua.

La tendencia de las empresas instaladoras hacia un mayor empleo de las condensadoras por aire es explicable además debido a que este tipo de equipos presentan una buena eficiencia en climas fríos con veranos que no alcanzan altas temperaturas. Sin embargo, Europa es un vasto continente y sus características no se pueden generalizar en toda su extensión. Es

evidente que no es comparable la climatología de la región escandinava o la centroeuropea con la de los países mediterráneos.

Es en estos últimos territorios en los que los sistemas de condensación por aire resultan menos eficientes debido a las altas temperaturas alcanzadas en el periodo estival, y este trabajo trata de dar respuesta a la sospecha de que en estos climas puede resultar más conveniente el empleo de condensadores adiabáticos.

Tan solo se van a analizar y comparar esos dos tipos de sistemas, dejando a un lado otros equipos como las torres de refrigeración o los condensadores evaporativos. Tal y como ya se ha introducido brevemente con anterioridad, pese a que esos otros equipos resultan más eficientes en cuanto a su consumo energético, su gasto de agua es ampliamente mayor y presentan riesgo de proliferación de legionelosis.

La legionelosis es una enfermedad bacteriana de origen ambiental que puede causar en quien la contrae síntomas que van desde un síndrome febril de carácter leve hasta neumonía con fiebre alta y pronóstico de mayor gravedad. Puede aparecer en equipos de enfriamiento de agua evaporativos y en sistemas de distribución de agua caliente sanitaria.

La bacteria de la Legionella se desarrolla generalmente en aguas superficiales estancadas, y es capaz de sobrevivir en un amplio intervalo de condiciones de temperatura. Su temperatura óptima de proliferación se encuentra entre 35-37°C, aunque su crecimiento puede darse entre 20°C y 45°C y su destrucción no se alcanza hasta superar los 70°C aproximadamente (BOE, 2003).

En el caso de las torres de refrigeración y los condensadores evaporativos, los titulares y empresas instaladoras están obligados a notificar a la administración sanitaria competente el número y características técnicas de los equipos, así como disponer de un registro de mantenimiento que se encuentre siempre accesible a las autoridades sanitarias. Existe una serie de medidas preventivas específicas para estas instalaciones respecto a su diseño, ubicación y procedimientos de mantenimiento recogidos en el Real Decreto 865/2003.

En el caso de los condensadores adiabáticos, cuyo funcionamiento se desarrolla en mayor profundidad más adelante, el agua que se encuentra en los equipos se encuentra a la temperatura de bulbo húmedo. Esto significa que, de encontrarse presente la bacteria causante de la Legionella, se encuentra en estado latente y no supone riesgo alguno de proliferación y dispersión (Puckorius et al., 1995).

Las razones expuestas evidencian que resulta tremendamente interesante desde el punto de vista de la eficiencia energética y la mejora continua estudiar en qué casos puede mostrarse más beneficioso el uso de uno u otro sistema de condensación. No parece razonable que se instale sistemáticamente el mismo tipo de equipos en todo el continente sin una base científica que respalde su empleo.

1.3. Objetivos

La finalidad principal de este Trabajo de Fin de Máster es analizar los consumos indirectos de agua asociados a la energía eléctrica consumida por dos tipos diferentes de enfriadores industriales según su modo de condensación. Todo ello se valora teniendo en cuenta dos los dos factores más relevantes que afectan al resultado; por una parte, los modos de producción de esa energía eléctrica, que variarán para cada región del continente europeo, y por otra parte las distintas temperaturas de condensación que se pueden encontrar en función de las zonas climáticas. Los objetivos que se tratan de alcanzar a lo largo del trabajo se pueden resumir de la siguiente forma:

- Recopilación y análisis del mix eléctrico de cada país de Europa.
- Estudio del impacto del mix energético en el consumo de agua en la generación de electricidad.
- Investigación de la evolución del EER con la temperatura de condensación.
- Cálculo del consumo de agua directo en los equipos.
- Estudio del impacto del clima sobre los consumos directos e indirectos.
- Elección del equipo más eficiente globalmente en cada territorio según su mix y clima.

Por tanto, en primer lugar, se puede establecer como objetivo conocer los diferentes mix eléctricos de cada uno de los países del territorio europeo, desagregando la generación energética total de cada estado en los tipos de sistemas más destacados. Estos previsiblemente serán muy diferentes según las características geográficas, climáticas y políticas de cada país.

Una vez conocidos los mix eléctricos de cada país, el siguiente objetivo lógico que se busca satisfacer es averiguar cómo afecta el mix eléctrico al consumo de agua indirecto. Cada uno de los sistemas de generación (centrales termoeléctricas de distintas tipologías, hidroeléctricas, biomasa...) funciona de un modo determinado y tiene asociados unos consumos de agua. Por tanto, en cada Estado habrá un consumo de agua por unidad de energía (L/kWh) en función de su estructura de generación.

Otro de los propósitos del trabajo es comprender la evolución del ratio de eficiencia energética (EER) en función de la temperatura de condensación a la que trabajan los equipos, la cual dependerá de la temperatura exterior del ambiente en el que se encuentren. Cuanto mayor sea dicha temperatura, mayor será el salto térmico en la máquina, viéndose perjudicado el rendimiento.

El cálculo del consumo de agua directo que se produce en los sistemas de enfriamiento evaporativo directo será otro de los puntos clave a estudiar en este documento. Pese a que la hipótesis principal y el análisis se centran más en lo que respecta a consumos indirectos, por su complejidad y la falta de información al respecto, el estudio no será completo si no se analizan todos los consumos y se comparan globalmente. En el caso de las unidades condensadas por aire este consumo directo será nulo, y en los condensadores adiabáticos lo determinará la cantidad de agua evaporada, que será mayor en climas más calurosos.

El conocimiento de esa influencia de los climas será por tanto también uno de los objetos del presente trabajo. Por una parte, los diferentes climas influirán directamente en el consumo de agua de los condensadores adiabáticos en su lugar de funcionamiento. Además, tal y como ya se ha mencionado, las temperaturas del ambiente exterior repercutirán en la eficiencia de los equipos, por lo que en climas más calurosos el consumo eléctrico será superior y por tanto también lo será el consumo de agua asociado a la generación de electricidad.

Igualmente, el clima predominante en cada región deberá tener una influencia sobre el consumo de agua en las centrales eléctricas. Se pretende demostrar cómo territorios más calurosos y secos presentarán tasas de evaporación superiores en sus embalses, torres de refrigeración, cultivos de biomasa, etc.

El análisis de los consumos asociados a la generación de electricidad es un tema muy poco explorado en la literatura científica, así como la influencia de los diferentes climas en el desempeño hídrico de las centrales. Por ello, en definitiva, este trabajo trata de completar en la medida de lo posible esas lagunas, considerando que en la actualidad resulta vital la mejora en la eficiencia en el uso de los recursos. Cada vez es más importante la búsqueda del menor impacto de las acciones del ser humano, y para ello se ha de contar con toda la información posible.

2. Estado de la técnica

2.1. Tipos de instalaciones en función del sistema de disipación del calor de condensación

Cuando se plantea la necesidad de instalar un sistema de enfriamiento industrial para cubrir las necesidades de climatización de un determinado volumen de aire, se pueden encontrar diversos tipos de equipos que se suelen clasificar en función de su disipación del calor de condensación. De todas las etapas que conforman el ciclo frigorífico, la correspondiente a la condensación del fluido caloportador es quizá la más importante de todas ellas, pues la elección de una instalación u otra tiene un peso fundamental en la eficiencia eléctrica del equipo, el consumo de agua, las necesidades de mantenimiento o el volumen ocupado por las máquinas.

Las condensadoras por aire son dispositivos de enfriamiento en seco, es decir, cuya actividad no requiere el uso directo de agua. En ellos, el fluido refrigerante se condensa en el interior de una batería de tubos normalmente aleteados que entran en contacto con una masa de aire a menor temperatura. Ese flujo de aire fresco del exterior disipa el calor necesario y determina la eficiencia de los equipos, que será mayor cuanto menor sea la temperatura del aire. Una vez completada la etapa, el condensado vuelve a circular hacia el recinto que se está refrigerando. Tras atravesar la válvula de expansión alcanza el evaporador, donde absorbe de nuevo el calor que deberá disipar en el condensador de forma cíclica.

Las ventajas fundamentales de los condensadores enfriados por aire frente a otros sistemas que emplean agua para su actividad están directamente relacionadas con dicha ausencia de agua en el sistema. El hecho de funcionar en seco reduce drásticamente las necesidades de mantenimiento de los equipos, pues la presencia de agua siempre puede acarrear problemas de corrosión, desgaste y reducción de la eficiencia y vida útil de los equipos. Además, el agua estancada a determinadas temperaturas puede ser una fuente de proliferación de legionelosis, cuya prevención y control están regulados por el Real Decreto 865/2003, de 4 de julio (BOE, 2003), que establece las condiciones de mantenimiento básicas para permitir un funcionamiento seguro.

De igual forma, no emplear agua en el proceso de refrigeración puede resultar en sí mismo algo ventajoso, especialmente en emplazamientos en los que es complicado acceder a este recurso o es escaso, así como en determinados lugares en los que el coste del agua corriente es muy elevado.

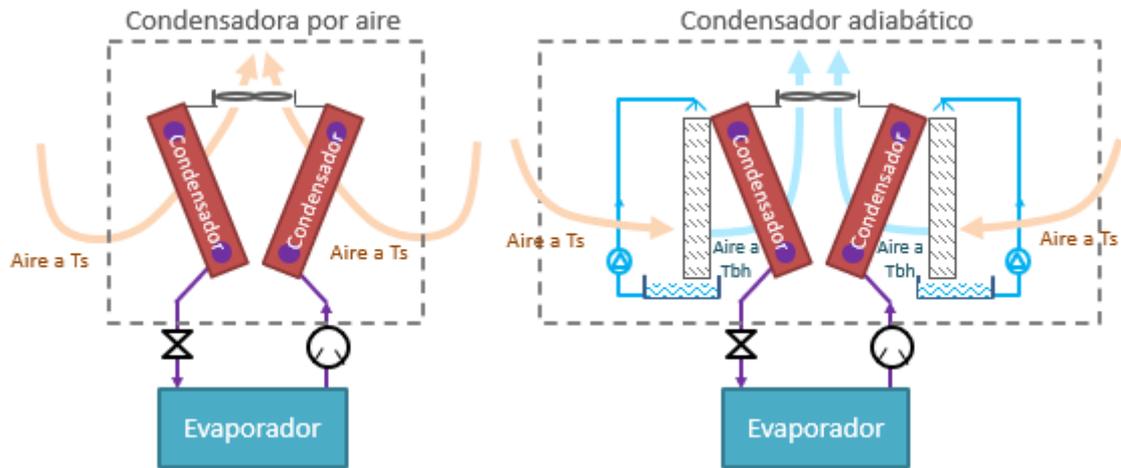


Figura 2: Esquema de funcionamiento de una condensadora por aire y un condensador adiabático. Fuente: Grupo de Termotecnia de la UVa.

Los condensadores adiabáticos tienen un funcionamiento muy similar al de los condensadores por aire, pues también disipan el calor de condensación al aire. Sin embargo, se trata de dispositivos en los que se puede preenfriar el aire antes de entrar en contacto con las baterías de refrigerante.

Este preenfriamiento se logra mediante unos paneles rellenos de materiales muy diversos por los que discurre un flujo constante de agua en estado líquido. A través del fenómeno conocido como enfriamiento evaporativo, el agua líquida se evapora en el seno del aire a medida que este atraviesa los paneles. De este modo, el agua se mantiene recirculada a la temperatura de bulbo húmedo del aire y el aire reduce su temperatura a medida que se humidifica en un proceso adiabático.

El empleo de los paneles de preenfriamiento no resulta necesario en todo momento, tan solo será especialmente efectivo en los momentos más calurosos del día y del año, cuando el aire exterior se encuentra a una temperatura elevada que dificulta la disipación del calor. Por tanto, estos equipos pueden funcionar como condensadores por aire durante gran parte del tiempo y, cuando las condiciones ambientales lo requieren, hacer uso del preenfriamiento evaporativo para mejorar drásticamente el rendimiento con altas temperaturas.

Tal y como se ha expuesto, los condensadores adiabáticos se pueden considerar una versión mejorada de los condensadores por aire, con un funcionamiento igual en condiciones ambientales frías o suaves, y con la adición de los paneles de preenfriamiento en momentos más calurosos y secos en los que los condensadores enfriados solo por aire reducen su rendimiento.

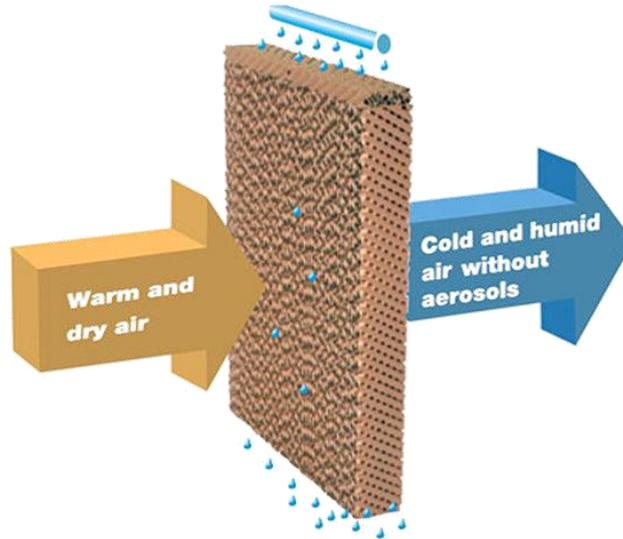


Figura 3: Funcionamiento de un panel de enfriamiento evaporativo directo. Fuente: (Evapco Brazil, 2022)

Otros sistemas de generación de frío con el uso de agua son las torres de enfriamiento y los condensadores evaporativos. Las torres de enfriamiento o de refrigeración basan también su actividad en el enfriamiento evaporativo, de modo que la transferencia es en su mayor parte en forma de calor latente por la evaporación del agua líquida.

En este caso se trata de enfriar agua caliente pulverizándola en forma de gotitas sobre un relleno que puede ser de diversos materiales y en el que se el agua se cruza a contracorriente con un flujo de aire ascendente. Así, el agua líquida cae finalmente a menor temperatura a un depósito tras ceder su calor a la corriente de aire. En el proceso se evapora parte del agua líquida tras tomar el calor de vaporización necesario del resto del agua que circula por el relleno.

Las torres de enfriamiento pueden ser abiertas o cerradas. En las torres abiertas existe contacto directo entre los fluidos, resultando más sencillas y económicas. En las torres cerradas existe un circuito de agua primaria cerrado, de forma que el líquido a refrigerar no entra en contacto directo con el aire, pudiendo alcanzarse temperaturas más bajas y reduciendo considerablemente el riesgo de legionela al no contactar los circuitos de agua primario y secundario. Las ventajas más significativas de las torres de refrigeración frente a otros sistemas son su bajo consumo energético y menores costes de inversión inicial, si bien su impacto respecto al consumo de agua es muy alto.

La última de las tecnologías más empleadas en el enfriamiento industrial es la correspondiente a los condensadores evaporativos. Su funcionamiento se basa en el mismo principio que las torres de refrigeración, con la diferencia de que en los condensadores evaporativos el calor se intercambia desde un haz tubular por el que circula el líquido a

refrigerar, en lugar de intercambiarse en una superficie de relleno como sucede en las torres de enfriamiento.

El aprovechamiento del enfriamiento evaporativo en estas instalaciones es muy similar a las anteriores. El serpentín con el fluido refrigerante recibe constantemente una pulverización de agua procedente de un circuito secundario mientras un flujo de aire circula a contracorriente desde abajo hacia la parte superior del equipo. La evaporación de una pequeña parte de esa agua recirculada absorbe el calor de la superficie del serpentín, enfriando el interior de este.

Algunas de las ventajas de los condensadores evaporativos y, en general, de los sistemas que emplean agua en el enfriamiento, son: su mayor eficiencia energética gracias al aprovechamiento del calor de vaporización del agua y su menor ocupación de espacio en planta, siendo por lo general equipos más compactos. Además, en el caso de los condensadores evaporativos se pueden alcanzar temperaturas de condensación más bajas con unas menores necesidades de mantenimiento que en las torres. No obstante, el elevado consumo de agua y el riesgo de proliferación de legionelosis son dos desventajas de gran peso. Estas razones están conduciendo en los últimos tiempos a los sistemas evaporativos y las torres a situarse en un segundo plano en el sector de la climatización en beneficio de los condensadores por aire y, en menor medida, los adiabáticos.

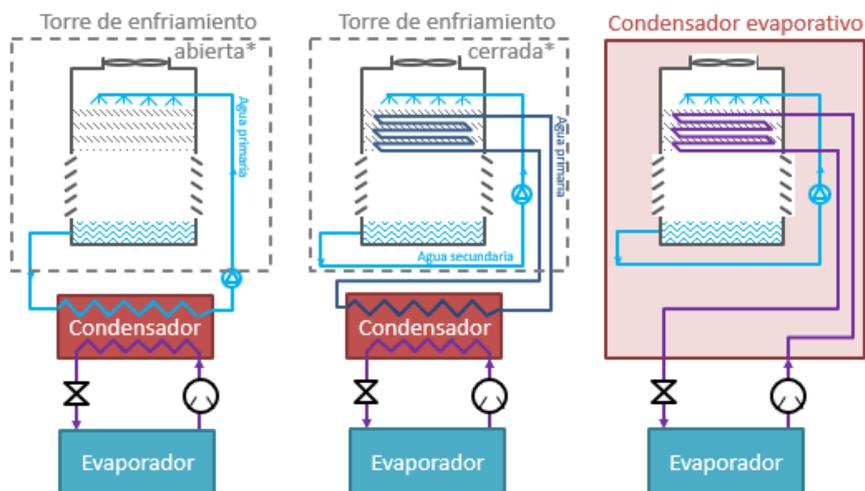


Figura 4: Esquema de funcionamiento de torres de enfriamiento abiertas y cerradas, y de condensadores evaporativos.
Fuente: Grupo de Termotecnia de la UVa.

2.2. Condensadores adiabáticos

Tal y como se ha introducido anteriormente, el presente trabajo se enfoca esencialmente en el estudio de condensadores por aire y condensadores adiabáticos, dado que son los dos sistemas con unas perspectivas de evolución e instalación más favorables. Las razones que

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

hacen esperar un mayor empleo de estas máquinas son su seguridad sanitaria y su menor consumo de agua frente a otros equipos como las torres de refrigeración o los condensadores evaporativos.

La utilización de condensadores adiabáticos encuentra su localización óptima en climas con altas temperaturas y baja humedad ambiental en los que no hay escasez de agua corriente. En esas condiciones son los sistemas más eficientes globalmente en términos de consumos hídrico y eléctrico. En los últimos años, pese a la mayor implantación de equipos condensados por aire en el mercado europeo, se han logrado importantes mejoras en los sistemas adiabáticos. Algunas de las mejoras incluyen ventiladores más eficientes, nuevos diseños de los sistemas de distribución o el uso de materiales plásticos y sintéticos que reducen las necesidades de mantenimiento de los paneles de preenfriamiento. Además, se han desarrollado sistemas de control que permiten variar la velocidad del aire y la tasa de humidificación de los paneles (Saman et al., 2009).

Una importante mejora se ha dado en el sistema de humidificación, la cual inicialmente se realizaba mediante pulverizadores y podía derivar en problemas de corrosión. En la actualidad se emplean rellenos por los que se deja fluir el agua, con lo que no existe arrastre de gotas y se evita la corrosión. Estos rellenos pueden ser de muchos materiales diferentes como papel, fibra de pvc, fibra de vidrio, textiles, fibra aspen o fibra de coco.

Uno de los principales obstáculos con los que aún se encuentran los condensadores adiabáticos es el límite de saturación de agua propio del proceso. Este límite implica grandes dificultades en casos en los que la humedad relativa del aire es alta, resultando poco útil el empleo de los paneles adiabáticos.

Estos sistemas se pueden clasificar en función de sus etapas de funcionamiento en directos, indirectos o mixtos con varias etapas.

- El **enfriamiento evaporativo directo** es el sistema más antiguo y simple de enfriamiento evaporativo, pudiéndose encontrar ejemplos primitivos de su uso en las civilizaciones persa y egipcia hace miles de años mediante la canalización de corrientes de aire junto a masas de agua previamente a su introducción en edificios. En el enfriamiento evaporativo directo, el aire contacta directamente con el agua de forma que se enfría y humidifica. El calor sensible del aire se convierte en latente de evaporación del agua, no existiendo intercambio de calor con el ambiente y transformándose parte del agua en vapor que es emitido al exterior. El proceso puede recibir también la denominación de humidificación adiabática o enfriamiento isoentálpico del aire (He et al., 2015).
- El **enfriamiento evaporativo indirecto** evita aportar humedad al aire separando los flujos de aire y de agua en distintos canales de un intercambiador. Así se logra una

reducción de temperatura sin el aumento de humedad que en algunos casos puede resultar problemático. Un enfriador evaporativo indirecto tiene dos circuitos: uno primario en el que se transmite el frío y uno secundario que arrastra al ambiente la humedad transmitida en el intercambio. Durante su operación, la evaporación del agua es arrastrada por el flujo secundario mientras que el aire primario atraviesa el sistema enfriándose sin humidificación, lo que lo hace ideal para acondicionamiento de aire en edificios (Duan et al., 2012). Este tipo de máquinas han experimentado un gran desarrollo e interés científico en las últimas décadas, si bien los sistemas directos siguen contando con un mayor peso en la mayoría de las aplicaciones.

- Los **sistemas mixtos** habitualmente cuentan con dos etapas (Figura 5). En la primera de ellas, el aire caliente del ambiente se preenfía indirectamente sin aumentar su humedad. A continuación, en la etapa directa, el aire preenfriado atraviesa un panel empapado de agua en el que aumenta su humedad al mismo tiempo que reduce aún más su temperatura. Gracias al primer enfriamiento en la parte indirecta, en la parte directa no es necesario incrementar tanto la humedad hasta alcanzar la temperatura deseada del aire, o bien es posible reducir más la temperatura alcanzando la misma humedad relativa.



Figura 5: Esquema de funcionamiento de un sistema de enfriamiento evaporativo mixto Fuente: (HMX Ate Group, 2021)

Los sistemas directos son los más populares y extendidos en el mercado, así como los más efectivos en climas áridos, donde pueden reducir el consumo eléctrico hasta un 30% frente a las condensadoras por aire, teniendo siempre precaución para que los paneles de relleno no

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

ofrezcan una gran resistencia al paso del aire con la pérdida de carga que eso conllevaría (ASHRAE, 2020). A la hora de determinar el rendimiento de los enfriadores evaporativos, un factor clave es la eficiencia en la evaporación, es decir, cuánto se llega a aproximar el aire al punto de saturación. En equipos modernos este parámetro puede alcanzar el 95% (Saman et al., 2009).

$$\varepsilon = 100 \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t'} \quad (2)$$

Donde

ε = Efectividad en la evaporación directa (saturación), %

t_1 = Temperatura de bulbo seco del aire de entrada al sistema evaporativo, °C

t_2 = Temperatura de bulbo seco del aire de salida del sistema evaporativo, °C

t' = Temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada, °C

Esa eficiencia en la evaporación tiene también un impacto en el consumo de agua. Una mayor humidificación implica un mayor consumo de agua. Sin embargo, dado que mayores eficiencias en la evaporación permiten la producción de aire a temperaturas menores, el impacto global es habitualmente una mejora en el consumo de agua y energía por unidad de enfriamiento.

El consumo de agua en condensadores adiabáticos puede separarse en dos porciones: por una parte, el agua evaporada para proporcionar el enfriamiento, y por otra el agua vertida para evitar un exceso de concentración de sales. La cantidad evaporada viene determinada por las temperaturas y humedades de entrada y salida, así como el caudal de aire y las características de los paneles evaporativos. A medida que el agua se evapora, en los paneles y en el agua restante quedan algunas sales e impurezas que pueden conducir a la corrosión de los componentes metálicos, bloquear las celdas de los paneles y reducir la eficiencia de los equipos. Por ello, el agua del depósito de recirculación debe ser purgado regularmente (Borodinecs et al., 2021).

Si el sistema de purgado está correctamente diseñado, instalado y mantenido, el consumo global de agua queda dominado enormemente por el agua de evaporación. Sin embargo, si no se encuentra apropiadamente ajustado, la tasa de agua vertida puede suponer grandes pérdidas y alcanzar el mismo orden de magnitud que la tasa de evaporación. Además, la influencia de la calidad del agua es muy relevante, pues no todas las aguas cuentan con la misma cantidad de sales disueltas. Algunos estudios demuestran que el agua de lluvia es

muy recomendable para su uso en enfriadores adiabáticos siempre que esté disponible, dado que su contenido en sales es normalmente bajo (Saman et al., 2009).

Lo más habitual, no obstante, es el uso de agua potable de la red para garantizar el suministro y para evitar posibles problemas relacionados con una baja calidad del agua. El coste del agua a menudo se ignora dado que es una parte insignificante del coste operacional del sistema, aunque en ciertos casos puede llegar a convertirse en un coste significativo en lugares con escasez de agua y grandes diferencias entre las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo (ASHRAE, 2019).

2.3. Rendimiento de los equipos generadores de frío

A la hora de cuantificar el rendimiento o eficiencia de las máquinas de aire acondicionado, bombas de calor, enfriadoras de agua, etc. se puede encontrar una serie de términos como COP, SCOP, EER, SEER que conviene definir y diferenciar. Si bien todos ellos comparten el mismo fin de describir el mejor o peor desempeño de las máquinas, existen matices que los distinguen y los hacen más o menos apropiados para cada tipo de máquina o aplicación.

El coeficiente de rendimiento o Coefficient Of Performance (COP) de un equipo de climatización es el resultado de la relación entre la energía térmica proporcionada y el trabajo requerido para ello. Por ello, un COP superior supone una mayor eficiencia, un menor consumo energético para vencer las cargas térmicas necesarias y un ahorro global. El término COP se emplea habitualmente en bombas de calor y su valor supera la unidad, a diferencia del rendimiento que se puede encontrar en cualquier máquina térmica. Esto es debido a que, en lugar de transformar el trabajo en calor, emplea dicho trabajo en transportar el calor desde un foco hasta otro de manera reversible, en función de las necesidades de cada momento.

El Coeficiente de Eficiencia Energética (CEE), más conocido como Energy Efficiency Ratio (EER) es la relación entre la energía frigorífica total que puede aportar una máquina y el trabajo requerido para ello. Es decir, representa el mismo concepto que el COP, con la diferencia de que este acostumbra a ser empleado en equipos que proporcionan energía calorífica mientras que el EER se refiere a equipos que proporcionan energía frigorífica como los que se analizan en este Trabajo de Fin de Máster.

El coeficiente de rendimiento estacional o Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) se puede definir como el coeficiente global de eficiencia de una máquina a lo largo de toda la estación del año en que se requiere calefacción. Para su correcta obtención es necesario que se designe una temporada de calefacción, a partir de la cual se calcula el cociente de la demanda de calor en esa estación entre el consumo energético requerido. El SCOP se emplea como estándar de eficiencia energética en calefacción a nivel europeo (Comisión

Europea, 2011). Este coeficiente estacional es un parámetro más realista que el COP, pues mide el consumo energético a diferentes cargas parciales mientras que el COP es un valor puntual con la máquina funcionando en condiciones nominales.

De igual forma, el coeficiente de eficiencia energética estacional o Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) indica cuán eficiente en el consumo de energía es un equipo de aire acondicionado. Se calcula mediante el cociente de la capacidad de enfriamiento de la máquina en una estación que requiere refrigeración entre el consumo energético requerido. En muchos casos la temporada de refrigeración se corresponde con todo el año, pues en multitud de aplicaciones existen necesidades de frío siempre. Al igual que el SCOP, el SEER es el parámetro establecido y aceptado por la Unión Europea como estándar de eficiencia energética en refrigeración (Comisión Europea, 2011) y resulta más preciso y realista que el EER al estudiar un periodo de tiempo en lugar de un momento instantáneo de funcionamiento.

La obtención de valores precisos de los coeficientes estacionales en los equipos de climatización es una tarea compleja. Mientras que para obtener los rendimientos instantáneos basta con realizar un balance energético dadas unas determinadas condiciones térmicas interiores y exteriores, para los valores estacionales lo correcto es realizar diversas pruebas con cargas parciales y con diferentes condiciones de funcionamiento.

No obstante, con el fin de simplificar los costosos ensayos y cálculos, la empresa de certificación Eurovent ha establecido para Europa unos factores de ponderación y una fórmula que permite aproximar el ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) de los equipos en distintas condiciones de carga y temperatura del aire y del agua (Marinhas, 2013).

Condi- tions	Load Ratio %	Weighing coefficient	Air temperature at condenser inlet (air cooled chillers)	Water temperature at condenser inlet (water cooled chillers)
A	100	0.03	35	30
B	75	0.33	30	26
C	50	0.41	25	22
D	25	0.23	20	18

Figura 6: Factores y coeficientes para el cálculo del ESEER. Fuente: (Marinhas, 2013)

El ESEER es una fórmula ponderada que permite tener en cuenta la variación del EER en función de la carga del equipo y la variación en la temperatura del aire ambiente o la del agua del condensador.

$$ESEER = A \times EER_A + B \times EER_B + C \times EER_C + D \times EER_D \quad (3)$$

De la definición de los diferentes términos que hacen alusión a los rendimientos de las máquinas de climatización se puede concluir que los coeficientes referidos a condiciones de trabajo puntuales no proporcionan valores realistas ni muy relevantes. Es mucho más efectivo conocer su comportamiento a lo largo del tiempo y bajo diferentes condiciones de trabajo y carga (Herrero Fuerte, 2021).

En el presente documento se lleva a cabo un análisis de la eficiencia energética estacional de equipos de refrigeración, dado que el objetivo del trabajo es un estudio y comparación de condensadores por aire y condensadores adiabáticos los cuales son, en definitiva, componentes esenciales de sistemas de generación de frío. Por tal motivo, se emplean y mencionan en los cálculos principalmente los conceptos de EER y SEER.

El valor del coeficiente de eficiencia energética de los condensadores por aire, adiabáticos o de cualquier otra clase resulta especialmente importante en este trabajo. Esta eficiencia estacional, combinada con el dato del consumo hídrico en las centrales de generación eléctrica permite calcular el consumo de agua por unidad de enfriamiento proporcionada por los equipos.

2.4. Consumo de agua y de electricidad en distintos equipos

Como se ha expuesto en capítulos previos, a la hora de diseñar un sistema de refrigeración existen diversas tecnologías que pueden encajar mejor o peor en función de las necesidades particulares. De todos ellos en este documento se estudian esencialmente los condensadores por aire y los condensadores adiabáticos, pudiendo ambos ser empleados en aplicaciones de generación de agua fría para procesos industriales, climatización de aire en espacios de uso humano o refrigeración de ciclos térmicos, entre otros.

Con la creciente preocupación en relación con los problemas asociados a los combustibles fósiles, las energías renovables se han tenido en especial consideración. Entre otras fuentes como la solar fotovoltaica o la eólica, energías como la solar térmica o la geotérmica se han convertido en el tema central de investigación científica en las últimas décadas. En el caso de estas dos últimas, su operación requiere un sistema de refrigeración al igual que las centrales térmicas convencionales. Estas centrales renovables de nueva construcción habitualmente se topan con una única alternativa disponible: las condensadoras por aire, dado que a menudo se encuentran localizadas en áreas notablemente áridas.

Desafortunadamente y como ya se ha apuntado con anterioridad, el rendimiento de los condensadores por aire es especialmente reducido cuando la temperatura del aire ambiente es elevada, debido a que este tipo de refrigeración solo se apoya en el aire para enfriar el fluido de trabajo. La baja eficiencia de los equipos repercute en el desempeño global de las centrales térmicas en las que se encuentran. Para compensar ese bajo rendimiento de la refrigeración con aire, especialmente durante los periodos más calurosos, la solución más

extendida pasa por la colocación de paneles de enfriamiento evaporativo directo a la entrada de las condensadoras por aire, transformándolas en condensadores adiabáticos. Este recurso permite, en las temporadas más extremas, preenfriar el aire de los sistemas alcanzando una alternativa equilibrada entre los consumos de agua y de electricidad (He et al., 2015).



Figura 7: Relación entre consumos hídrico y eléctrico en los equipos de refrigeración. Fuente: Elaboración propia.

Como puede advertirse a partir de las descripciones de los distintos sistemas, es complicado dar con una fórmula que permita contar con una instalación de refrigeración eficiente en su consumo de energía y que no suponga un gran impacto medioambiental por su gasto de agua en entornos en los que esta es un bien escaso. Es necesario en este tipo de disyuntivas tratar de encontrar un equilibrio que satisfaga todos los requisitos en la medida de lo posible. En la Figura 7 se ha representado de forma cualitativa cómo los distintos equipos presentan una relación inversamente proporcional entre sus consumos de agua y electricidad. Aquellos que no tienen consumo de agua presentan el mayor gasto energético, mientras que los más eficientes energéticamente tienen un mayor gasto de agua.

El trabajo realizado por (Karti & Aldubyan, 2021) refiere en este sentido que el uso de agua para acondicionamiento de aire varía significativamente en función de los equipos de enfriamiento y las condiciones climáticas, además de las aplicaciones. Por ejemplo, el equipamiento de enfriamiento evaporativo puede ser una alternativa eficiente a los sistemas de expansión directa dado que ahorra energía eléctrica con el uso de la evaporación del agua para proporcionar refrigeración. No obstante, sus necesidades hídricas son mayores dado que se debe restituir esa agua evaporada continuamente, además su correcto desempeño depende de la calidad del agua.

En la misma línea, el trabajo de (Zhang et al., 2017) lleva a cabo un exhaustivo estudio de los consumos de agua y energía eléctrica en varios tipos de sistemas de condensación, calculando y comparando sus valores bajo diferentes condiciones de temperatura seca y humedad relativa. Además, se realiza un análisis económico en función de distintos ratios de precio entre agua y electricidad.

El consumo de energía eléctrica en un condensador por aire se debe esencialmente a la potencia de sus ventiladores, la cual depende principalmente del caudal de aire, la diferencia de presiones, el diámetro del ventilador y su rendimiento. Por otra parte, el consumo de energía eléctrica en un condensador adiabático es debido a la potencia de los ventiladores y también a la bomba que recircula el agua por los paneles de relleno. No obstante, el gasto de la bomba de recirculación representa una mínima fracción respecto al de los ventiladores. Este hecho, sumado a que el condensador adiabático necesita un caudal menor de aire para alcanzar el mismo resultado, supone un consumo eléctrico superior en condensadoras por aire.

Finalmente, el agua evaporada en los condensadores adiabáticos se puede hallar a partir de los datos conocidos de flujo de agua recirculada por los paneles de relleno, el caudal de aire que atraviesa los ventiladores y la diferencia de humedades específicas a la entrada y la salida.

Así, fijando diferentes condiciones de humedad relativa y conociendo las características técnicas de una máquina enfriadora, es posible calcular la evolución del consumo de energía eléctrica en función de la temperatura de bulbo seco.

Como ya se ha comentado, dado que el calor específico del aire es muy inferior al del agua, una enfriadora por aire necesita más caudal para cubrir las mismas necesidades de refrigeración que un sistema con preenfriamiento que reduce la temperatura del aire hasta la de bulbo húmedo. Esto conlleva un consumo muy superior en los ventiladores de las condensadoras por aire a costa del mencionado consumo de agua.

Si se pretende seleccionar un equipo atendiendo solo a términos económicos, ese mayor consumo eléctrico puede ser compensado, o no, dependiendo fundamentalmente de los precios del agua y de la electricidad. En el estudio de (Zhang et al., 2017) se recopilan los costes para diferentes ciudades y se calcula un ratio de precios consistente en el cociente del precio del agua por metro cúbico y el de la energía eléctrica por kilovatio hora.

De este modo, un ratio alto supone que el precio del agua respecto al de la electricidad es elevado, por lo que desde el punto de vista económico resultara más conveniente el uso de equipos que no consuman agua directamente (condensadores por aire). Por el contrario, un ratio menor supone que el precio del agua respecto al de la electricidad es reducido, resultando más oportuno minimizar el consumo de electricidad aumentando el de agua (condensadores adiabáticos u otros tipos).

La conclusión a partir del estudio de diversos equipos en varias ciudades con distintas condiciones es que el coste total a lo largo de un año es inferior en condensadores adiabáticos en la mayoría de los escenarios posibles. La excepción en la que el coste total es inferior en condensadores por aire se puede encontrar en tres casos principalmente:

- Emplazamientos en los que el precio del agua es muy alto respecto al de la electricidad (aproximadamente a partir de 10 veces más caro un m³ de agua que un kWh de energía).
- Regiones climáticas con temperaturas bajas durante todo el año, en las que un condensador por aire puede ofrecer rendimientos elevados al no necesitar mover grandes volúmenes de aire.
- Regiones climáticas con humedades relativas altas durante todo el año, en las que el enfriamiento evaporativo pierde eficacia.

3. Metodología

Se va a evaluar la hipótesis de partida en la que se plantea la posibilidad de que los condensadores adiabáticos tengan un consumo global de agua inferior a las condensadoras por aire, al menos en algunos climas.

3.1. Caso de estudio

Para ello se va a plantear un caso de estudio tipo con un edificio de una superficie determinada de 2000 m² y una altura de 4 m., con unas cargas internas de 60,1 W/m² que puede servir como referencia para ser reproducido en cualquier tipo de edificio. Se busca por tanto establecer un procedimiento que se puede adaptar a otros espacios modificando sus características en cuanto a dimensiones, inercias térmicas, cargas internas, etc.

3.2. Climatologías

El caso de estudio se va a llevar a cabo para cada uno de los diferentes climas que se pueden encontrar en el continente europeo. Para ello, en primer lugar, se ha seleccionado un emplazamiento representativo correspondiente a cada región climática según la clasificación de Köppen-Geiger.

Este método, creado y desarrollado en el primer tercio del s. XX, sigue vigente dado que permite comparar de forma empírica distintas regiones alrededor del planeta que comparten características climáticas y por tanto de vegetación, pues ambas están íntimamente relacionadas. Por ello, se mantiene como un sistema muy apropiado para simplificar los complejos gradientes del clima en un esquema sencillo y representativo (Beck et al., 2018).

El sistema de Köppen-Geiger clasifica el clima mundial en cinco grandes clases, divididas a su vez en treinta subtipos que caracterizan cada lugar esencialmente en función de las temperaturas y precipitaciones presentes.

- A (tropical): todos los meses tienen temperatura media superior a 18°C y las precipitaciones son superiores a la evaporación.
- B (seco): las precipitaciones anuales son escasas, inferiores a la evaporación.
- C (templado): las precipitaciones exceden a la evaporación, la temperatura media del mes más frío está entre -3°C y 18°C, y la del más cálido supera los 10°C.
- D (continental): las precipitaciones exceden a la evaporación, la temperatura media del mes más frío es inferior a -3°C y la del más cálido supera los 10°C.
- E (polar): las temperaturas medias no superan los 10°C en ningún mes del año.

En la tabla de la Figura 8 se muestra una relación de los treinta subtipos de clima en los que se pueden encuadrar todas las regiones del planeta. Cada uno de ellos se describe con dos o tres letras que sintetizan su régimen de precipitaciones y temperaturas.

Clasificación de Koppen		Precipitaciones				
		f, m Húmedo	w subhúmedo de invierno seco	s subhúmedo de verano seco	BS Seco Semiárido	BW Seco Árido
Temperaturas	A Tropical		Af: Ecuatorial Am: Monzónico	Aw: Sabana		BSh: Semiárido cálido BWh: Árido cálido
	C Templado	a Subtropical	Cfa, Cfb, Cfc: Oceánicos	Cwa, Cwb, Cwc: Subhúmedos de altitud	Csa, Csb, Csc: Mediterráneos	
		b Templado				
		c Subpolar/subalpino				
	D Continental	a Templado cálido	Dfa, Dfb, Dfc, Dfd: Continentales húmedos	Dwa, Dwb, Dwc, Dwd: Manchurianos	Dsa, Dsb, Dsc, Dsd: Continentales mediterráneos	BSk: Estepario BWk: Árido frío
		b Templado hemiboreal				
		c Subpolar/subalpino				
		d Hipercontinental				
	E Polar	T Tundra	ET: Tundra polar, ETH: Alpino			Gélido o glacial EF
		F Gélido				

Figura 8: Clasificación climática de Koppen-Geiger. Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 9 se ilustra la distribución de subclimas alrededor del mundo. Del mapa se puede destacar que los climas A se encuentran en las regiones más próximas al ecuador, incluyendo la cuenca del Amazonas o la sabana africana. Los climas de tipo B se pueden hallar alrededor de los trópicos, en áreas del mediterráneo y especialmente en desiertos como el Sáhara, la península arábiga y el interior de Australia. En cuanto a los climas de tipo C, se encuentran muy repartidos en todo el planeta en sus zonas templadas, como la costa atlántica de Europa y Norteamérica, el este asiático, gran parte de la Península Ibérica y el interior de Argentina. Los climas clasificados como D, caracterizados especialmente por sus inviernos muy fríos, se dan evidentemente en latitudes altas desde la región de Japón y Corea hasta el norte del continente americano, pasando por todo el centro y norte de Rusia y Europa, donde predomina. Por último, los climas de tipo E se localizan en la Antártida y en los extremos norte de los continentes, destacando Canadá, Groenlandia y Rusia.

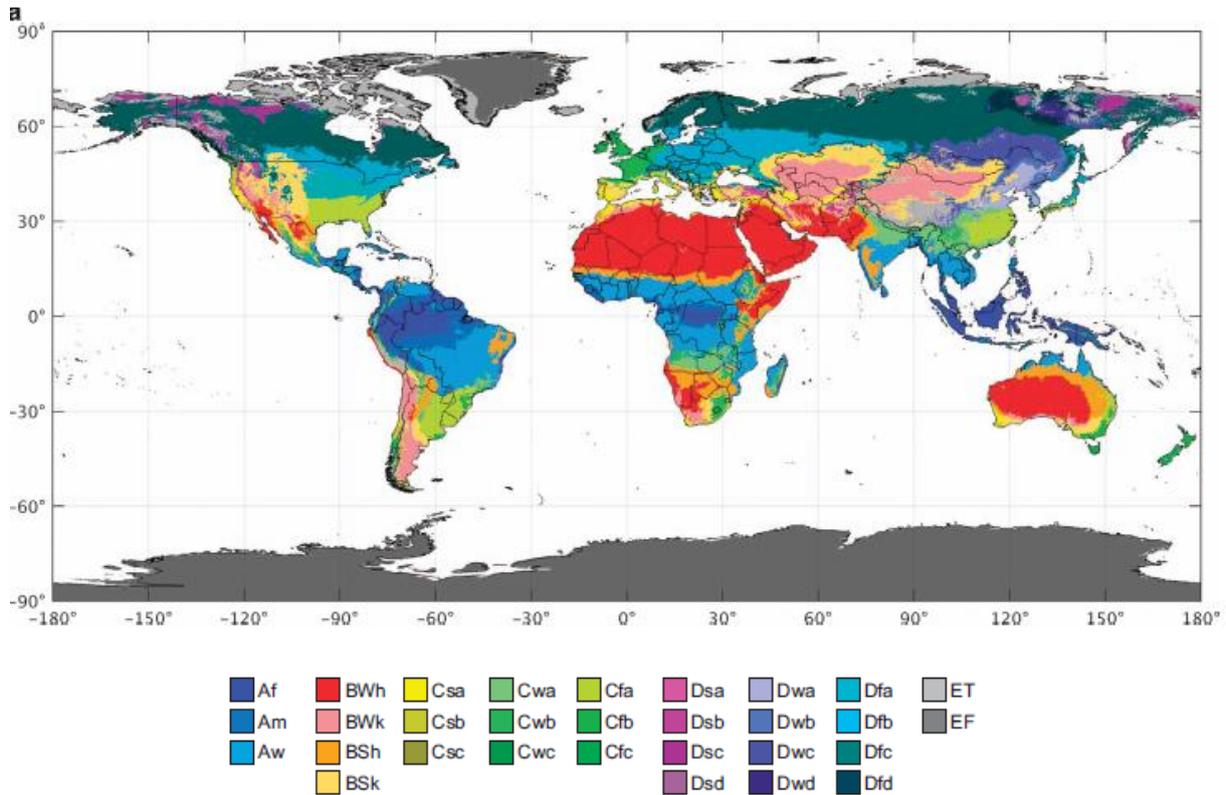


Figura 9: Mapa mundial de la clasificación climática de Koppen-Geiger. Fuente: (Beck et al., 2018)

Una vez recopilados los climas presentes en el continente europeo, se han podido obtener las características meteorológicas de cada uno de ellos a través de la herramienta EnergyPlus, accediendo a los ficheros con su información meteorológica típica anual (TMY).

3.3. Selección de equipos

Con esos ficheros de un año meteorológico típico para cada subclima, y con la ayuda de una herramienta de simulación de uso interno (Sanza Pérez et al., 2017), se ha obtenido la evolución de la demanda térmica de refrigeración para cada hora a lo largo del año en el caso de estudio planteado. Con ella se ha podido seleccionar unos equipos acordes a la demanda máxima. A continuación, conociendo los equipos, ha sido posible hallar su EER tanto por aire como añadiéndoles paneles de preenfriamiento adiabático con datos de los fabricantes y también experimentales, así como su evolución en cada hora del año en función de la temperatura del ambiente presente en los ficheros TMY.

3.4. Cálculo de consumos indirecto y directo

Finalmente, conociendo el EER de las máquinas condensadoras y la demanda térmica de refrigeración para cada hora, se ha hallado la demanda eléctrica empleando la expresión (1) de forma que se puede conocer el consumo de electricidad para cada hora en cada clima según el caso planteado.

Por otra parte, para poder asociar esos consumos de electricidad al consumo de agua que suponen, en primer lugar, ha sido necesario recopilar los mix eléctricos de todos los países que integran el territorio europeo que es objeto de estudio. Al mismo tiempo, se ha investigado en profundidad el consumo de agua que se puede asociar a los distintos tipos de centrales de generación de energía eléctrica, el cual puede ser notablemente variable y dependiente de multitud de factores. Los resultados obtenidos se han cruzado con los mix eléctricos de los países para así calcular un consumo promedio de agua en la generación eléctrica de cada nación.

Una vez se ha propuesto un valor promedio del consumo de agua asociado a la producción de electricidad en cada clase de central, se ha considerado necesario establecer una corrección de dichos valores en función del clima en el que se encuentran las plantas a fin de obtener unos resultados más realistas. Para ello, se ha decidido relacionar el consumo hídrico con la depresión de bulbo húmedo característica del clima predominante en cada país. Así, centrales situadas en países con climas fríos y húmedos presentarán consumos inferiores a los de centrales similares situadas en climas más cálidos y secos en los que la evaporación potencial es mayor.

Una vez realizadas las correcciones consideradas, se ha obtenido un valor final de consumo de agua por unidad de energía eléctrica generada en cada país en función de sus mix eléctricos y climas predominantes.

Contando con el consumo eléctrico requerido a lo largo del año previamente calculado para cada emplazamiento, ha sido posible calcular el consumo de agua indirecto en los equipos debido a dicho consumo eléctrico en cada momento. Para ello se han empleado las expresiones (4) y (5).

$$C_E = \frac{Q_R}{EER} \quad (4)$$

$$C_{WI} = C_E \times C_{WE} \quad (5)$$

Donde

C_E = Consumo eléctrico, kWh

C_{WI} = Consumo de agua indirecto, L

EER = Ratio de eficiencia energética

Q_R = Demanda térmica de refrigeración, kWh

C_{WE} = Consumo de agua por unidad de energía eléctrica generada, L/kWh

En cuanto al consumo directo, para hallarlo es necesario contar en primer lugar con los ficheros de datos de año meteorológico típico (TMY) de cada región climática, de donde se toma la evolución horaria de la temperatura y la humedad ambiental a lo largo del año. El consumo directo de agua solo se da en las unidades con paneles de preenfriamiento.

Con estos datos, y haciendo uso del diagrama psicrométrico, se ha calculado la evolución del flujo de aire desde su entrada al equipo hasta que abandona los paneles, aumentando su humedad específica en una humidificación adiabática de eficiencia estimada 0,9.

Este cálculo de la evolución psicrométrica en las condiciones ambientales registradas en cada hora, unido al dato proporcionado por el fabricante del caudal de aire empleado por el equipo seleccionado, ha permitido realizar el cálculo del consumo de agua directo en cada hora del año (Ecuaciones (6) y (7)).

$$\dot{m} = Q \times \frac{1}{V_{esp}} \quad (6)$$

Donde

\dot{m} = Flujo másico de aire, kg/s

Q = Caudal de aire que atraviesa los ventiladores, m³/s

V_{esp} = Volumen específico del aire húmedo, m³/kg

$$C_{WD} = \dot{m} \times \Delta x \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \quad (7)$$

Donde

C_{WD} = Consumo de agua directo, L

Δx = Diferencia de humedad específica entre la entrada y la salida, g/kg

Finalmente, tras hallar el consumo indirecto asociado a la energía eléctrica empleada por las máquinas y también su consumo directo en el caso de los condensadores adiabáticos, ha sido posible comparar sus magnitudes y obtener los consumos globales.

$$C_W = C_{WI} + C_{WD} \quad (8)$$

Donde

C_W = Consumo de agua global, L

Estos cálculos han sido ejecutados para cada una de las horas del año y para cada uno de los países estudiados a fin de completar un estudio de la evolución anual del consumo en cada emplazamiento y comprobar el impacto del clima tanto en condensadoras por aire como en condensadores adiabáticos.

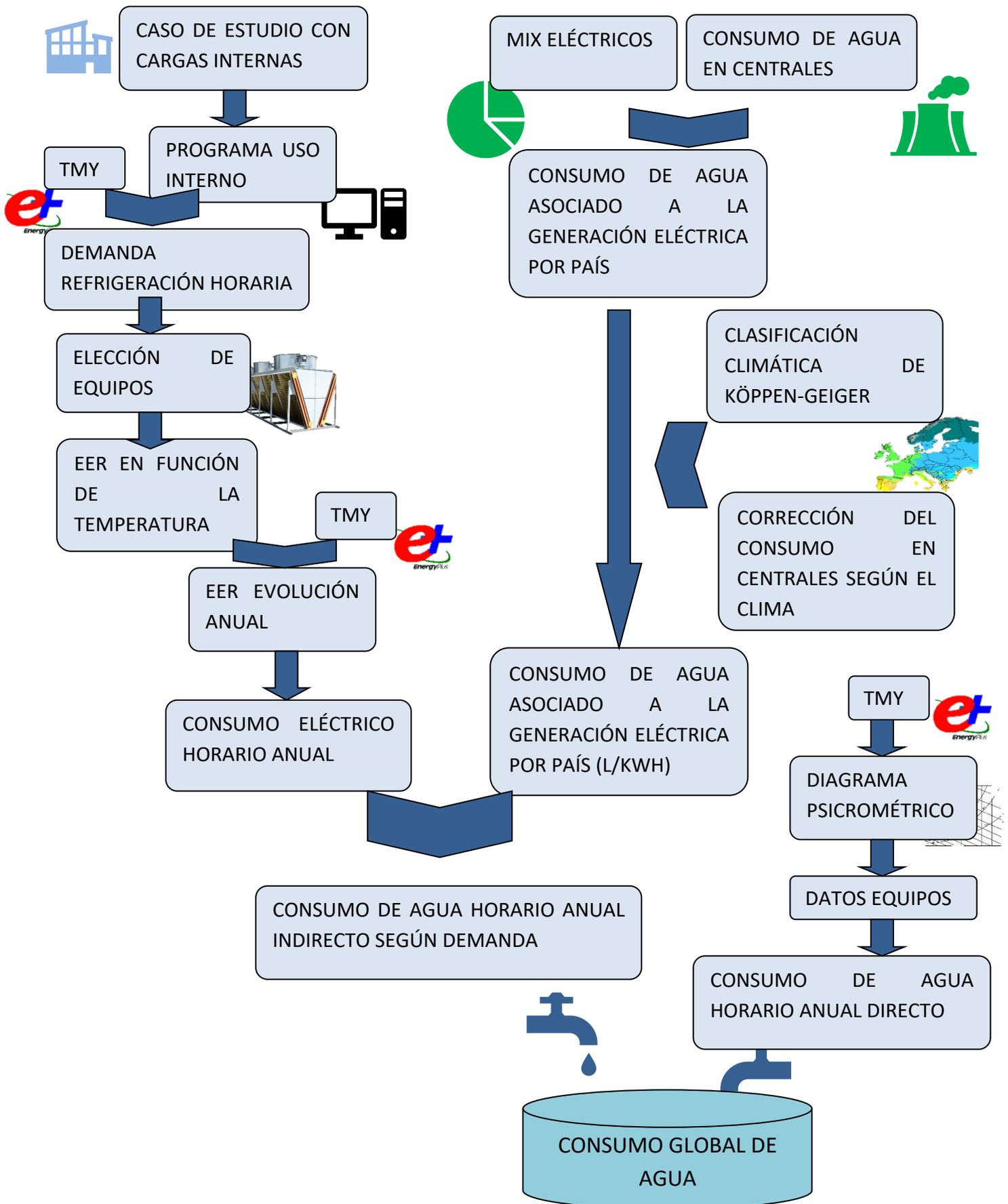


Figura 10: Esquema resumen de la metodología seguida en el desarrollo de este trabajo. Fuente: Elaboración propia.

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

4. Rendimiento y consumo de los equipos enfriadores en función del clima

Resulta incuestionable el hecho de que la eficiencia de un equipo de refrigeración no es constante, sino que está estrechamente ligada a las condiciones ambientales en las que se encuentra instalado. Esto es aplicable a todos los tipos de máquinas, desde condensadoras por aire hasta torres de enfriamiento, por lo que conocer en qué ambiente se hallan es un aspecto esencial a la hora de estudiar sus consumos.

4.1. Climas presentes en Europa

De los treinta subtipos de clima identificados alrededor del mundo, en territorio europeo se pueden identificar aproximadamente la mitad de ellos, dado que climas como los tropicales se encuentran a latitudes inferiores, los manchurianos en el este asiático, y los subhúmedos de altitud en regiones altas cercanas a los trópicos.

En el mapa de la Figura 11 (Beck et al., 2018) se representan los climas existentes en Europa. Si bien se han llegado a reconocer hasta dieciocho de ellos por algunos autores, destacan sobre todos los demás el Dfb, continental húmedo de verano moderado; y el Cfb, oceánico templado. Juntos representan más de la mitad de la superficie europea, fundamentalmente en sus latitudes intermedias.

En el área mediterránea se puede encontrar una variedad muy amplia de climas, desde pequeñas zonas con características desérticas a climas templados con influencia del mar o del océano.

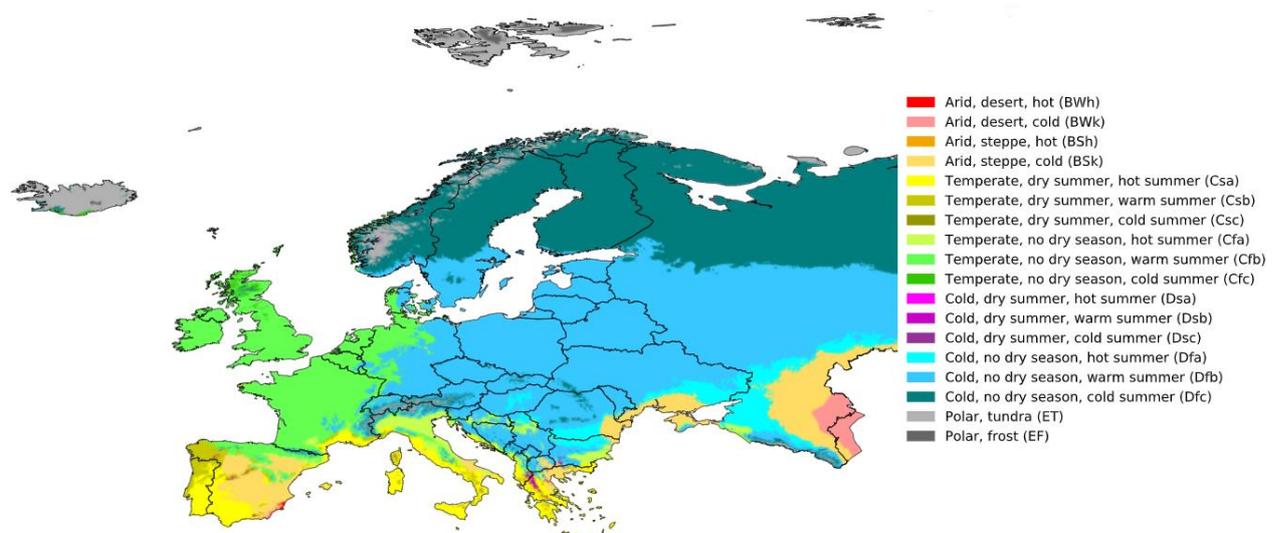


Figura 11: Mapa Köppen-Geiger de Europa entre 1980-2016. Fuente: (Beck et al., 2018)

Una vez observados los climas presentes en Europa, se ha tomado una localidad como referencia de cada uno de ellos para poder obtener sus datos climáticos. En la Tabla 1 se muestra una breve descripción de cada uno de ellos, junto con la localización que los representa en caso de haberla. Algunos se encuentran en gran cantidad de capitales europeas, dado que suponen una gran extensión, mientras que otros como Cfc, Dsc o ET tan solo se pueden hallar en emplazamientos remotos o a gran altitud.

Tabla 1: Denominación y descripción cualitativa de los climas según la clasificación de Koppen-Geiger. Fuente: (Beck et al., 2018)

Clasificación	Denominación	Descripción	Localización en Europa	
Tropical	Af	Ecuatorial	Cálido y lluvioso todo el año.	No
	Am	Monzónico	Cálido con estaciones seca y húmeda	No
	Aw	Tropical de sabana	Cálido todo el año con estación seca	No
Seco	BWh	Árido cálido	Inviernos suaves y veranos cálidos. Muy seco	Las Palmas de Gran Canaria
	BWk	Árido templado y frío	Inviernos muy fríos y veranos cálidos. Muy seco	No
	BSh	Semiárido cálido	Inviernos suaves y veranos cálidos. Lluvia escasa	Nicosia
	BSk	Semiárido templado y frío (estepario)	Inviernos fríos y veranos templados. Lluvia escasa	Zaragoza
Mediterráneo	Csa	Mediterráneo típico	Inviernos templados y veranos secos y cálidos	Lisboa, Roma, Atenas
	Csb	Mediterráneo oceánico	Inviernos lluviosos y veranos suaves y secos	Porto
	Csc	Mediterráneo subalpino	Frío todo el año con veranos secos	No
Oceánico	Cfa	Subtropical húmedo	Veranos cálidos y húmedos, inviernos frescos y lluviosos	Belgrado, Venecia
	Cfb	Oceánico templado	Abundantes precipitaciones. Inviernos fríos y veranos frescos	París, Londres, Bruselas
	Cfc	Oceánico subpolar	Temperaturas bajas, precipitaciones en forma de nieve	Feroe (Dinamarca)
Continental mediterráneo	Dsa	Continental templado cálido	Clima de montaña con veranos cálidos y secos	Ankara

	Dsb	Continental templado hemiboreal	Clima de montaña con veranos moderados	No
	Dsc	Continental subpolar o subártico	Clima de montaña con verano breve y seco	Skjåk (Noruega)
Continental húmedo	Dfa	Continental húmedo de verano cálido	Veranos cálidos y abundantes precipitaciones	Bucarest
	Dfb	Continental húmedo de verano moderado	Veranos suaves, inviernos fríos y precipitaciones abundantes	Varsovia
	Dfc	Subpolar húmedo o siberiano	Veranos cortos y frescos, nieve durante gran parte del año	Tampere (Finlandia)
	Dfd	Hipercontinental húmedo	Inviernos largos y gélidos, veranos cortos y frescos	No
Polar	ET	Tundra polar	Temperaturas frías y precipitaciones escasas	Alpes (Suiza, Austria)
	EF	Glacial	Temperaturas muy frías y precipitaciones escasas	No

Tras haber seleccionado un lugar representativo correspondiente a cada región climática, es posible obtener las características meteorológicas de cada uno de ellos. Con la ayuda de la herramienta EnergyPlus, concebida como un programa de simulación para el cálculo de cargas térmicas y de ventilación de edificios, se adquieren los ficheros IWEC (International Weather for Energy Calculations). Estos ficheros, desarrollados por ASHRAE, cubren más de 3000 localizaciones alrededor del mundo con su información meteorológica típica anual, conocida como TMY. La información incluye un muestreo horario de datos como la temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento, presión atmosférica, etc.

Un año meteorológico tipo, TMY o Typical Meteorological Year, es una recopilación de datos representativos de un lugar específico durante un periodo anual. Sus datos están compuestos por doce meses diferentes, siendo cada uno de ellos el mes más típico de entre el total de los años registrados. Para el cálculo se emplea el “Método Sandia”, un enfoque empírico que selecciona meses separados de diferentes años. Por ejemplo, si se cuenta con una serie de treinta años, se estudian los treinta meses de enero y se selecciona el que cumple las características más típicas de todos ellos, repitiendo el proceso con el resto de los meses. Finalmente, los datos de los doce meses se unen en un mismo fichero en el que se presentan al menos nueve índices: temperatura máxima, mínima y media de bulbo seco y de rocío, velocidad máxima y media del viento, y radiación solar (Ebrahimpour, 2011).

4.2. EER en función de la temperatura de condensación

Una vez conocidos los climas existentes en Europa y su distribución geográfica, y contando con los ficheros que recogen la evolución anual de las condiciones en cada uno de los climas; será posible estudiar los consumos directos asociados a los dispositivos de generación de frío conociendo el rendimiento energético con el que cuentan.

El EER es un parámetro específico de cada equipo, resultante de la relación entre la potencia de refrigeración entregada y la potencia eléctrica consumida para ello. El valor de este parámetro no se puede generalizar para todos los dispositivos, y en función de lo optimizados que se encuentren podrán presentar distintos resultados.

No obstante, es evidente que un aumento de la temperatura ambiente afecta negativamente al rendimiento de cualquier máquina frigorífica, dado que el salto térmico que debe compensar es mayor. Por lo tanto, el valor de EER de cada máquina enfriadora, sea del tipo que sea, no será constante, sino que variará en función de la temperatura de condensación, la cual a su vez depende de las condiciones ambientales en las que se encuentre instalada.

Para poder contar con los datos de eficiencia energética más precisos, se han empleado los resultados obtenidos en estudios realizados en el grupo de investigación de Termotecnia de la UVA aún no publicados. En ellos se analiza el rendimiento real presentado por una condensadora por aire a lo largo de todo un año, en primer lugar sin el uso de paneles adiabáticos y después con ellos, recogiendo en todo momento la evolución de los valores de temperatura ambiente y EER.

De dicho análisis se extraen algunas conclusiones relevantes, como que el EER con paneles de preenfriamiento adiabático puede mejorar en torno a un 25% en los meses más caluroso. Con temperaturas bajas no tienen la misma utilidad, dado que el aire por sí solo ya cuenta con una capacidad de refrigeración aceptable.

Tabla 2: evolución del EER con la temperatura ambiente en una condensadora por aire y una condensadora adiabática.

Tª ambiente (°C)	EER sin preenfriamiento aiabático	EER con preenfriamiento adiabático
1	9,58	9,58
2	9,35	9,35
3	9,13	9,13
4	8,91	8,91
5	8,68	8,69
6	8,45	8,71
7	8,24	8,65
8	8	8,53

9	7,75	8,36
10	7,52	8,25
11	7,31	8,11
12	7,14	7,96
13	6,89	7,79
14	6,74	7,63
15	6,5	7,5
16	6,36	7,37
17	6,19	7,27
18	5,98	7,12
19	5,75	7,01
20	5,66	6,91
21	5,51	6,77
22	5,39	6,66
23	5,32	6,59
24	5,2	6,52
25	5,12	6,48
26	4,98	6,37
27	4,83	6,29
28	4,63	6,21
29	4,49	6,13
30	4,37	5,99
31	4,31	5,95
32	4,11	5,81
33	4,04	5,76
34	3,9	5,71
35	3,62	5,61
36	3,53	5,56

La Tabla 2 se ha obtenido a partir de los resultados obtenidos en estudios realizados en el grupo de investigación de Termotecnia, en los que se recoge la eficiencia de los equipos en función de la temperatura exterior con un tamaño de muestra de más de 35.000 datos recolectados cada 15 minutos a lo largo de un año.

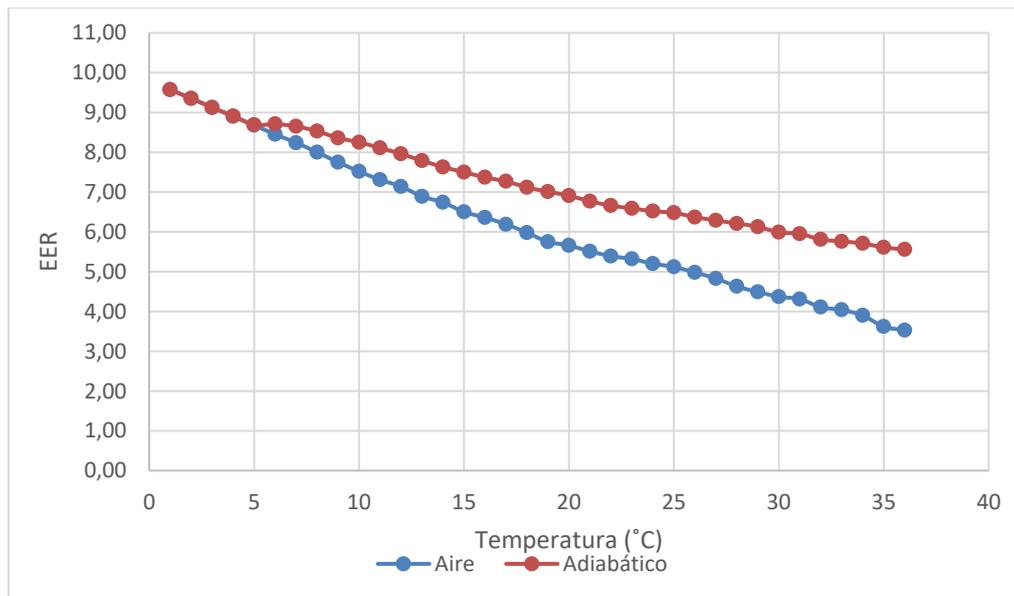


Figura 12: evolución del EER con la temperatura ambiente en una condensadora por aire y una adiabática.

Cuando el ambiente en el que está situada la máquina se encuentra a bajas temperaturas, el EER de los equipos refrigeradores es el mismo. Esto es debido a dos motivos fundamentales: por una parte, el efecto del enfriamiento evaporativo a tales temperaturas es prácticamente nulo (la posible humidificación de una corriente muy fría hasta alcanzar la saturación es reducida). Por otra parte, el uso del enfriamiento evaporativo es innecesario, dado que el aire a tan baja temperatura ya tiene por sí solo la capacidad de refrigeración suficiente para generar agua a 7°C.

A medida que aumentan las temperaturas las diferencias en el ratio de eficiencia energética de la condensadora por aire y su variante con paneles de preenfriamiento adiabático se van haciendo mayores (Figura 12). Con 20°C en el exterior la eficiencia energética del condensador adiabático ya es un 22% superior, y al alcanzar temperaturas ambiente por encima de los 35°C la diferencia a su favor es mayor al 50%.

Contando con los datos de EER en función de la temperatura exterior será posible hallar el consumo eléctrico de los equipos una vez que se conozca la demanda térmica que se desee satisfacer. Una vez obtenido ese consumo eléctrico, para averiguar el consumo de agua indirecto asociado a la generación de energía, será necesario estudiar el consumo hídrico asociado a cada tecnología de generación eléctrica y ponderarlo según el mix energético presente en cada país.

5. Mix eléctricos en Europa

Uno de los objetivos primarios del presente estudio es la recopilación de los mix energéticos que componen el sistema de generación, transporte y distribución eléctrica en el continente europeo. Se trata de un paso necesario para, cuando se conozcan los consumos de agua para cada tipo de central, poder ponderarlos en función de la composición de la red de cada país. De este modo será posible estimar un valor del consumo de agua asociado a la generación eléctrica en cada nación y así hallar el consumo indirecto de los equipos de refrigeración.

Si bien Europa no es un continente excesivamente extenso en relación con los demás, su localización geográfica entre latitudes medias y altas provoca grandes diferencias climáticas entre distintos países. Además, su orografía varía enormemente entre regiones, lo que condiciona las posibles fuentes de generación eléctrica. Esto, unido a una distribución política muy fragmentada con diferentes criterios y capacidades, ha conducido a un desarrollo de las redes eléctricas extremadamente diferentes en cada país.

A grandes rasgos, se pueden agrupar algunos países que guardan similitudes en la composición de sus sistemas de generación de electricidad, ya sea por condiciones geográficas, disponibilidad de recursos o políticas similares.

- Países con predominio de la energía hidroeléctrica: para que el crecimiento de la energía hidráulica sea posible es necesario contar con unas características físicas adecuadas. En primer lugar, han de existir cursos de agua lo suficientemente caudalosos, o bien con grandes diferencias de altura en poco espacio para facilitar el aprovechamiento de la energía potencial. Además, en los lugares donde se cumplan esas condiciones, se debe contar con la posibilidad de inundar grandes superficies de terreno, lo cual no siempre es posible. En Europa los países en los que predomina ampliamente la energía hidroeléctrica son Noruega, Suecia, Austria, Suiza, Islandia, Albania, Montenegro y Luxemburgo. Todos ellos comparten una característica fundamental: son muy montañosos, lo que permite la creación de embalses en sus numerosos cañones y gargantas.

En Europa, la energía hidroeléctrica se desarrolló enormemente en el siglo XX y, salvo contadas excepciones, las naciones con posibilidad de explotación ya han aprovechado sus emplazamientos más idóneos para ello. Por ello, no se prevé un crecimiento significativo de este tipo de centrales en el futuro. No es así en otros lugares en desarrollo como Asia, donde la energía hidráulica aún crece a un gran ritmo.

- Países muy dependientes de recursos fósiles: si bien globalmente Europa es el continente más avanzado en cuanto a la transición hacia energías renovables, aún queda un largo camino por delante hasta que el mix energético europeo no dependa de los combustibles fósiles.
 - Carbón: el combustible fósil más contaminante en cuanto a emisión de CO₂ se encuentra cerca de su desaparición en lugares como España, Francia o Reino Unido, los cuales ya se encuentran inmersos en el desmantelamiento de sus últimas centrales. Sin embargo, otros países como Polonia, República Checa, Serbia, Bosnia y Macedonia mantienen al carbón como el principal combustible en sus centrales generadoras de energía eléctrica.
 - Fuel-oil: el peso relativo en el mix europeo del combustible líquido en la generación energética es muy reducido, pues su encarecimiento en las últimas décadas lo ha relegado a una posición muy poco competitiva. En la actualidad las centrales de fuel-oil se emplean en algunos países para cubrir picos de demanda, y tan solo sigue predominando en lugares remotos como la isla de Chipre (en España, en Canarias, Ceuta y Melilla).
 - Gas Natural: si bien también se trata de un combustible fósil, sus reducidas emisiones de CO₂ respecto al carbón han sido el motivo de un importante crecimiento en el consumo de gas para la generación eléctrica europea en las últimas décadas, hasta el punto de ser la segunda fuente más empleada siguiendo de cerca a la energía nuclear. En países como Italia, Países Bajos, Bielorrusia, Irlanda, Moldavia o Malta el uso de gas supera ampliamente al resto de fuentes de energía, y en muchos otros es la fuente principal, aunque con menores diferencias.
 - Nuclear: el combustible fósil más controvertido y al mismo tiempo el único sin emisiones directas de CO₂, domina los mix eléctricos de Francia, Ucrania y Eslovaquia.
- Países con predominio de las nuevas renovables: hoy en día, tan solo Dinamarca cuenta con una gran generación eólica que le permite estar muy cerca de la independencia energética.
- Países con un mix eléctrico heterogéneo: en el resto del continente europeo se encuentran países con una generación más diversificada. España es un gran ejemplo de ello, contando con grandes centrales de todo tipo y con una evolución que tiende a las renovables. Otros países como Alemania o Turquía, aunque también cuentan con mix variados, aún dependen en gran medida del gas y sobre todo del carbón.

A continuación, se presentan los mix recopilados de todos los países (International Energy Agency, 2022). En primer lugar (Tabla 3) se han recogido sus valores absolutos de generación en teravatios-hora y, a continuación (Tabla 4), se han hallado los valores relativos correspondientes a cada fuente de energía dentro de cada país.

Tabla 3: Composición de los mix eléctricos en Europa para cada país en el año 2020. Fuente: elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)

2020	TERMOELÉCTRICAS (COMB. FÓSILES)					RENOVABLES			
	Producción total eléctrica (TWh)	Carbón (TWh)	Gas natural (TWh)	Fuel-oil (TWh)	Nuclear (TWh)	Hidroeléctrica (TWh)	Eólica (TWh)	Solar FV y Térmica (TWh)	Biomasa y Geotermia (TWh)
Alemania	571,9	148,2	99,5	4,3	64,4	24,9	131,0	50,6	50,8
Francia	524,9	5,0	35,0	0,0	353,8	66,7	40,6	13,1	10,6
Reino Unido	312,8	5,4	114,1	0,9	50,3	6,5	75,6	12,8	39,4
Turquía	305,4	106,1	70,0	0,1	0,0	78,1	24,8	10,8	14,2
Italia	282,7	16,7	136,2	9,7	0,0	46,7	18,7	26,0	25,7
España	255,8	5,6	68,7	10,7	58,2	27,5	53,2	20,8	6,5
Suecia	169,2	1,7	0,1	0,0	53,8	73,3	28,1	1,1	11,0
Polonia	157,8	111,0	16,7	1,4	0,0	2,1	15,7	2,0	7,9
Noruega	154,5	0,2	1,3	0,0	0,0	141,0	9,9	0,1	0,3
Ucrania	149,0	41,2	13,9	0,7	76,2	6,3	3,2	6,2	0,4
Países Bajos	122,4	8,8	72,1	1,3	4,1	0,0	15,3	8,1	8,7
Bélgica	90,4	1,8	26,5	0,0	34,4	1,3	13,0	5,1	6,5
Rep. Checa	81,4	32,6	6,8	0,0	30,0	3,4	0,7	2,2	5,1
Austria	71,7	2,3	9,9	0,7	0,0	45,3	6,8	2,0	4,2
Suiza	70,4	0,0	0,6	0,0	23,0	41,0	0,2	2,6	1,9
Finlandia	68,8	5,4	3,7	0,0	23,5	15,8	8,1	0,3	11,2
Rumanía	56,2	9,5	10,0	0,6	11,5	15,1	7,0	1,7	0,6
Portugal	54,1	4,0	14,4	5,0	0,0	12,4	12,4	1,7	4,0
Grecia	45,9	5,9	18,0	4,6	0,0	3,4	9,3	4,3	0,4
Bulgaria	40,9	13,5	2,3	0,3	16,6	3,0	1,5	1,5	2,0
Serbia	38,0	26,5	0,6	0,0	0,0	9,7	1,0	0,0	0,2
Bielorrusia	37,8	0,0	34,5	2,1	0,0	0,4	0,2	0,2	0,4
Hungría	34,6	3,8	9,1	0,0	16,1	0,2	0,6	2,4	2,1
Irlanda	32,5	1,6	16,2	0,4	0,0	1,2	11,6	0,0	0,9
Eslovaquia	28,4	2,1	3,6	0,4	15,2	4,5	0,0	0,7	1,6
Dinamarca	28,1	3,0	1,2	0,0	0,0	0,0	16,4	1,2	6,3
Islandia	19,3	0,0	0,0	0,0	0,0	13,2	0,0	0,0	6,0
Eslovenia	17,1	4,4	0,6	0,0	6,4	5,2	0,0	0,3	0,2
Bosnia y Herzegovina	16,2	11,4	0,0	0,0	0,0	4,5	0,3	0,0	0,0
Croacia	13,4	1,2	3,4	0,0	0,0	5,7	1,7	0,1	1,1
Estonia	6,4	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,1	1,4
Moldavia	6,2	0,0	5,8	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0
Letonia	5,7	0,0	2,1	0,0	0,0	2,6	0,2	0,0	0,9
Albania	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	0,0	0,1	0,0
Macedonia del norte	5,3	2,6	1,1	0,1	0,0	1,3	0,1	0,0	0,1
Chipre	4,9	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,2	0,3	0,1
Lituania	4,8	0,0	1,7	0,0	0,0	1,0	1,5	0,1	0,5
Montenegro	3,4	1,5	0,0	0,0	0,0	1,6	0,3	0,0	0,0
Luxemburgo	2,3	0,0	0,2	0,0	0,0	1,1	0,3	0,2	0,4
Malta	2,1	0,0	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
Total Europa	3898,2	585,9	801,7	47,6	837,5	671,6	510,4	178,9	233,6

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

Tabla 4: Composición relativa de los mix eléctricos en Europa para cada país en el año 2020. Fuente: elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)

2020	Producción total eléctrica (TWh)	TERMOELÉCTRICAS (COMB. FÓSILES)				RENOVABLES			
		Carbón (TWh)	Gas natural (TWh)	Fuel-oil (TWh)	Nuclear (TWh)	Hidroeléctrica (TWh)	Eólica (TWh)	Solar FV y térmica (TWh)	Biomasa y Geotermia (TWh)
Alemania	571,9	26%	17%	1%	11%	4%	23%	9%	9%
Francia	524,9	1%	7%	0%	67%	13%	8%	2%	2%
Reino Unido	312,8	2%	36%	0%	16%	2%	24%	4%	13%
Turquía	305,4	35%	23%	0%	0%	26%	8%	4%	5%
Italia	282,7	6%	48%	3%	0%	17%	7%	9%	9%
España	255,8	2%	27%	4%	23%	11%	21%	8%	3%
Suecia	169,2	1%	0%	0%	32%	43%	17%	1%	7%
Polonia	157,8	70%	11%	1%	0%	1%	10%	1%	5%
Noruega	154,5	0%	1%	0%	0%	91%	6%	0%	0%
Ucrania	149,0	28%	9%	0%	51%	4%	2%	4%	0%
Países Bajos	122,4	7%	59%	1%	3%	0%	13%	7%	7%
Bélgica	90,4	2%	29%	0%	38%	1%	14%	6%	7%
Rep. Checa	81,4	40%	8%	0%	37%	4%	1%	3%	6%
Austria	71,7	3%	14%	1%	0%	63%	9%	3%	6%
Suiza	70,4	0%	1%	0%	33%	58%	0%	4%	3%
Finlandia	68,8	8%	5%	0%	34%	23%	12%	0%	16%
Rumanía	56,2	17%	18%	1%	20%	27%	12%	3%	1%
Portugal	54,1	7%	27%	9%	0%	23%	23%	3%	7%
Grecia	45,9	13%	39%	10%	0%	7%	20%	9%	1%
Bulgaria	40,9	33%	6%	1%	41%	7%	4%	4%	5%
Serbia	38,0	70%	2%	0%	0%	26%	3%	0%	1%
Bielorrusia	37,8	0%	91%	6%	0%	1%	1%	1%	1%
Hungría	34,6	11%	26%	0%	47%	1%	2%	7%	6%
Irlanda	32,5	5%	50%	1%	0%	4%	36%	0%	3%
Eslovaquia	28,4	7%	13%	1%	53%	16%	0%	2%	6%
Dinamarca	28,1	11%	4%	0%	0%	0%	58%	4%	22%
Islandia	19,3	0%	0%	0%	0%	68%	0%	0%	31%
Eslovenia	17,1	26%	4%	0%	37%	30%	0%	2%	1%
Bosnia y Herzegovina	16,2	70%	0%	0%	0%	28%	2%	0%	0%
Croacia	13,4	9%	25%	0%	0%	42%	13%	1%	8%
Estonia	6,4	46%	0%	0%	0%	0%	13%	2%	22%
Moldavia	6,2	0%	94%	0%	0%	5%	2%	0%	0%
Letonia	5,7	0%	37%	0%	0%	45%	3%	0%	16%
Albania	5,4	0%	0%	0%	0%	98%	0%	2%	0%
Macedonia del norte	5,3	49%	21%	2%	0%	24%	2%	0%	2%
Chipre	4,9	0%	0%	86%	0%	0%	4%	6%	2%
Lituania	4,8	0%	35%	0%	0%	21%	31%	2%	10%
Montenegro	3,4	44%	0%	0%	0%	47%	9%	0%	0%
Luxemburgo	2,3	0%	9%	0%	0%	48%	13%	9%	18%
Malta	2,1	0%	86%	5%	0%	0%	0%	10%	0%
Total Europa	3898,2	15%	21%	1%	21%	17%	13%	5%	6%

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

Una vez hallado el mix eléctrico presente en cada país, tan solo será necesario estudiar el consumo de agua asociado a cada tipo de central. De ese modo ya será posible calcular un valor de consumo de agua por unidad de energía eléctrica generada (L/kWh) en cada país.

5.1. Mix energético de Europa

Con el fin de mostrar una imagen representativa del estado actual del sistema de generación eléctrica en el continente, se presenta a continuación el resumen de la producción de electricidad en el año 2020. Se puede observar en la Figura 13 que los combustibles fósiles continúan siendo fundamentales, con un predominio del gas natural y la energía nuclear, pero aún con un peso significativo del carbón. Por otra parte, energías como la eólica o la solar fotovoltaica se abren paso paulatinamente.

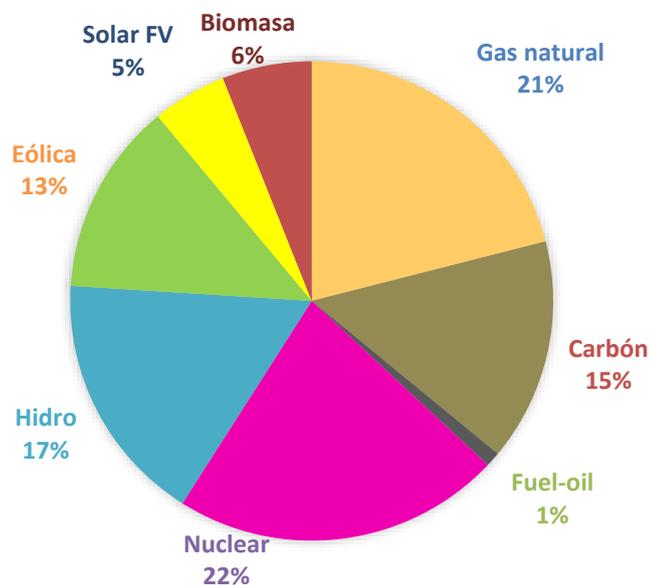


Figura 13: Mix eléctrico en Europa en 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)

5.2. Mix energético de España

De igual forma, se presenta en la Figura 14 una gráfica de sectores que resume la producción eléctrica en España en el año 2020. En este caso los combustibles fósiles también continúan teniendo una porción muy importante de la generación, aunque el carbón se encuentra prácticamente desaparecido. Las tres fuentes principales son el gas natural, el uranio y la energía eólica, siendo esta última la que cuenta con una mayor tendencia a crecer y establecerse como la mayor fuente próximamente. Por otra parte, el futuro de las centrales nucleares es incierto, y el fuel-oil también está abocado a la desaparición, ligado al desarrollo de plantas solares y eólicas en las islas.

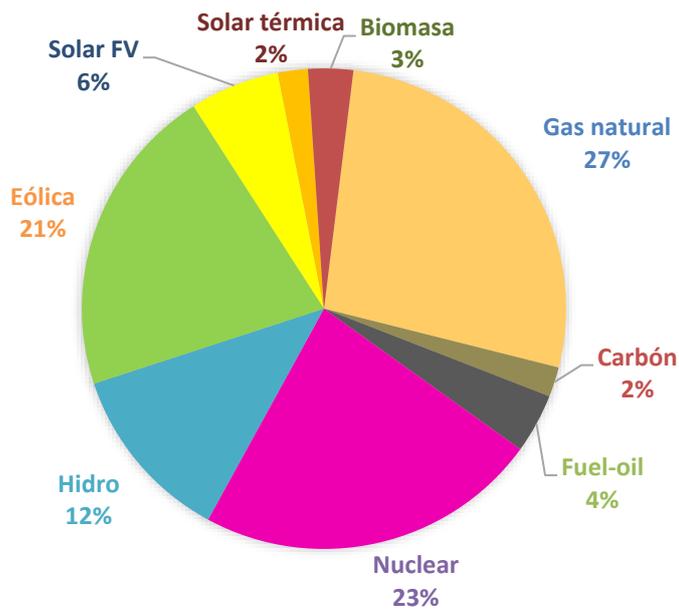


Figura 14: Mix eléctrico en España en 2020. Fuente: Elaboración propia a partir de (International Energy Agency, 2022)

6. Consumo de agua asociado a la producción de electricidad

El agua y la energía eléctrica son dos recursos fuertemente entrelazados y que escasean en gran parte del mundo en vías de desarrollo. De hecho, más del 40% del agua extraída del medio ambiente en el mundo está asociada a la generación de energía, incluyendo en gran medida la generación termoeléctrica (Karti & Aldubyan, 2021).

Tanto el agua como la energía son dos bienes fundamentales y críticos para el desarrollo de la vida, y cada uno de ellos no puede resultar accesible al ser humano sin ayuda del otro. Sin agua es imposible la existencia de vida, y sin energía, especialmente eléctrica, resulta inviable avanzar para las comunidades en aspectos tan básicos como la movilidad, el confort doméstico, la producción de alimentos y otros bienes de primera necesidad, e incluso el tratamiento del propio agua para asegurar la seguridad de su consumo y abastecimiento.

Por ello, resulta fundamental para la sociedad en la búsqueda del máximo desarrollo garantizar un suministro suficiente y estable tanto de agua como de energía. No es casual que las regiones del planeta con mayor escasez de agua hayan resultado históricamente las que han sufrido mayores dificultades para el progreso.

Diversos estudios han constatado que la tendencia global del planeta se encamina a un progresivo aumento de las temperaturas medias acompañado de la desertificación de territorios que hasta ahora no han sufrido especial escasez de agua. En consecuencia, resulta vital buscar la mayor eficiencia en el uso de los recursos hídricos, así como en el consumo de energía, ya que ambos están ligados.

En este capítulo se presenta el consumo de agua asociado a las tecnologías de generación de energía eléctrica más extendidas en el continente europeo, incluyendo los distintos tipos de centrales termoeléctricas, hidroeléctricas, eólicas, solares fotovoltaicas y de biocombustibles. Si bien existen algunos tipos de tecnologías no incluidas, su empleo resulta marginal frente a las principales.

6.1. Centrales termoeléctricas

Las centrales termoeléctricas son instalaciones, generalmente de grandes dimensiones, en las que se transforma energía térmica en eléctrica. Dicha energía térmica puede obtenerse a partir de muy diversas fuentes primarias, tales como el carbón, el uranio, el gas natural o derivados del petróleo. Al consumir estos combustibles se emite una gran cantidad de calor, la cual es empleada para mover una o varias turbinas solidarias a generadores eléctricos completando un ciclo Rankine o un ciclo combinado.

Una vez que se ha extraído la energía, es necesario refrigerar el sistema y desprenderse del calor residual que ya no se va a poder aprovechar. En ese punto entra como protagonista el agua, fluido utilizado para la refrigeración de los ciclos de vapor o combinados gas-vapor. La refrigeración de las centrales de generación termoeléctrica se puede realizar mediante dos métodos diferentes (Figura 15):

- **Circuito abierto**, “once through” o “un solo paso”: el agua atraviesa la instalación una sola vez y a continuación se devuelve al entorno. La refrigeración en circuito abierto extrae agua de un río, océano, embalse, etc. cercano a la planta, lo hace pasar por un intercambiador de calor (habitualmente un condensador enfriado por agua) y devuelve el agua al medio a una temperatura superior. Aunque en el proceso de intercambio de calor no se consume una gran cantidad de agua, el incremento de temperatura en el agua de salida provoca un incremento de evaporación en el medio al que se retorna.
- **Circuito cerrado**, “closed loop” o “lazo cerrado”: el agua se recircula por la instalación. En el caso de los sistemas de refrigeración de circuito cerrado, estos habitualmente emplean enfriamiento evaporativo en una torre de enfriamiento para transmitir el calor sobrante a la atmósfera de modo que se mantenga constante la temperatura del circuito cerrado de agua. El consumo de agua total es el que se evapora en las torres más las pérdidas por gotitas no evaporadas que son arrastradas por la corriente ascendente evaporada.

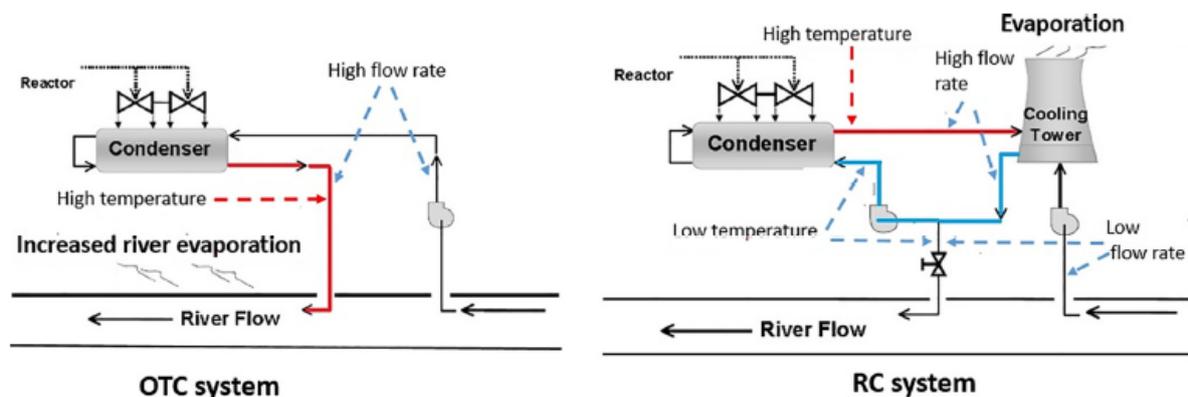


Figura 15: Esquema de funcionamiento de los sistemas de refrigeración por circuito abierto y circuito cerrado con recirculación. Fuente: (Gosse & Samie, 2020)

Ambos sistemas captan y consumen agua, pero no todo el agua captada es consumida. Mientras que la refrigeración en circuito abierto capta más agua, el enfriamiento en circuito cerrado extrae menos agua y consume más. Los sistemas de un solo paso normalmente consumen en torno a un 4% del agua empleada, mientras los de circuito cerrado consumen un 80% del agua captada. Aunque estos últimos consumen más agua, actualmente son más

recomendables por tener un impacto ambiental más reducido. Esto se debe a las menores masas de agua retiradas y, especialmente, al nulo impacto sobre la temperatura del agua del entorno (Cooperman et al., 2012).

Históricamente, la tecnología de enfriamiento más común en todo el mundo fue la de circuito abierto, extrayendo grandes volúmenes de agua que se emplean tan solo una vez en el intercambiador de calor para condensar el agua de proceso. Dado que este sistema requiere contar con la disponibilidad de enormes cantidades de agua y puede afectar negativamente a los ecosistemas acuáticos al elevar su temperatura, las centrales más modernas habitualmente emplean enfriamiento de circuito cerrado con recirculación, ya sea en forma de torres o de estanques de enfriamiento.

Por tanto, la tasa de extracción y el consumo dependen en gran medida de la tecnología de enfriamiento. Pero no solo varían en función de ese parámetro; el tipo de calderas empleadas en una central eléctrica (con condiciones de trabajo subcríticas, supercríticas e incluso ultra-supercríticas) afecta directamente al rendimiento de la central y por tanto también al impacto hídrico (Stillwell et al., 2013).

Además, aunque en menor medida de lo que se pudiera suponer, otro de los factores que afectan a la extracción y consumo de agua es el tipo de combustible empleado, que esencialmente se puede reducir a carbón, gas y nuclear. El funcionamiento de una central térmica es básicamente el mismo una vez que se ha empleado el combustible para obtener su calor. Sin embargo, las centrales nucleares a menudo cuentan con una eficiencia térmica ligeramente inferior que sus homólogas de carbón o de gas. Esto es debido a que las plantas de carbón y gas funcionan mediante la combustión de dichos elementos, lo que conlleva que se disipe parte del calor de la combustión a través de las chimeneas. Dado que las centrales nucleares funcionan mediante la fisión del combustible, todo el calor residual ha de ser eliminado transmitiéndolo al agua de refrigeración, conduciendo a unas necesidades superiores de enfriamiento.

Por último, resulta evidente que las necesidades de agua de refrigeración no son las mismas en función de la región climática en que se encuentren las centrales. A medida que la temperatura ambiente es superior, el requerimiento es también mayor. De igual modo, con una humedad relativa mayor en el ambiente, el enfriamiento evaporativo ve reducida su efectividad.

Uno de los posibles métodos para la estimación del consumo de agua en centrales termoeléctricas es el planteado por (Pistochini & Modera, 2011), quienes estudiaron varias fuentes con datos relativos a Norteamérica. En el citado trabajo se sugiere un cálculo en base al agua extraída en cada planta, con un coeficiente de pérdida de agua por evaporación en función de la tecnología de enfriamiento del agua de la central.

Sin embargo, no existe un consenso científico acerca de la metodología más adecuada para obtener los datos de consumo de agua en los distintos tipos de centrales. Si bien resulta

posible acceder a distintas estimaciones en cada una de las tecnologías de generación eléctrica, los datos recabados por unos y otros autores difieren significativamente.

En el caso del mercado eléctrico estadounidense se han llevado a cabo varios análisis del sistema que arrojan resultados razonables (Krarti & Aldubyan, 2021; Macknick et al., 2012; Stillwell et al., 2013). En cambio, para el mercado europeo resulta complicado obtener información válida. Las escasas fuentes existentes presentan datos inconsistentes e incluso contradictorios acerca de las cantidades de agua necesarias, además de no especificar los procedimientos empleados para calcular dichos valores (Sesma & Rubio-Varas, 2019).

A causa de los motivos citados, se han empleado como referencia varios artículos de investigación desarrollados con información del territorio estadounidense. Si bien no se comparten las características exactas de Europa, sí se pueden asemejar en cuanto a las tecnologías empleadas en las plantas eléctricas, así como en los climas predominantes de cada una de las regiones.

Dado que la energía eléctrica obtenida a partir de centrales termoeléctricas representa cerca del 60% del total generado en el continente europeo, resulta indispensable tener en cuenta su operación y tratar de optimizar su funcionamiento con el objetivo de consumir la menor cantidad de agua posible, pues su influencia sobre el consumo total es muy significativa. A continuación, se desagregan las centrales termoeléctricas en función de su combustible.

6.1.1. Centrales de carbón

Las primeras centrales térmicas convencionales que se desarrollaron alrededor del mundo son las que emplean carbón como combustible, pues resultan relativamente económicas y su tecnología es más sencilla que otras aparecidas más adelante. En ellas habitualmente se pulveriza el carbón para, a continuación, quemarlo y calentar vapor que mueva las turbinas solidarias a los generadores.

El carácter altamente contaminante de este tipo de centrales, con unas desmesuradas emisiones de gases de efecto invernadero, han conducido al desarrollo de legislaciones muy restrictivas en Europa y Norteamérica, de modo que en los últimos años no se han creado nuevas plantas y las existentes se están desmantelando paulatinamente. No obstante, en países en desarrollo como China aún se sigue generando energía eléctrica masivamente a partir del carbón, y este sigue siendo la mayor fuente de producción de electricidad a nivel mundial.

En cuanto al consumo de agua necesario para su operación, el factor que más afecta a los valores estimados es el tipo de refrigeración de la planta, que esencialmente será de circuito abierto o circuito cerrado.

Según los estudios conducidos por (Torcellini et al., 2003) tras analizar datos de las tres áreas energéticas estadounidenses (Oeste, Este y Texas) el consumo medio se encuentra en torno

a los 1,8 L/kWh. El metaanálisis de (Jin et al., 2019) para centrales de carbón alrededor de todo el planeta ofrece un resultado de 2,3 L/kWh. Por último, la investigación de (Macknick et al., 2012) que también a su vez bebe de varias fuentes, hace énfasis en la diferencia entre circuito abierto, con un gasto de aproximadamente 0,95 L/kWh, y circuito cerrado, con 2,6 L/kWh.

6.1.2. Centrales de ciclo combinado

La tecnología de las centrales de ciclo combinado es significativamente más compleja que la de las centrales térmicas convencionales de carbón o fueloil, y se desarrolló como una mejora sobre la base de estas últimas. En ellas coexisten dos ciclos termodinámicos: un ciclo Brayton a alta temperatura que emplea gas como combustible y otro ciclo Rankine a menor temperatura con vapor de agua que aprovecha el calor del primer ciclo.

Gracias a su forma de operar se recupera gran parte del calor de la combustión del gas, lo que se refleja en un rendimiento claramente superior al de las centrales de ciclo único. Esta ventaja, sumada a las menores emisiones contaminantes del gas frente al carbón, ha favorecido que en Europa se hayan sustituido progresivamente plantas convencionales por otras de ciclo combinado.

La mayor eficiencia de estas centrales conlleva por tanto una mayor generación eléctrica dada una cantidad de energía térmica liberada, lo que supone un consumo de agua de refrigeración mucho menor por unidad energía eléctrica generada.

Los análisis llevados a cabo sobre este tipo de plantas termoeléctricas reflejan ese menor consumo de agua por kWh de electricidad. Según el metaanálisis de (Jin et al., 2019) para centrales de ciclo combinado alrededor de todo el mundo, presentan un valor de unos 0,85 L/kWh. (Macknick et al., 2012) expone valores comprendidos entre 0,4 L/kWh y 0,95 L/kWh en función del tipo de refrigeración en circuito abierto o cerrado, respectivamente. (Stillwell et al., 2013) ofrece un rango similar, entre 0,4 L/kWh y 0,7 L/kWh.

Estos datos demuestran un impacto medioambiental muy inferior de las centrales de ciclo combinado frente a las convencionales, no solo por las emisiones contaminantes, sino también por consumo de agua. Además, estas plantas son más flexibles en términos de carga y a la hora de proyectar su construcción necesitan una menor superficie por MW instalado sobre el terreno.

6.1.3. Centrales nucleares

Durante la segunda mitad del siglo XX, Europa experimentó un gran crecimiento al establecerse finalmente un periodo libre de conflictos bélicos que permitió el desarrollo de

la industria y la sociedad. Esto vino acompañado de un incremento de la demanda eléctrica que ya no podía satisfacerse tan solo con las centrales de carbón existentes.

En este contexto se comienzan a desarrollar las centrales nucleares, gracias a la tecnología de fisión nuclear investigada pocos años antes. El ciclo termodinámico de una central nuclear funciona de forma muy similar al de las centrales convencionales de carbón. La diferencia radica en el modo de obtener la energía térmica para calentar el vapor. El uranio contenido en la vasija del reactor se bombardea con neutrones, provocando una reacción de fisión en cadena que libera gran cantidad de calor.

En cuanto al agua para la refrigeración de estas centrales, su consumo es superior al de las de ciclo combinado dado que su rendimiento es considerablemente menor. Además, las nucleares necesitan más agua que el resto porque, a diferencia de las que emplean carbón o gas natural, no pueden deshacerse de parte del calor residual a través de las chimeneas hacia la atmósfera. Si bien esto resulta en un mayor desecho de calor hacia el agua fluvial, globalmente es algo positivo porque significa que las centrales nucleares no emiten gases contaminantes (Webber, 2018).

Tal y como describe (Foro Nuclear, 2016), la necesidad de agua de refrigeración exterior viene determinada por la energía térmica que se pierde en el ciclo de vapor (entre 1,25 y 2 kWh térmicos por cada kWh de electricidad que se obtiene). Esto es también aplicable las centrales convencionales, y significa que, si una central común genera unos 1000 MWh, estará transfiriendo constantemente al agua fluvial la extraordinaria cifra de 2000 MWh.

En el caso de las centrales nucleares presentes en España, su consumo para refrigeración es de 2,41 L/kWh en Almaraz I y II (CNAT, 2018), 2,54 L/kWh en Ascó I y II, 2,64 L/kWh en Cofrentes y 2,65 L/kWh en Trillo (Sesma & Rubio-Varas, 2019), pudiéndose obtener una media de unos 2,55 L/kWh.

Francia es el país más significativo en cuanto a uso de energía nuclear en Europa, dado que con sus 58 reactores operativos cubre dos tercios de su demanda eléctrica. Afortunadamente en este caso sí que existe un mayor desarrollo de literatura científica que ha estudiado dichos reactores y sus consumos. El artículo publicado por (Gosse & Samie, 2020) analiza las centrales presentes en el curso del río Ródano concluyendo para las centrales con refrigeración de circuito abierto un reducido consumo, en torno a 0,7 L/kWh, mientras que para las centrales con refrigeración de circuito cerrado se obtiene el valor de 2,3 L/kWh. El escaso gasto observado en circuito abierto se debe a dos causas fundamentales: el breve periodo de retención del agua en las instalaciones y la gran profundidad del río, factores que ralentizan y minimizan la evaporación.

Otros estudios estadounidenses cifran el consumo entre 1,5 L/kWh y 2,7 L/kWh según el sistema de refrigeración (Stillwell et al., 2013), entre 1,1 L/kWh y 2,5 L/kWh (Macknick et al., 2012), y en 2,3 L/kWh globalmente (Jin et al., 2019).

6.2. Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas producen electricidad de un modo similar a las plantas térmicas convencionales, pues si bien la fuente de energía primaria y el proceso son muy distintos, finalmente obtienen la energía eléctrica al poner en funcionamiento una o varias turbinas solidarias a un generador.

En el caso de la energía hidroeléctrica, a diferencia de las termoeléctricas en las que se transforma térmica en electricidad, las plantas hacen uso de la energía potencial almacenando el agua a gran altura respecto a las turbinas.

Esta fuente de generación de electricidad no necesita consumir agua para la refrigeración dado que las turbinas no se mueven a partir de ninguna combustión o fisión. Sin embargo, el masivo aumento de la superficie del agua embalsada respecto al agua corriente sin presas resulta en una evaporación muy superior a la que se daría en condiciones normales.

La cuantificación de esas pérdidas en procesos de evaporación de la lámina de agua embalsada se ha estudiado en cualquier caso de forma marginal. Se trata de una cuestión poco referida en la literatura científica, especialmente en lo referente al territorio europeo. Por lo general, se considera que se trata de una pérdida de muy compleja cuantificación, y dado que en algunos casos se puede compensar por otras aportaciones, como la lluvia sobre la lámina de agua, no se le ha dado excesiva importancia (López Moreno, 2008).

Los embalses y sus presas son proyectados y construidos con el objetivo de aportar beneficios muy variados. Estos incluyen evidentemente la generación de energía eléctrica, pero también el control de inundaciones, el almacenamiento de agua para el consumo directo humano, el almacenamiento para regadío, usos recreativos, etc.

Algunos embalses se emplean exclusivamente para producir energía, sin embargo, la mayoría de ellos proporcionan varias de esas funciones. Por consiguiente, resulta muy complejo desagregar a un nivel nacional e incluso internacional los usos de cada una de las presas con el objetivo de asociar a la generación eléctrica la tasa de evaporación que le corresponde (Torcellini et al., 2003). El hecho de que los embalses generalmente tengan diversas funciones puede causar que los cálculos resulten en valores sobreestimados (Pistochini & Modera, 2011). Una correcta cuantificación de la evaporación es crucial para el resultado final respecto a todo el mix eléctrico, pues la hidroeléctrica supone el mayor consumo respecto a otras fuentes.

En el caso de (Pistochini & Modera, 2011) el consumo en centrales hidroeléctricas se basa en un mapa de evaporación por superficie desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología de Estados Unidos. En él se señala que el consumo de agua en la generación eléctrica difiere de forma significativa entre territorios, fundamentalmente según el peso relativo de la energía hidroeléctrica en los mix eléctricos.

Algunos trabajos realizados en las últimas décadas apuntan que la evaporación en la superficie de un embalse supone una pérdida muy considerable, alcanzando en el caso de la Península Ibérica cerca del 6% de los recursos hídricos disponibles y representando un tercio del consumo urbano total (López Moreno, 2008). Este estudio, llevado a cabo sobre 7 embalses situados en la cuenca pirenaica del Ebro, concluye que la evaporación a lo largo del año se encuentra entre el 3,1% y el 5,6% del volumen de agua embalsada en cada uno de ellos. Como consecuencia del cambio climático, estas cifras tenderán a aumentar inevitablemente.

Un método para el cálculo de la evaporación por unidad de superficie puede ser mediante el uso de la ecuación de Penman para láminas de agua, Ecuación (9), la cual permite hallar un valor de evapotranspiración por unidad de superficie conocidos los datos de radiación neta (R_n), calor latente de vaporización(λ), una componente aerodinámica (E_a), la pendiente de la curva(Δ), presión de vapor y una constante psicrométrica (γ).

$$E_o = \frac{R_n / \left(\lambda \frac{\Delta}{\gamma} + E_a \right)}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (9)$$

A su vez, la componente aerodinámica E_a se puede con el uso de una nueva ecuación de Penman, Ecuación (10), conocidos los datos de velocidad del viento (U), saturación media de la presión de vapor (e_a) y presión de vapor actual (e_d).

$$E_a = 0,35 \left(0,5 + \frac{0,621375 * U}{100} \right) * 7,500638 * (e_a - e_d) \quad (10)$$

Para poder llevar a cabo el cálculo según la ecuación de Penman es indispensable por tanto contar con información térmica, una aproximación de la radiación solar incidente sobre el terreno, la humedad relativa y la velocidad del viento. Una radiación mayor y corrientes de viento mayores implican tasas de evaporación superiores, mientras que la humedad relativa es inversamente proporcional a la evaporación.

Otro aspecto relevante a valorar y que tiene un elevado impacto directo sobre la evaporación es la variabilidad de la superficie inundada a lo largo del año. Los embalses pierden una mayor cantidad de agua al encontrarse más llenos, pues la superficie de la lámina es superior (López Moreno, 2008). En esta misma línea conviene considerar que no

se comportará del mismo modo un embalse con una elevada profundidad media que otro con la misma capacidad, pero con menor profundidad media.

Con todas las variables anteriores expuestas, se corrobora que resulta extremadamente complejo establecer unos valores genéricos que representen a la mayoría de las centrales hidroeléctricas del continente europeo, pues sus características implican que habrá diferencias de incluso varios órdenes de magnitud entre distintas centrales.

Sobre la base planteada, algunas estimaciones del incremento de evaporación en la superficie del agua embalsada proporcionan un valor final de 68 L/kWh (Torcellini et al., 2003) a partir del mapa de evaporación por superficie libre de (Farnsworth et al., 1982). Entre la pequeña muestra de embalses en suelo español que se analizan en el trabajo de (López Moreno, 2008), el consumo de agua se mueve en un amplio margen desde los 51L/kWh del embalse de Barasona y los 101 L/kWh del embalse de Mediano, ambos en la provincia de Huesca. Por su parte, (Krarti & Aldubyan, 2021) señala que para el sistema eléctrico norteamericano se estima que el consumo de agua puede ir desde los 0 L/kWh (centrales de agua fluyente) hasta alcanzar los 355 L/kWh en el caso de hidroeléctricas, si bien la media del metaanálisis del que toma los datos, (Jin et al., 2019), aproxima una media de 72 L/kWh para embalses alrededor de todo el mundo.

Dado que los escenarios de cambio climático indican un incremento medio de las temperaturas en las próximas décadas de entre 1 y 3°C, esta evolución puede tener repercusión con un aumento significativo de las tasas de evaporación.

6.3. Parques eólicos

La energía eólica ha sido aprovechada por el ser humano desde hace varios siglos, y ya en la Edad Media se había extendido el uso del molino de eje horizontal para moler trigo y otros cereales.

Los aerogeneradores o turbinas eólicas actuales fueron desarrollados en los años 80, en busca de alternativas renovables a las centrales térmicas de combustibles fósiles limitados. Se basan en el mismo principio de funcionamiento que los molinos tradicionales, pero con la finalidad de generar energía eléctrica en sus turbinas.

Por lo que concierne al consumo de agua asociado a la generación de energía eléctrica, en el caso de los aerogeneradores se puede considerar despreciable, pues no hacen uso directo de agua para ningún proceso durante su operación. En algunos artículos de investigación se ha estudiado el consumo a lo largo de todo su ciclo de vida, incluyendo los procesos necesarios desde la extracción de los materiales, su transformación en industrias, transporte, etc. alcanzando en cualquier caso tan solo unos 0,1 L/kWh (Jin et al., 2019).

6.4. Centrales solares fotovoltaicas

La radiación solar anual en Europa varía en función de la latitud entre los 800 kWh/m² de los países escandinavos y los 1800 kWh/m² del sur de los países mediterráneos. Contando con una eficiencia de las células fotovoltaicas en torno al 20%, la generación varía entre 160 kWh y 360 kWh anuales de generación eléctrica por metro cuadrado de panel. Salvo algunas excepciones como Alemania, Bélgica o Países Bajos, la inmensa mayoría de esta tecnología se instala en las regiones más meridionales del continente, con lo que se puede estimar una radiación media de unos 1500 kWh/m², y una generación media de 300 kWh por metro cuadrado.

A menudo se obvia el necesario mantenimiento de los paneles fotovoltaicos, el cual principalmente se reduce a su limpieza y el cuidado de los sistemas hidráulicos si cuentan con seguidores solares. El polvo y la suciedad presentes en el ambiente se depositan de forma continua sobre los módulos solares, reduciendo notablemente su rendimiento. En algunos casos puede ser suficiente con el agua de lluvia para retirar la suciedad acumulada, especialmente si se encuentran en regiones climáticas con temporadas de fuertes precipitaciones. No obstante, esto no suele ser lo habitual, dado que su mayor desarrollo se presenta en climas áridos con pocas lluvias.

Por ello, resulta imprescindible una limpieza periódica de su superficie, la cual se puede llevar a cabo a mano en pequeñas instalaciones y más a menudo con maquinaria adaptada o robots en grandes plantas generadoras. La frecuencia de intervención varía ampliamente según las condiciones desde una vez al año en lugares con poca contaminación hasta una vez al mes en ambientes desérticos con gran presencia de arena en suspensión. Teniendo en cuenta un consumo aproximado de 0,5 L/m² de panel en cada proceso de limpieza (Jones et al., 2016; Zahedi et al., 2021) y asumiendo una actuación trimestral, el consumo es de unos 0,0066 L/kWh. Si se tiene en cuenta todo el consumo asociado a su ciclo de vida, desde los procesos de extracción de los materiales hasta su transformación en industrias, transporte, etc. se pueden alcanzar los 0,1 L/kWh (Jin et al., 2019).

6.5. Centrales de biomasa

La biomasa es un término muy amplio que incluye toda la materia orgánica susceptible de emplearse como fuente de energía, es decir, animales y vegetales, si bien al hablar de biomasa normalmente se hace referencia a los segundos. Esta biomasa vegetal puede obtenerse tanto directamente de la naturaleza como de cultivos energéticos producidos específicamente para su uso en centrales.

Las centrales térmicas de biomasa para generación eléctrica no distan en su funcionamiento de las termoeléctricas, si bien su potencia instalada no suele ser tan elevada como en una central nuclear, de carbón o de ciclo combinado. De igual modo, consumen el combustible

(en este caso, madera) mediante combustión para elevar la temperatura de un ciclo de vapor y mover las turbinas.

La obtención de un valor para el consumo de agua asociado a las centrales de biomasa es compleja. Al gasto asociado a la refrigeración, el cual es similar al de las centrales termoeléctricas y se puede cifrar en unos 2,1 L/kWh (Macknick et al., 2012) hay que sumarle el consumo hídrico que se necesita durante todo el ciclo de vida de los vegetales para que crezcan hasta que tienen las características óptimas para ser consumidos. Esto dependerá del tipo de cultivo, el clima en que se desarrolla, etc. El metaanálisis de (Jin et al., 2019) ofrece el dato de consumo de unos 90 L/kWh de media a lo largo de todo el ciclo. También se toman en cuenta para el estudio las centrales que generan biocombustibles como biodiésel o bioetanol que más tarde se consumen en otras centrales térmicas combinadas con el diésel tradicional. Para la obtención de esos biocombustibles se emplean cultivos como el girasol, maíz, caña de azúcar, colza, etc.

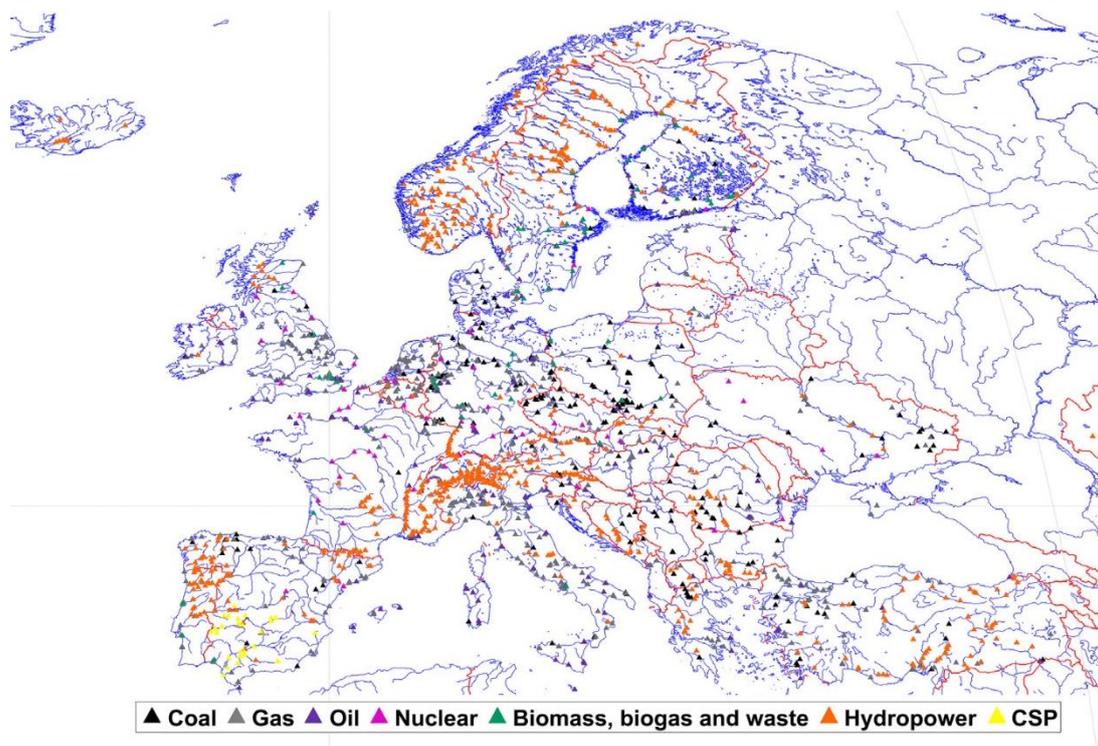


Figura 16: Distribución de los distintos tipos de centrales de generación de energía eléctrica con una potencia instalada superior a 50 MW en el continente europeo. Fuente: (Lohrmann et al., 2021)

6.6. Hipótesis particulares para este estudio

Una vez planteado el contexto sobre el que se va a trabajar, queda de manifiesto que la literatura científica presenta diferencias significativas en algunos casos tanto en su

metodología para obtener los datos como en sus suposiciones de partida, además de partir de un campo poco examinado y con escasa información.

Obtener unos datos completamente precisos acerca del consumo hídrico de cada una de las centrales de generación de energía eléctrica es a todas luces una tarea inabarcable, por lo que se deben establecer algunas suposiciones y aproximaciones. A continuación, se constituyen las hipótesis específicas que se van a aplicar en este trabajo.

- En lo referente a las centrales termoeléctricas, se considera que todas ellas se encuentran refrigeradas por aguas fluviales, por lo que la extracción y consumo es completamente de agua dulce.
- La tendencia en cuanto a sistema de refrigeración de centrales termoeléctricas es la de instalar procedimientos de lazo cerrado con torres de refrigeración, dado que los sistemas de lazo abierto tienen un impacto más nocivo en el ecosistema.
- El valor estimado en base a los puntos anteriores de la tasa de evaporación por unidad de energía eléctrica producida para centrales termoeléctricas será: 2,4 L/kWh en centrales de carbón; 0,9 L/kWh en centrales de ciclo combinado; 2,5 L/kWh en centrales nucleares.
- La evaporación debida a la generación de energía hidroeléctrica se establece en unos 70 L/kWh.
- El consumo de agua asociado al ciclo de vida de la generación de energía fotovoltaica se establece en unos 0,1 L/kWh.
- De igual modo, el consumo asociado a la generación eólica resulta tan reducido que se va a suponer despreciable.
- Por último, el gasto de agua necesario para hacer posible el desarrollo de la energía de la biomasa es de unos 90 L/kWh.
- Otras fuentes de generación de energía eléctrica como la geotérmica, la mareomotriz o la solar térmica tienen una presencia marginal en el mix eléctrico de Europa, por lo que no se tienen en cuenta salvo la última de ellas para el caso de España (3,4 L/kWh). Por otra parte, las centrales térmicas de fueloil aún existentes especialmente en lugares remotos pueden asimilar su funcionamiento y consumo de agua al de las centrales convencionales de carbón.
- Todos los valores anteriores van a sufrir variaciones en función del clima en que se encuentren, pues las tasas de evaporación en la refrigeración no serán equivalentes en todos los territorios y dependerán estrechamente de las condiciones de temperatura y humedad, además de la velocidad del viento o la radiación solar. Para tratar de compensar las diferencias, se desarrollará en este estudio un factor de corrección en función de la zona climática.

- No se han considerado posibles características específicas de cada país en materia legislativa que puedan afectar al uso de determinados sistemas de refrigeración en sus centrales térmicas para proteger la vida salvaje en los cauces, o que puedan regular el tipo de cultivos en el caso de la biomasa.
- La transición energética hacia una generación de electricidad con menores emisiones de carbono podrá resultar en un aumento o una disminución del consumo de agua asociado. Dependerá fundamentalmente de si se potencian las fuentes hidroeléctricas y de biomasa, que suponen un gran consumo, junto a otras energías como la fotovoltaica y la eólica de menor consumo.

Partiendo de los valores razonados, a continuación, para obtener el consumo aproximado de agua en cada país del continente europeo será necesario ponderar el gasto asociado a cada tecnología de generación en función de los mix eléctricos particulares, los cuales varían considerablemente entre naciones.

No obstante, tal y como se ha propuesto, es conveniente adaptar previamente los valores expuestos de consumo en la generación para reflejar el impacto que el clima ejerce sobre ellos.

6.7. Factores de corrección de consumo de agua en la generación de energía eléctrica según el clima

Si bien se han establecido unos valores representativos del consumo de agua en las centrales de generación de energía, dichos valores representan un promedio, pero no serán iguales en todos los territorios dadas sus notables diferencias. Las tasas de evaporación en la refrigeración no serán equivalentes en todos los territorios y dependerán estrechamente de las condiciones de temperatura y humedad, además de la velocidad del viento o la radiación solar. Para tratar de compensar las diferencias, se aplicará un factor de corrección estimado en función de la zona climática. Cabe recordar que dentro del continente europeo se pueden encontrar diferencias de radiación solar muy acusadas, que varían entre 800 y 1800 kWh/m², así como temperaturas desde unos 0°C de media hasta más de 20°C de media anual. Estas diferencias tienen un impacto en las cantidades de agua evaporada por unidad de energía generada.

Establecer unos factores de corrección adecuados es complicado, pues hay infinidad de elementos que pueden afectar al consumo de agua en centrales situadas en localizaciones y climas diferentes: distintas tecnologías con distintas eficiencias y factores de capacidad, temperatura, humedad, presión atmosférica, radiación solar, poder calorífico del combustible (el mismo combustible puede ser de mayor o menor calidad), velocidad del viento...(Jin et al., 2019).

En el estudio desarrollado por (Torcellini et al., 2003) se presenta una relación de los consumos de agua recabados en Estados Unidos por la Oficina de la Eficiencia Energética y Renovable (EERE), perteneciente al Departamento de Energía del mismo país. En el informe se desgrena el consumo asociado a las centrales termoeléctricas y a las hidroeléctricas para cada uno de sus Estados, siempre que las haya. En la Tabla 5 se recogen los datos de algunos Estados representativos de las zonas más frías y las más calurosas del país:

Tabla 5: consumo de agua por unidad de energía eléctrica generada en estados de E.E.U.U. Fuente: (Torcellini et al., 2003)

Estado	Consumo de agua en termoeléctricas (L/kWh)	Consumo de agua en hidroeléctricas (L/kWh)
Oregón	3,1	16,7
Washington	1,1	12,1
Nueva York	3,2	21,1
California	0,2	79,0
Arizona	1,2	245,5
Nevada	2,1	277,6
Nuevo México	2,4	257,4

A partir de los datos recogidos por (Torcellini et al., 2003) no se aprecia una diferencia clara en el consumo de agua en las centrales termoeléctricas de EE. UU., siendo en ocasiones incluso superior en estados con un clima más frío y húmedo que en otros más cálidos y secos. No obstante, dado que este estudio no hace distinción entre los sistemas de refrigeración de las centrales (lazo cerrado, estanques de enfriamiento y circuito abierto) ni en el combustible empleado por las mismas, no se puede sacar una conclusión definitiva. De hecho, observando el mapa proporcionado por otras fuentes como (Averyt et al., 2011) se puede comprobar cómo en algunos Estados muy áridos están proliferando los sistemas de refrigeración seca con condensadores por aire a costa de reducir su rendimiento, dada la escasez de agua. Este hecho explica en parte valores de consumo tan reducidos como el de California.

En el caso de los datos de las centrales hidroeléctricas hay una diferencia muy acusada entre diferentes emplazamientos. Si bien puede deberse a numerosos factores como la profundidad media de los embalses (relacionada con lo escarpado del terreno) o la velocidad del viento, no cabe duda de que uno de los elementos de peso son las condiciones ambientales de temperatura y humedad. Estas condiciones afectan directamente a la mayor o menor evaporación de la lámina superficial de agua, y se ven afectadas esencialmente por la altitud y la latitud. Así lo demuestra el mapa desarrollado por (Farnsworth et al., 1982) para EE. UU., el cual representa las diferencias en la evaporación desde superficies libres a lo largo y ancho del país, encontrando valores hasta cuatro veces superiores en el suroeste frente al noroeste.

Además, (Farnsworth et al., 1982) comenta que durante la primavera y el verano el calor se comienza a almacenar en las masas de agua, siendo la evaporación por lo general menor que la esperable. Después, en la temporada otoñal, la energía almacenada en los embalses se libera y la evaporación es mucho mayor. Por ejemplo, en los Grandes Lagos de Estados Unidos la máxima evaporación sucede durante los meses finales del otoño, entre octubre y diciembre.

En el estudio de (Macknick et al., 2012) sobre el empleo y consumo de agua en la operación de centrales termoeléctricas no se hace referencia al impacto de las diferencias climáticas. No obstante, se citan diferencias entre los consumos de distintas centrales térmicas con el mismo sistema de refrigeración en torno al 30%-40%, dependiendo de la tecnología de generación, un intervalo que ha de reflejar necesariamente las desigualdades climáticas junto con otros factores.

(Jin et al., 2019) afirma en su trabajo que las condiciones geográficas influyen en el uso del agua por parte de las centrales termoeléctricas. En concreto, para las centrales nucleares de Estados Unidos con un sistema de refrigeración en lazo cerrado, el intervalo de consumos de agua se mueve entre 1800 L/MWh y más de 3000 L/MWh. Además, según la misma fuente, en China las diferencias climáticas entre las regiones del norte y las del sur del país representan diferencias del 24% en los requerimientos de agua de refrigeración para las centrales nucleares.

El único método completamente preciso para poder valorar el impacto del clima en el consumo de las centrales de producción de energía sería contar con varias centrales idénticas situadas en varios climas distintos. De ese modo se tendría solo como factor diferencial el clima. En el caso de las centrales hidroeléctricas esto es imposible, pues las características particulares de cada emplazamiento definen la instalación. Sin embargo, las centrales termoeléctricas se construyen a menudo empleando el mismo proyecto para varias plantas diferentes. Es el caso de la central nuclear de Cofrentes, en Valencia, para cuya construcción se empleó el mismo modelo que en varias centrales estadounidenses y una suiza. Estas plantas permiten consultar sus datos técnicos (Bumbacher & Schmid, 2011; EIA, 2021; Sesma & Rubio-Varas, 2019) lo que facilita comparar las sus características principales.

Tabla 6: consumo de agua en la refrigeración de cuatro centrales iguales en distintos emplazamientos. Fuente: (Bumbacher & Schmid, 2011; EIA, 2021; Sesma & Rubio-Varas, 2019)

Central	Emplazamiento	Clima	Consumo	Energía generada	Consumo L/kWh
Cofrentes	Valencia (España)	Bsk	2429 hm ³	9.200.000 MWh	2.64
River Bend	Louisiana (USA)	Cfa	1825 hm ³	7.141.350 MWh	2.56
Perry	Ohio (USA)	Dfa	2856 hm ³	11.410.971 MWh	2.50
Leibstadt	Suiza	Dfb	2210 hm ³	9.600.000 MWh	2.3

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

Los resultados de la Tabla 6 demuestran que existe cierta diferencia en los consumos de agua asociada a las disparidades en el clima, confirmando lo antes expuesto por (Jin et al., 2019).

Recopilando más información sobre la variación de los consumos en la producción hidroeléctrica, se puede apreciar cómo la evapotranspiración anual en embalses localizados en Canadá varía entre 453 y 599 mm/año, un dato similar a los presentados por Suecia (500-650) y Finlandia (500-700) (Tremblay et al., 2014). Estos valores fluctúan mucho durante el año, siendo más importantes en su segunda mitad. La inercia térmica de las masas de agua retrasa la evaporación alrededor de un mes con respecto a las temperaturas más altas del ambiente. Además, los vientos también representan un papel importante al desplazar las masas de aire húmedo lejos de la superficie, permitiendo una mayor evaporación.

Partiendo de esos datos de evaporación anual, el informe de (Tremblay et al., 2014) obtiene un resultado total de 49 L/kWh de evaporación bruta para un embalse y 32 L/kWh para otro, ambos en Canadá. Según se indica en el mismo trabajo, otros estudios sitúan a embalses de zonas climáticas iguales o similares como Canadá, Austria o Noruega en torno a un consumo medio de 30 L/kWh, en territorios con clima calificado como Dfc.

Por otra parte, se señala que lugares templados y tropicales presentan valores mucho más elevados, lo que corroboran otras fuentes. En el estudio conducido por (López Moreno, 2008) se concluye que en los embalses localizados en embalses del prepirineo (climas entre Bsk y Cfb) la evaporación anual se encuentra entre 1100 y 1400 mm. En (Junta de Andalucía, 2015), tras analizar embalses en las provincias de Cádiz y Sevilla (clima Csa) el resultado obtenido es de unos 1650 mm anuales de evaporación. Por último, para un clima más extremo como el que se encuentra entre Nevada y Arizona (BWh), la evaporación anual registrada en el lago Mead (el mayor embalse artificial de Norteamérica) alcanza los 1800 mm (Earp & Moreo, 2021).

Las citadas investigaciones ratifican que la evaporación en masas de agua depende estrechamente de las condiciones climáticas en las que se encuentran, si bien nunca se puede dejar de lado la influencia de muchos otros factores, especialmente la superficie inundada en relación con la producción. El profundo análisis llevado a cabo por (Scherer & Pfister, 2016) en más de 1500 centrales hidroeléctricas alrededor del planeta concluye que el consumo de agua es extremadamente variable, y es proporcionalmente mucho mayor en las centrales de menor potencia instalada, salvo en las de agua fluyente. Además, se pone de relieve que el consumo neto en los climas más húmedos y con mayor vegetación sería de alrededor del 60% de ese consumo bruto, pues hay que tener en cuenta la evapotranspiración que deja de existir en el ecosistema natural que se ha cubierto.

Por último, en el caso de la energía procedente de la biomasa, el agua necesaria para desarrollar los cultivos que después se emplean en las centrales también es dependiente de la evapotranspiración del terreno, al igual que en las centrales hidroeléctricas.

6.7.1. Relación del consumo hídrico con la depresión de bulbo húmedo

Tal y como se ha descrito anteriormente, el consumo de agua en la generación de energía eléctrica va a estar relacionado con las condiciones ambientales en las que se encuentren las torres de refrigeración, los embalses, los cultivos, etc. Por consiguiente, es interesante encontrar un criterio que permita establecer una relación cuantitativa entre las características de cada clima y sus valores de consumo potencial de agua.

La depresión de bulbo húmedo (DBH) o Wet Bulb Depression (WBD) se define como la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo en cualesquiera condiciones. Con una depresión de bulbo húmedo más reducida, dichas temperaturas se encontrarán más cerca entre sí, lo que significa que las condiciones del ambiente se encuentran más próximas a la saturación. Por ello, es un concepto muy útil para conocer de forma indirecta la saturación del aire.

Dado que se ha visto que el consumo de agua depende de las condiciones de temperatura y humedad en el ambiente, este puede ser un parámetro adecuado de estudio. Se han recopilado en ASHRAE los valores de temperatura seca y temperatura húmeda coincidente para una ciudad representativa de cada uno de los climas presentes en el continente europeo, y a continuación se ha obtenido para cada una de ellas su depresión de bulbo húmedo (Tabla 7).

Tabla 7: depresión de bulbo húmedo en cada zona climática de Europa. Fuente: ASHRAE

Localización	Clima	Ts (°C)	Thc (°C)	DBH
Asuán	BWh	41.0	21.5	19.5
Nicosia	BSh	37.9	21.1	16.8
Madrid	BSk	35.5	18.1	17.4
Roma	Csa	32.9	21.5	11.4
Oporto	Csb	28.3	18.0	10.3
Belgrado	Cfa	32.9	21.2	11.7
París	Cfb	29.0	19.2	9.8
Bucarest	Dfa	32.6	21.2	11.4
Varsovia	Dfb	28.4	19.4	9
Tampere	Dfc	25.5	17.4	8.1
Ankara	Dsa	33.1	16.8	16.3
Saentis (Alpes)	ET	13.5	8.8	4.7

En el caso del clima BWh, presente en la actualidad en zonas de las Islas Canarias y algunas áreas del sureste peninsular, se ha tomado como referencia la ciudad de Asuán al no disponer de suficientes datos de dichos emplazamientos.

En base a los datos expuestos en el apartado anterior, y contando con los valores promedio que ya se habían establecido, se puede estimar una variación en el consumo de agua ligada al clima en que se encuentran las centrales. Con la depresión de bulbo húmedo como factor característico de las condiciones que representa cada clima, se representa a continuación la

relación entre la DBH y el consumo de agua registrado en cada zona, observando que hay una importante correlación (Tabla 8).

Tabla 8: Consumo de agua en centrales termoeléctricas e hidroeléctricas en Europa. Fuentes: (Bumbacher & Schmid, 2011; Chazarra et al., 2018; Earp & Moreo, 2021; EIA, 2021; Gosse & Samie, 2020; IGN, n.d.; Jin et al., 2019; Junta de Andalucía, 2015; López Moreno, 2008; Sesma & Rubio-Varas, 2019; Tremblay et al., 2014)

Localización	Clima	DBH	Consumo de agua en centrales nucleares y térmicas (L/kWh)	Evaporación en centrales hidroeléctricas (mm/año)	Consumo de agua en centrales hidroeléctricas (L/kWh)
Asuán	BWh	19,5	3	1800	114,5
Nicosia	BSh	16,8	2,73	1600	101,8
Madrid	BSk	17,4	2,64	1400	89,1
Roma	Csa	13,6	2,6	1650	105,0
Oporto	Csb	10,3	2,4	900	57,3
Belgrado	Cfa	11,7	2,56	1000	63,6
París	Cfb	9,8	2,3	1100	70,0
Bucarest	Dfa	11,4	2,5	1000	63,6
Varsovia	Dfb	9	2,3	800	50,9
Tampere	Dfc	8,1	2,2	600	38,2

Los valores relativos al consumo en centrales nucleares y térmicas convencionales proceden de (Bumbacher & Schmid, 2011; EIA, 2021; Gosse & Samie, 2020; Jin et al., 2019; Sesma & Rubio-Varas, 2019) mientras que los datos de evaporación en cada región han sido extraídos de (Chazarra et al., 2018; Earp & Moreo, 2021; IGN, n.d.; Junta de Andalucía, 2015; López Moreno, 2008; Tremblay et al., 2014). Estos últimos coinciden con lo expuesto en el mapa de (Farnsworth et al., 1982), con diferencias de evaporación tres veces superiores en los lugares más cálidos frente a los más fríos.

Se ha establecido como referencia el clima Cfb por tratarse de unas condiciones exteriores intermedias, además de ser el clima promedio de buena parte de E.E.U.U. y de Europa, de donde se han obtenido la mayoría de los datos de consumo de agua en la generación eléctrica.

Contando con dicha referencia y partiendo del valor de consumo estimado promedio de 70 L/kWh, se han hallado los consumos de agua estimados para el resto de las zonas climáticas en centrales hidroeléctricas, suponiéndose proporcionales a las tasas de evaporación.

Se representan en la Figura 17 los resultados relativos a las centrales termoeléctricas, donde se puede comprobar visualmente cómo el consumo está directamente relacionado con la depresión de bulbo húmedo. En la figura aparecen datos de diversas fuentes, las cuales se han diferenciado mediante colores. Como fuente principal se presentan los cuatro puntos azules correspondientes a las cuatro centrales nucleares comentadas en la Tabla 6. La

información se ha completado con el punto verde y los rojos, correspondientes a datos de Estados Unidos y China respectivamente (Jin et al., 2019) y el blanco (Gosse & Samie, 2020). La ausencia de literatura acerca del consumo en centrales en los climas Csa y Csb ha motivado que sus valores (azul claro) se hayan estimado a partir del resto.

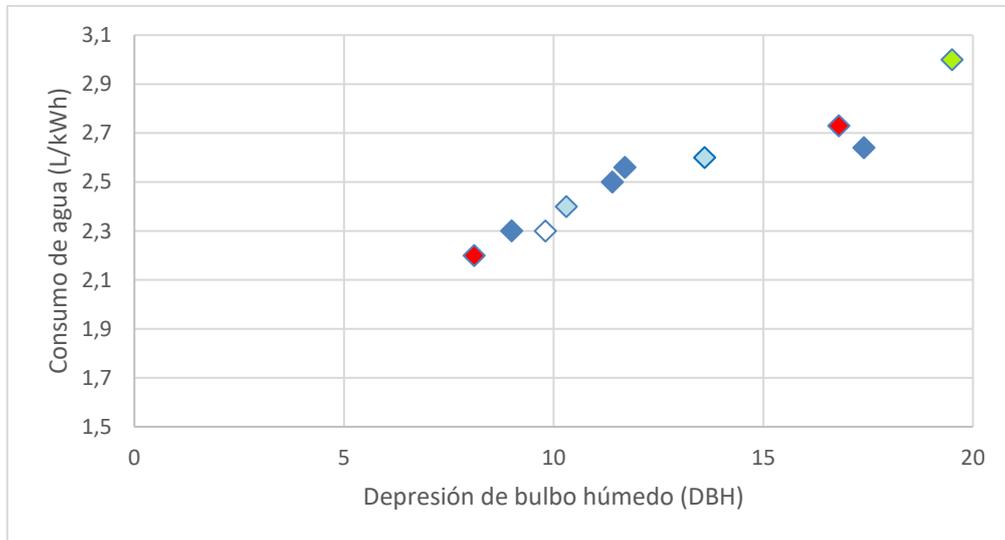


Figura 17: Consumo de agua en centrales termoeléctricas según la DBH. Fuentes: (Bumbacher & Schmid, 2011; EIA, 2021; Gosse & Samie, 2020; Jin et al., 2019; Sesma & Rubio-Varas, 2019)

De igual modo, los resultados correspondientes a las hidroeléctricas se plasman en la Figura 18. Los puntos azules se han obtenido a partir de los datos de (Chazarra et al., 2018; IGN, n.d.), el rojo de (Earp & Moreo, 2021), el naranja de (Junta de Andalucía, 2015), los verdes de (López Moreno, 2008) y el blanco de (Tremblay et al., 2014), mientras que el azul claro correspondiente al clima Dfa se ha estimado por falta de información precisa al respecto.

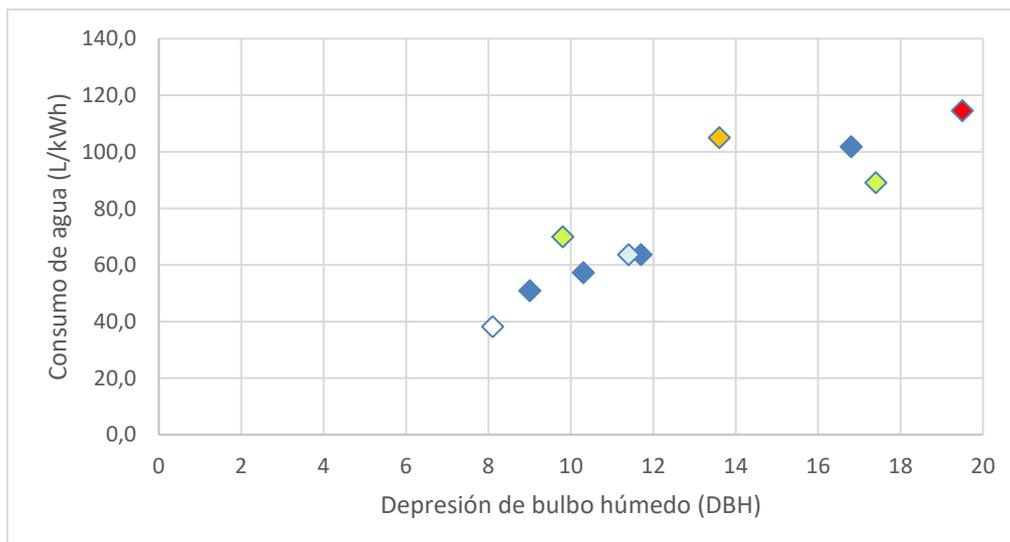


Figura 18: consumo de agua en centrales hidroeléctricas según la DBH. Fuentes: (Chazarra et al., 2018; Earp & Moreo, 2021; IGN, n.d.; Junta de Andalucía, 2015; López Moreno, 2008; Tremblay et al., 2014)

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

Continuando con el resto de las fuentes de energía eléctrica, en el caso del consumo asociado a la energía de la biomasa se puede emplear la misma relación de proporcionalidad que en la hidroeléctrica, dado que la evapotranspiración sigue el mismo comportamiento dependiente de las condiciones ambientales en los terrenos de cultivo (FAO, 2021).

En cuanto a las centrales de ciclo combinado, no han sido comprendidas en los datos anteriores por contar con un rendimiento muy superior al resto de termoeléctricas que repercute en un consumo de agua menor por unidad de energía eléctrica generada. No obstante, su funcionamiento en cuanto a sistemas de refrigeración es similar, por lo que las mismas diferencias encontradas en nucleares y térmicas convencionales se pueden extrapolar a este caso.

Respecto a las fuentes de energía eólica y fotovoltaica, dado que los consumos de agua asociados a su operación son prácticamente nulos y, en todo caso, no relacionados con la evaporación o con un sistema de refrigeración, el clima no representa ningún impacto sobre ellas.

Con todo lo expuesto, se pueden plantear una serie de factores de corrección del consumo de agua indirecto asociado a la generación de energía eléctrica (Tabla 9), tomando como referencia el clima Cfb con los valores estimados en el capítulo correspondiente.

Tabla 9: factores de corrección de consumo de agua en la generación de electricidad (L/kWh) para distintos climas. Fuente: elaboración propia

Clima	Carbón/fuel	Gas	Nuclear	Hidro	Eólica	FV	Biomasa
<i>BWh</i>	1,3	1,3	1,3	1,64	1,00	1,00	1,64
<i>BSh</i>	1,19	1,19	1,19	1,45	1,00	1,00	1,45
<i>BSk</i>	1,15	1,15	1,15	1,27	1,00	1,00	1,27
<i>Csa</i>	1,13	1,13	1,13	1,50	1,00	1,00	1,50
<i>Csb</i>	1,04	1,04	1,04	0,82	1,00	1,00	0,82
<i>Cfa</i>	1,11	1,11	1,11	0,91	1,00	1,00	0,91
<i>Cfb</i>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>Dfa</i>	1,09	1,09	1,09	0,91	1,00	1,00	0,91
<i>Dfb</i>	1,00	1,00	1,00	0,73	1,00	1,00	0,73
<i>Dfc</i>	0,95	0,95	0,95	0,55	1,00	1,00	0,55

Aplicando los factores de corrección propuestos, los consumos indirectos finales para cada clima y tecnología quedan tal y como se muestra en la Tabla 10. Los valores en todos los tipos de centrales térmicas se ven afectados por el clima, pero no sufren cambios muy significativos. En cambio, para las centrales hidroeléctricas y los territorios en los que se cultiva biomasa para generación eléctrica el impacto del clima es muy relevante en sus consumos de agua.

Tabla 10: valores corregidos de consumo de agua en la generación de electricidad (L/kWh) para distintos climas. Fuente: elaboración propia

	Carbón/fuel	Gas	Nuclear	Hidro	Eólica	FV	Biomasa
Promedio	2,4	0,9	2,5	70,0	0,0	0,1	90,0
BWh	3,1	1,2	3,3	114,8	0,0	0,1	147,6
BSh	2,9	1,1	3,0	101,5	0,0	0,1	130,5
Bsk	2,8	1,0	2,9	88,9	0,0	0,1	114,3
Csa	2,7	1,0	2,8	105,0	0,0	0,1	135,0
Csb	2,5	0,9	2,6	57,4	0,0	0,1	73,8
Cfa	2,7	1,0	2,8	63,7	0,0	0,1	81,9
Cfb	2,4	0,9	2,5	70,0	0,0	0,1	90,0
Dfa	2,6	1,0	2,7	63,7	0,0	0,1	81,9
Dfb	2,4	0,9	2,5	51,1	0,0	0,1	65,7
Dfc	2,3	0,9	2,4	38,5	0,0	0,1	49,5

6.8. Consumo de agua indirecto por unidad de energía generada y por país

Los valores anteriores pueden aplicarse junto con los mix eléctricos recopilados previamente para cada país europeo para obtener un resultado del consumo de agua asociado a la generación energética de cada nación en función tanto de su clima predominante como de su sistema eléctrico (Tabla 11).

Tabla 11: Consumo de agua asociado a la generación de electricidad en cada país de Europa según su mix y clima. Fuente: elaboración propia.

País	%Carbón/fuel	%Gas	%Nuclear	%Hidro	%Eólica	%Solar	%Biom	Clima	Consumo L/kWh
Alemania	27%	17%	11%	4%	23%	9%	9%	Dfb	9,04
Francia	1%	7%	67%	13%	8%	2%	2%	Cfb	12,66
Reino Unido	2%	37%	16%	2%	25%	4%	13%	Cfb	13,88
Turquía	35%	23%	0%	26%	8%	3%	5%	Csa	35,24
Italia	9%	48%	0%	17%	7%	9%	9%	Cfa	18,93
España	6%	27%	23%	11%	21%	8%	3%	Csa	16,70
Suecia	1%	0%	32%	43%	17%	1%	7%	Dfc	20,80
Polonia	71%	11%	0%	1%	10%	1%	5%	Dfb	5,60
Noruega	0%	1%	0%	91%	6%	0%	0%	Dfc	35,04
Ucrania	28%	9%	51%	4%	2%	4%	0%	Dfb	4,08
Países Bajos	8%	59%	3%	0%	13%	7%	7%	Cfb	7,11
Bélgica	2%	29%	38%	1%	14%	6%	7%	Cfb	8,27
Rep. Checa	40%	8%	37%	4%	1%	3%	6%	Dfb	7,95
Austria	4%	14%	0%	63%	9%	3%	6%	Dfb	36,36
Suiza	0%	1%	33%	58%	0%	4%	3%	Dfb	32,45
Finlandia	8%	6%	34%	23%	12%	0%	16%	Dfc	17,81
Rumanía	18%	18%	20%	27%	12%	3%	1%	Dfb	15,55
Portugal	16%	27%	0%	23%	23%	3%	7%	Csb	19,02
Grecia	23%	39%	0%	7%	20%	9%	1%	Csa	9,73
Bulgaria	34%	6%	41%	7%	4%	4%	5%	Dfb	8,76
Serbia	70%	2%	0%	26%	3%	0%	1%	Dfb	15,64
Bielorrusia	6%	91%	0%	1%	1%	1%	1%	Dfb	2,13
Hungría	11%	26%	47%	1%	2%	7%	6%	Dfb	6,13

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

<i>Irlanda</i>	6%	50%	0%	4%	36%	0%	3%	Cfb	6,09
<i>Eslovaquia</i>	8%	13%	53%	16%	0%	2%	6%	Dfb	13,75
<i>Dinamarca</i>	11%	4%	0%	0%	58%	4%	22%	Dfb	14,76
<i>Islandia</i>	0%	0%	0%	68%	0%	0%	31%	Dfc	41,53
<i>Eslovenia</i>	26%	4%	37%	30%	0%	2%	1%	Dfb	17,57
<i>Bosnia y Herzegovina</i>	70%	0%	0%	28%	2%	0%	0%	Dfb	15,99
<i>Croacia</i>	9%	25%	0%	42%	13%	1%	8%	Dfb	27,16
<i>Estonia</i>	46%	0%	0%	0%	13%	2%	22%	Dfb	15,56
<i>Moldavia</i>	0%	94%	0%	5%	2%	0%	0%	Dfb	3,40
<i>Letonia</i>	0%	37%	0%	45%	3%	0%	16%	Dfb	33,84
<i>Albania</i>	0%	0%	0%	98%	0%	2%	0%	Csa	102,90
<i>Macedonia del norte</i>	51%	21%	0%	24%	2%	0%	2%	Bsk	25,25
<i>Chipre</i>	86%	0%	0%	0%	4%	6%	2%	Bsh	5,07
<i>Lituania</i>	0%	35%	0%	21%	31%	2%	10%	Dfb	17,62
<i>Montenegro</i>	44%	0%	0%	47%	9%	0%	0%	Dfb	25,07
<i>Luxemburgo</i>	0%	9%	0%	48%	13%	9%	18%	Cfb	49,89
<i>Malta</i>	5%	86%	0%	0%	0%	10%	0%	Csa	1,02

Tal y como se aprecia en la Figura 19, existen grandes diferencias entre unos y otros países, dado que los factores que condicionan el consumo de agua en la generación de energía eléctrica varían enormemente entre ellos. El principal condicionante es claramente el mix eléctrico presente en cada nación, el cual viene determinado en mayor o menor medida por las características geográficas de los territorios y su disponibilidad de recursos.

Esto se evidencia con los casos de mayor y menor consumo hídrico por kilovatio-hora. Estos corresponden a Albania y Malta, respectivamente. En ambos países el clima predominante es el Csa; sin embargo, el primer caso resulta 100 veces superior al segundo. Albania es un país montañoso con grandes recursos hidrológicos, lo que le ha permitido generar casi la totalidad de su electricidad a partir de ellos. Sin embargo, Malta es una pequeña nación aislada sin recursos propios que ha optado por abastecerse a partir del gas y las renovables.

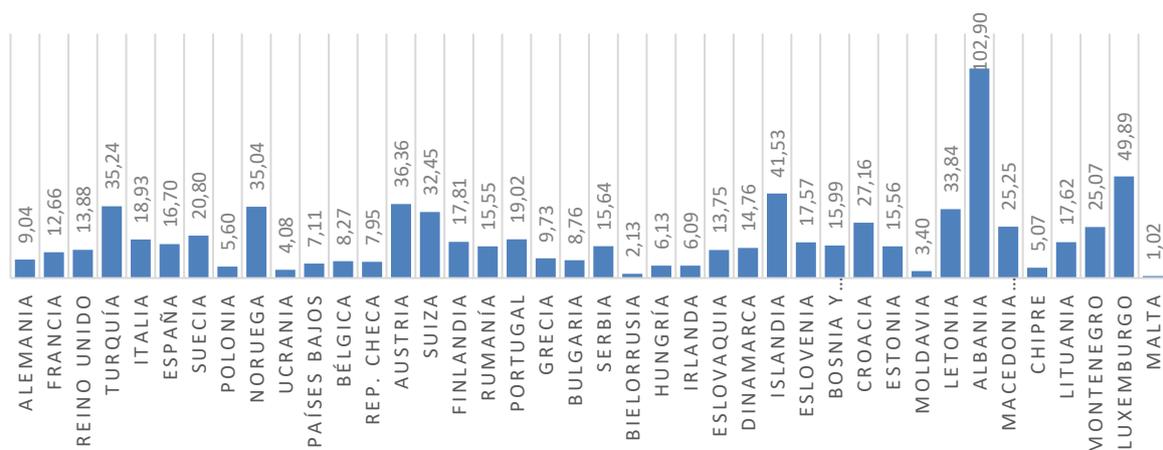


Figura 19: Consumo de agua asociado a la generación de electricidad (L/kWh) en cada país de Europa según su mix y clima. Fuente: elaboración propia.

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

Al representar el consumo de cada país desglosado por fuentes de generación de energía eléctrica (Figura 20) se pueden comprender con mayor claridad las grandes diferencias existentes. Dado que la energía hidroeléctrica y la procedente de la biomasa requieren cantidades de agua muy superiores al resto de fuentes, los países más dependientes de estas centrales registran unos consumos considerablemente superiores.

Las centrales termoeléctricas suponen un peso poco destacado en comparación a las dos mencionadas, pues sus consumos por kilovatio-hora producido son claramente inferiores. No obstante, no hay que obviarlas, pues las centrales nucleares y de carbón pueden llegar a extraer agua de los ríos o embalses en magnitudes superiores a los 150 L/kWh en casos de refrigeración en ciclo abierto (Macknick et al., 2012). Aunque esta agua se devuelva en su mayor parte al medio, supone un importante estrés hídrico en el entorno.

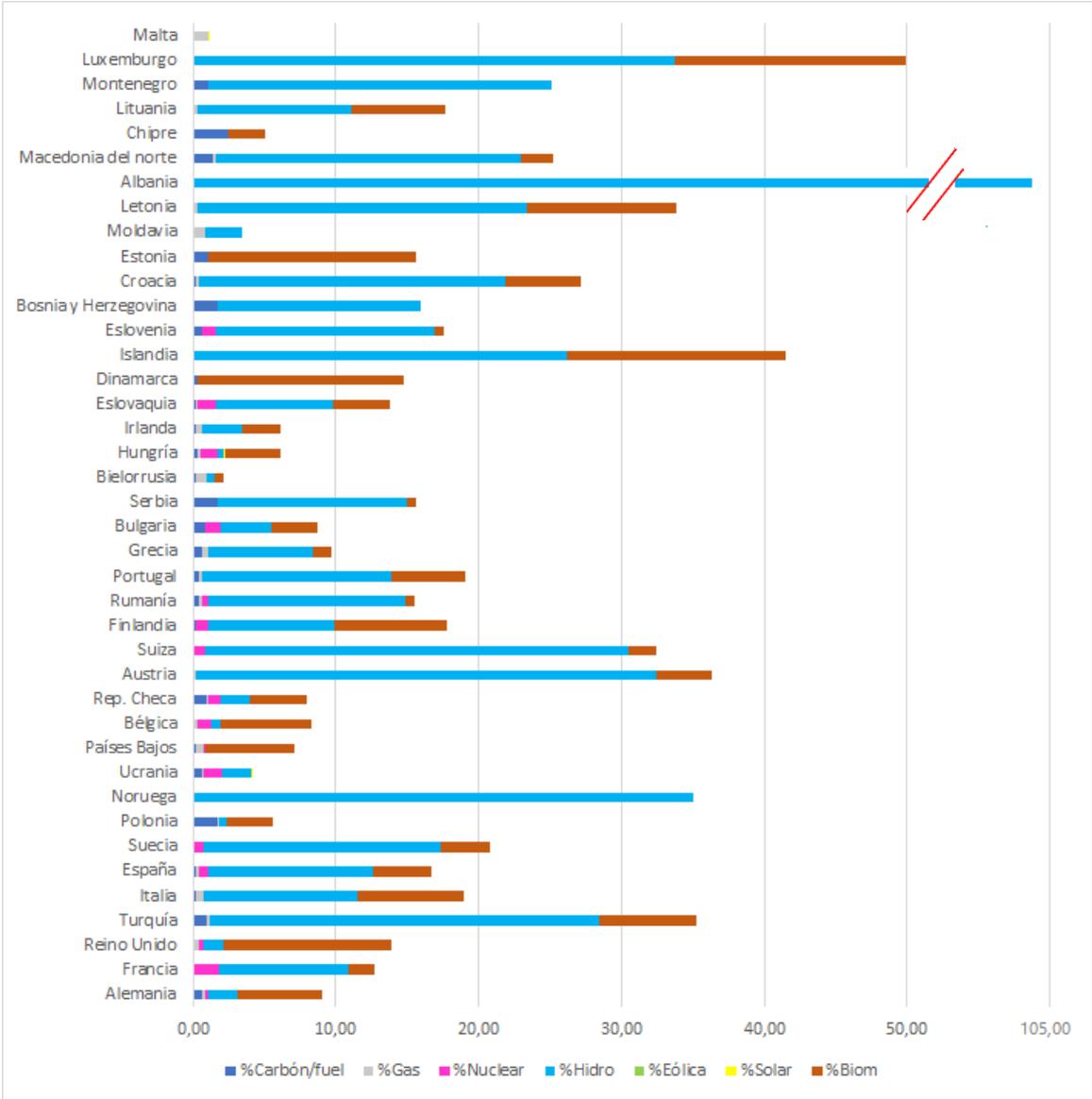


Figura 20: Consumo de agua en cada país desglosado por fuentes de generación eléctrica. Fuente: elaboración propia.

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

6.9. Caso de estudio: consumo de agua indirecto

Una vez establecida la tasa de consumo de agua indirecto de los equipos asociada al consumo eléctrico y corregida según el clima de cada país (Tabla 11), 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.

En primer lugar, se ha estudiado el consumo de agua indirecto, es decir, el debido al consumo eléctrico del equipo. Contando con los datos de temperatura y humedad del año meteorológico tipo (TMY) obtenidos de EnergyPlus, se ha modelado el caso de estudio mediante el uso de un programa de simulación de uso interno, basado en funciones de transferencia. Con él se obtienen las demandas horarias de refrigeración anuales para el año meteorológico tipo correspondiente a cada uno de los climas.

Como caso de estudio de referencia se ha propuesto una superficie de uso comercial de 2000 m², con sus cargas internas correspondientes. A partir de la carga máxima de refrigeración resultante de 147 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 (Tabla 2). A partir de dichos consumos y con las tasas previamente estimadas de gasto de agua asociado a la producción de electricidad en cada país, se ha obtenido el consumo de agua indirecto a lo largo de un año.

Dado que el consumo de agua en la generación de energía eléctrica varía ampliamente en función del mix eléctrico y del clima específico de cada país, los resultados en el consumo de agua también son muy diferentes entre naciones. En este caso de referencia el cálculo (Tabla 12) se ha realizado para una hora determinada en España, país en el que predomina el clima Csa y donde según las hipótesis planteadas el consumo de agua indirecto se puede estimar en unos 16,7 L/kWh.

Tabla 12: Condiciones iniciales en una hora determinada. Fuente: Elaboración propia.

Fecha y hora	Tbs (°C)	Demanda refrig. (kWh)	EER sin paneles adiabáticos	EER con paneles adiabáticos
21/07 13:00	29,8	143,8	4,31	5,98

Donde:

Tbs = Temperatura de bulbo seco, °C

6.9.1. Consumo indirecto de agua por hora SIN panel adiabático:

Empleando las expresiones (4) y (5) con el caso de estudio planteado con condensadoras por aire, se obtienen los resultados de consumo de agua asociado al consumo de electricidad de los equipos:

$$C_E = \frac{143,8 \text{ kWh}}{4,31} = 33,36 \text{ kWh}$$

$$C_{WI} = 33,36 \text{ kWh} * 16,7 \frac{\text{L}}{\text{kWh}} = \mathbf{557 \text{ Litros}}$$

6.9.2. Consumo indirecto de agua por hora CON panel adiabático:

Mientras que, con el uso de las mismas expresiones (4) y (5) para el mismo caso con la adición de paneles de preenfriamiento adiabático:

$$C_E = \frac{143,8 \text{ kWh}}{5,98} = 24,02 \text{ kWh}$$

$$C_{WI} = 24,02 \text{ kWh} * 16,7 \frac{\text{L}}{\text{kWh}} = \mathbf{401 \text{ Litros}}$$

Para este caso concreto, en una hora de funcionamiento del equipo en una región con clima Csa en España el consumo indirecto será de 557 litros en la unidad enfriada por aire y de 401 litros en la unidad con paneles adiabáticos, por lo que el ahorro de agua indirecta con el uso de enfriamiento evaporativo directo es del 28%.

El mismo cálculo se ha de repetir para las 8760 horas del año con sus correspondientes condiciones ambientales y su demanda de refrigeración en función de las cargas internas del edificio. Además, se debe reproducir ese estudio horario para cada uno de los países del continente europeo, con sus condiciones exteriores, demanda de refrigeración y consumo de agua indirecto por unidad de energía.

7. Consumo de agua directo

Los condensadores adiabáticos, provistos de un sistema de preenfriamiento, fundamentan su ventaja frente a los condensadores por aire en cuanto a eficiencia energética en el enfriamiento evaporativo. Este sistema permite ahorrar energía mediante el uso del calor de vaporización del agua para proporcionar refrigeración.

El empleo de este mecanismo, conocido como enfriamiento evaporativo directo por contactar directamente el aire de refrigeración con el agua de preenfriamiento, conlleva una humidificación de la corriente de aire. Esto supone un consumo constante del agua que circula por los paneles de preenfriamiento, que se disipa hacia la atmósfera y requiere su reposición desde la red de suministro.

Ese consumo directo no será siempre el mismo, sino que depende de las condiciones atmosféricas en las que se encuentre el condensador. Con temperaturas de bulbo seco altas, el aire requiere una mayor humidificación hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo con la que abandona los paneles de preenfriamiento, elevando el consumo. De igual modo, con humedades específicas reducidas del aire, este precisa una mayor humidificación. En consecuencia, el consumo de agua en equipos de enfriamiento adiabático será superior cuando las condiciones ambientales presenten temperaturas altas y humedades escasas, si bien estos son los climas donde resultan de mayor utilidad.

Contando con los conceptos expuestos, en el caso que se estudia en este proyecto relativo al continente europeo, por regla general, el consumo de agua directo es mayor en latitudes meridionales. Es decir, en territorios como los países mediterráneos el consumo será superior al de la región escandinava dada la diferencia de temperatura media. Este hecho es lógico y sucede con los consumos de cualquier tipo de sistema de refrigeración, dado que siempre será más costoso el enfriamiento con mayor temperatura ambiente.

No obstante, el hecho que se expone en este estudio y que no se debe pasar por alto es que, en los sistemas de refrigeración por aire, instalados mayoritariamente en todo el continente, el elemento que se resiente a causa de la climatología es el consumo de electricidad. En estos sistemas evidentemente el consumo de agua es nulo, pero el consumo eléctrico es en todos los casos mayor a los condensadores que emplean agua, y muy superior cuando las temperaturas son elevadas. Por ello, pese a que los consumos directos de agua en el sur del continente resultarán superiores, habrá que tener en cuenta todos los factores.

Un parámetro que también afecta directamente al consumo directo de agua en los condensadores adiabáticos es el espesor de los paneles de relleno (Sohani & Sayyaadi, 2018). El uso de rellenos más gruesos implica un mayor tiempo de contacto entre el aire de admisión y el agua. Por tanto, el aire abandona el relleno con una temperatura menor y una humedad relativa mayor.

En el caso de los condensadores adiabáticos objeto de este trabajo, se estudian tan solo instalaciones con una etapa de enfriamiento evaporativo directo, sin una previa ni posterior de enfriamiento evaporativo indirecto. Al contar con una sola etapa, en ella el aire debe alcanzar necesariamente la temperatura de bulbo húmedo. Es recomendable por tanto buscar el valor mínimo de espesor que permita alcanzar las condiciones de temperatura buscadas sin un consumo excesivo, tanto de agua como de electricidad, este último asociado a las pérdidas de carga del aire a su paso por los paneles de preenfriamiento (Figura 21).

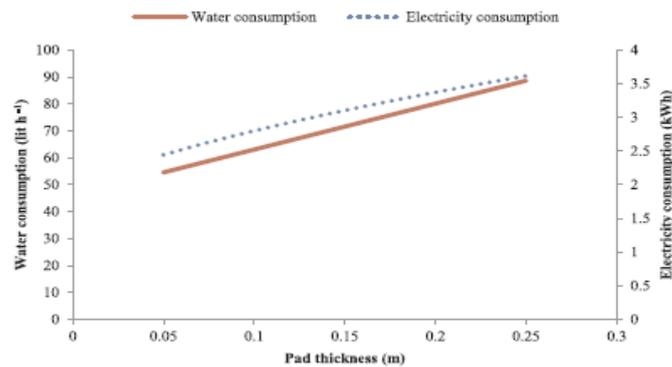


Figura 21: Relación del espesor del relleno con el consumo de agua en condensadores adiabáticos. Fuente: (Sohani & Sayyaadi, 2018)

Otro factor que influye sobre los consumos, tanto de agua como de electricidad, es la velocidad del aire de admisión en el sistema. Con una mayor velocidad del aire en la entrada, las pérdidas de carga al atravesar los paneles de preenfriamiento serán mayores y por consiguiente la eficiencia empeorará.

Esta velocidad dependerá del caudal de aire que se proyecte para atravesar los ventiladores del equipo, el cual será constante e independiente de la carga que se le requiera a la enfriadora. Por tanto, será conveniente buscar un punto intermedio entre los mayores costes de instalación de ventiladores grandes y los costes de operación de ventiladores menores que trabajen con mayores velocidades (Figura 22).

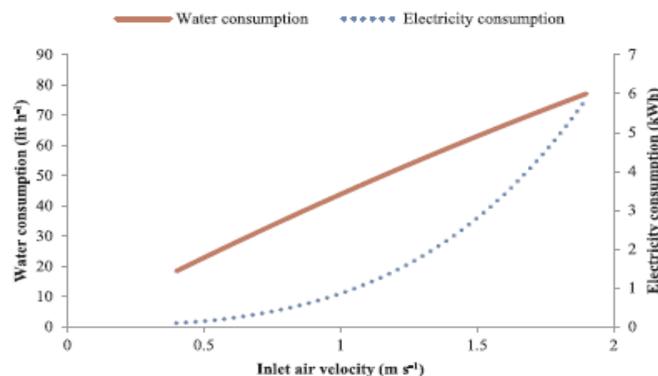


Figura 22: Relación de la velocidad del aire en la admisión con el consumo de agua en condensadores adiabáticos. Fuente: (Sohani & Sayyaadi, 2018)

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

El uso de agua in situ se puede calcular a partir del incremento de humedad del flujo de aire de impulsión empleando el diagrama psicrométrico (Pistochini & Modera, 2011). Observando la Figura 23, a medida que el agua se evapora, el aire se mueve desde el estado A hasta el B aumentando su humedad y reduciendo su temperatura de bulbo seco, mientras la temperatura de bulbo húmedo se mantiene constante.

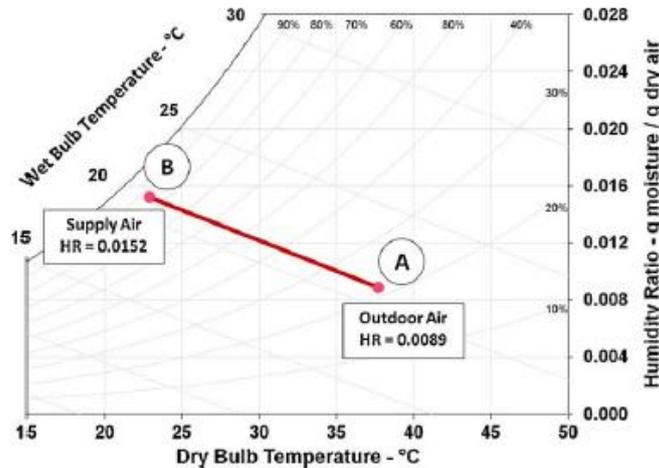


Figura 23: Proceso psicrométrico desarrollado en el enfriamiento evaporativo directo. Fuente: (Pistochini & Modera, 2011)

En el proceso de humidificación adiabática, el consumo de agua dependerá de la diferencia de humedades específicas entre el estado inicial y el estado final de la corriente de aire, además de influir el volumen específico del agua saturada en el estado final.

Otros autores, como (Sohani & Sayyaadi, 2018), comentan en la misma línea que la cantidad de agua consumida es igual al agua evaporada, dado que en los sistemas de enfriamiento evaporativo directo no es habitual encontrar arrastre de gotitas que podría suponer un consumo extra.

$$WC_{DEC} = \frac{\rho_{in,DEC} \times Q_{in,DEC} \times (\omega_{out,DEC} - \omega_{in,DEC})}{\rho_w} \quad (11)$$

La Ecuación (11) refiere el mismo método de cálculo del consumo hídrico, dependiendo fundamentalmente del flujo másico de aire que atraviesa los ventiladores y la diferencia de humedades específicas entre la entrada y la salida de los paneles de preenfriamiento. Además, se incluyen en las expresión las densidades del aire y el agua, cuya relación se puede aproximar como 1/1000.

Según recopilan en su trabajo (Krarti & Aldubyan, 2021), numerosos análisis han tratado de evaluar el consumo de agua en distintos sistemas de acondicionamiento de aire. En particular, se señala que la eficiencia en este sentido en enfriadores evaporativos se expresa habitualmente en términos de enfriamiento proporcionado por litro de agua consumido (MJ/L), y varía entre 0.4 MJ/L y 2 MJ/L en función de las especificaciones del sistema y sus condiciones de operación.

Estos valores equivalen a un intervalo de entre 0,11 kWh/L y 0,55 kWh/L. Presentándolo de forma inversa, significa un consumo de entre 1,8 y 9 litros de agua por kilovatio-hora de enfriamiento aportado. Estos valores, no obstante, pueden variar ampliamente y dependen de la antigüedad de los sistemas, así como de su tecnología de funcionamiento, pues se incluyen equipos de enfriamiento evaporativo directo con relleno, con spray, indirecto, mixto, etc.

Los sucesivos trabajos de (Zhang et al., 2017, 2018) llevan a cabo un exhaustivo estudio de los consumos de agua y de energía eléctrica, en sistemas de condensación tanto por aire como adiabáticos, entre otros, calculando y comparando sus valores bajo diferentes condiciones de temperatura seca y humedad relativa. Además, se realiza un análisis económico en función de distintos ratios de precio entre agua y electricidad.

Entre otras conclusiones, se evidencia que los condensadores por aire tienen un consumo energético muy superior. Dado que el calor específico del aire es muy inferior al del agua, una enfriadora por aire necesita más aire para cubrir las mismas necesidades de refrigeración que un sistema con preenfriamiento que reduce la temperatura del aire hasta cerca de la de bulbo húmedo. Esto conlleva un consumo muy superior en los ventiladores de las condensadoras por aire. En cuanto al consumo de agua, en el caso de los condensadores por aire es nulo y en los condensadores adiabáticos aumenta aproximadamente de forma proporcional a la temperatura ambiente.

A partir de la base expuesta y de la literatura existente, el cálculo relativo al consumo de agua en condensadores adiabáticos se realiza en el presente trabajo del siguiente modo: en primer lugar, se toma como punto inicial de entrada a los paneles de preenfriamiento el correspondiente a la temperatura y humedad registradas durante cada hora a lo largo de un año. Estas se han obtenido tal y como se ha mostrado con anterioridad, a partir de las bases de datos de EnergyPlus para cada zona climática del continente europeo.

Partiendo de dicho punto, con el uso del diagrama psicrométrico se traza el proceso de humidificación adiabática hasta alcanzar un punto cercano a la temperatura de saturación (eficiencia de 0,9 en la humidificación). Por otra parte, se halla el flujo másico a partir del dato de caudal de aire que atraviesa los ventiladores, presente en catálogos de los fabricantes, y también se halla el volumen específico del aire saturado que corresponde aproximadamente al estado de salida del flujo de aire. Finalmente, tan solo es necesario

realizar el producto del flujo másico por la diferencia de humedades específicas entre el punto inicial y el final, obteniendo el consumo directo de agua por equipo y por hora a lo largo de todo el año.

7.1. Caso de estudio: consumo de agua directo

En primer lugar, se han hallado la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa de cada hora a lo largo del año en una ciudad representativa de cada subclima que compone el mapa climático de Europa. Para cada una de las horas, el procedimiento de cálculo ha sido el siguiente. Por ejemplo, para una fecha y hora dadas en el clima Csa las condiciones iniciales (temperatura, humedad relativa y humedad específica) son las siguientes (Tabla 13):

Tabla 13: Condiciones iniciales en una hora determinada. Fuente: Elaboración propia

Fecha y hora	Tª BS (°C)	% HR	x (g/kg)
21/07 13:00	29,8	46%	12,28

Después, con el diagrama psicrométrico (Figura 24) y asumiendo una eficiencia de humidificación adiabática de 0,9, se han obtenido las condiciones finales de la Tabla 14, correspondientes a un punto próximo a la saturación.

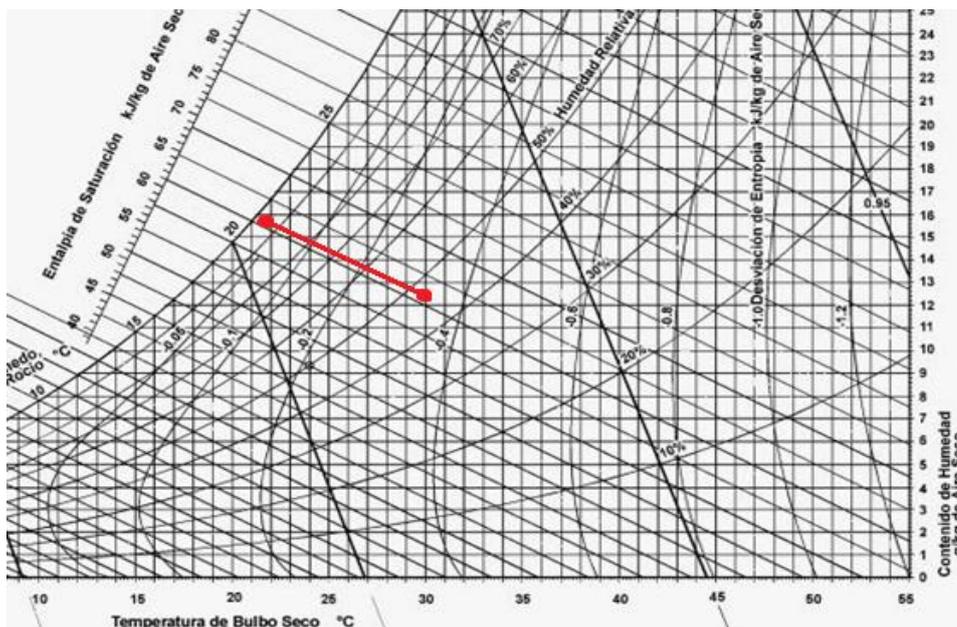


Figura 24: Proceso de humidificación adiabática desarrollado en el aire que atraviesa los paneles de preenfriamiento. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Condiciones finales tras el preenfriamiento adiabático en una hora determinada. Fuente: Elaboración propia.

Periodo	Tª Fin	% HR	x (g/kg)	Vol. específico
21/07 13:00	20,9	94%	16,18	0.854 m ³ /kg

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

Por tanto, la diferencia de humedades específicas será la mostrada en la Tabla 15:

Tabla 15: Diferencia en las humedades específicas en el inicio y el fin del proceso de preenfriamiento adiabático en una hora determinada. Fuente: elaboración propia.

Periodo	x BS (g/kg)	x Fin (g/kg)	Δx (g/kg)
21/07 13:00	12,28	16,18	3,90

A continuación, es necesario conocer el caudal de aire total por los ventiladores de cada enfriadora. En el caso de estudio se ha seleccionado una enfriadora de 150 kW de potencia de refrigeración con un caudal de aire según el catálogo del fabricante de 14,33 m³/s.

7.1.1. Consumo directo de agua por hora:

Aplicando las expresiones (6) y (7) al caso de estudio planteado, y contando con los datos de los equipos, ya es posible hallar el flujo másico de aire húmedo y a continuación el consumo directo de agua.

$$\dot{m} = 14,33 \frac{m^3}{s} * \frac{1}{0,854 \frac{m^3}{kg}} = 16,79 \frac{kg}{s} \text{ de aire}$$

$$C_{WD} = 16,79 \frac{kg}{s} * 3,9 \frac{g}{kg} * \frac{3600s}{1h} * \frac{1kg}{1000g} =$$

$$= \mathbf{236 \text{ litros consumo horario CON panel}}$$

Este procedimiento de cálculo se ha repetido para las 8760 horas que componen un año, con sus correspondientes condiciones de temperatura y humedad ambiente, para finalmente obtener un resultado del consumo de agua directo en cada uno de los subclimas presentes en Europa. A su vez, se ha repetido para cada una de dichas regiones climáticas, obteniendo una simulación del consumo directo horario de los equipos en función del clima en el que se encuentran.

7.1.2. Consumo horario global de agua.

Una vez hallados los consumos tanto indirecto como directo para cada hora de funcionamiento de los equipos de refrigeración, es posible conocer el consumo global asociado a cada tipo de tecnología y establecer una comparación. Para el caso de estudio ejemplificado, en una hora cualquiera con un clima Csa situado en España, los resultados hallados tras aplicar la ecuación (8) se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16: Consumo global de agua en condensadoras por aire y condensadores adiabáticos en una hora determinada.
Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Fecha y hora	Temp. BS (°C)	EER	Consumo indirecto (L)	Consumo directo (L)	Consumo global (L)
Aire	21/07 13:00	29,8	4,31	557	0	557
Adiabático			5,98	401	236	637

Para la hora ejemplificada, el consumo de agua global tan solo es un 14% superior en el condensador adiabático. Además, es destacable que el consumo indirecto es muy superior al directo. No obstante, a fin de comentar resultados más completos, a continuación, se muestra el estudio a lo largo de todo el año para cada país de Europa.

8. Resultados y discusión

Tal y como se ha descrito en la metodología y en los apartados anteriores, se ha desarrollado el cálculo del consumo de agua directo e indirecto para cada uno de los países de Europa. Para ello se han tenido en cuenta los parámetros de funcionamiento de los equipos, las diferentes climatologías, las estructuras de generación de energía eléctrica y las demandas anuales de refrigeración para un caso de estudio propuesto.

Según el caso propuesto, en un volumen con cargas internas moderadamente elevadas debidas a equipos, iluminación, ocupación, ventilación, etc. existe demanda de refrigeración durante todo el año, si bien varía acusadamente entre las distintas zonas climáticas en las que se puede situar. En la Tabla 17 se resume la demanda media por hora que presenta el espacio definido a lo largo del año, viéndose afectada por las condiciones exteriores.

Tabla 17: Evolución de la demanda de frío a lo largo del año en diferentes climas en el caso de estudio propuesto.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Csa	49	53	58	62	69	75	79	78	72	63	55	49
Csb	50	55	60	65	67	72	73	73	69	62	53	51
Cfa	38	43	52	60	69	74	75	74	67	58	46	39
Cfb	40	43	49	56	63	68	71	70	61	53	44	40
Dfb	34	36	45	55	64	67	69	67	58	49	40	35
Dfc	28	31	38	49	60	66	69	64	52	43	34	30
BSk	47	51	59	62	69	75	81	79	70	61	53	46
BSh	57	59	62	69	75	80	83	83	80	72	65	58

La misma evolución ha sido representada de forma gráfica en la Figura 25, observándose una mayor diferencia en las demandas de los meses más fríos.

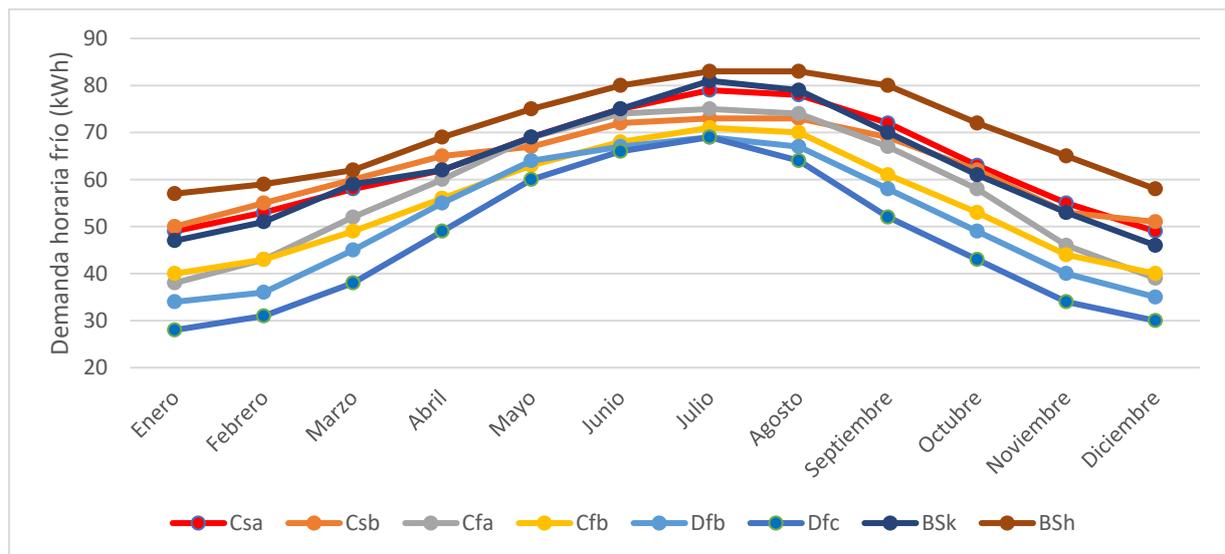


Figura 25: Evolución de la demanda de frío a lo largo del año en diferentes climas.

A continuación, se han representado gráficamente los resultados del cálculo de consumo global de equipos por aire y adiabáticos en cada uno de los países estudiados a partir de las demandas térmicas, desglosando la porción de consumo de agua directa y la parte indirecta en cada uno de ellos. Se presenta además para cada nación el dato hallado previamente de consumo de agua asociado a la generación de energía eléctrica, ya que tiene un peso fundamental en el resultado final.

Los países han sido agrupados en función de la zona climática que predomina en sus territorios, existiendo 8 climas principales que pueden representarlos a todos: Csa, Csb, Cfa, Cfb, Dfb, Dfc, BSh y BSk.

8.1. Resultados en la climatología Csa

En países mediterráneos como España, Turquía, Grecia, Albania y Malta predomina este subclima, caracterizado por veranos secos y calurosos con temperaturas medias por encima de 22°C e inviernos húmedos y suaves. Estas condiciones propician una demanda y unos consumos elevados, especialmente en los meses estivales.

La Figura 26 muestra cómo el caso de Albania destaca sobre todos los demás con un consumo indirecto muy superior. Esto es debido a la composición de su mix eléctrico, basado casi totalmente en la energía hidroeléctrica, fuente con una gran tasa de consumo hídrico por unidad de energía eléctrica generada.

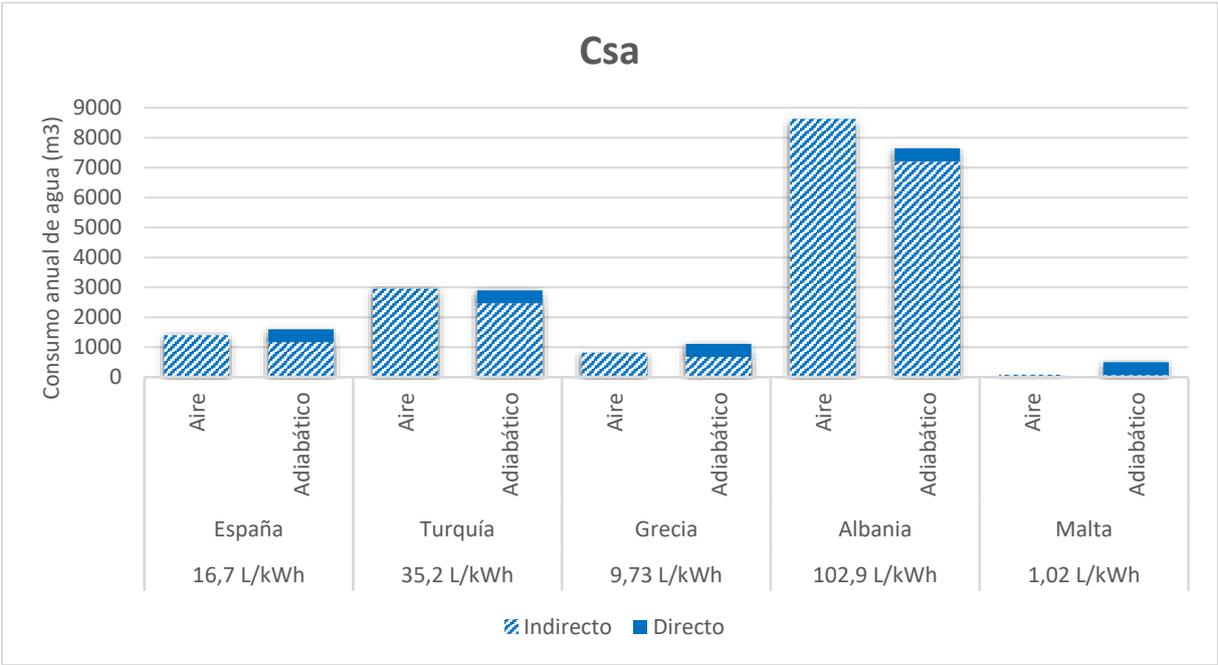


Figura 26: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Csa, desglosando en consumo directo e indirecto.

A continuación, en la Figura 27 se han representado los mismos datos en una escala que permite analizar mejor el resto de los países, cortando el caso que sobresale de manera excepcional. El consumo de agua directo anual para la máquina enfriadora seleccionada de 150 kW y equipada con paneles de preenfriamiento adiabático es de unos 430 m³ en este clima. En casos con un consumo indirecto muy reducido, como lo es Malta por su estructura de generación eléctrica a partir de gas, es claramente más indicado un equipo de condensación por aire. Sin embargo, en los casos de Turquía y Albania, con gran dependencia de la energía hidroeléctrica, el consumo global de agua es inferior en caso de seleccionar un sistema adiabático.

El estudio con las condiciones particulares de España muestra que el gasto de agua es ligeramente superior en el caso de la instalación de paneles adiabáticos, si bien resulta apenas un 14% de diferencia, por lo que dependiendo de las condiciones puede merecer la pena el ahorro de energía eléctrica a costa de un consumo algo mayor de agua.

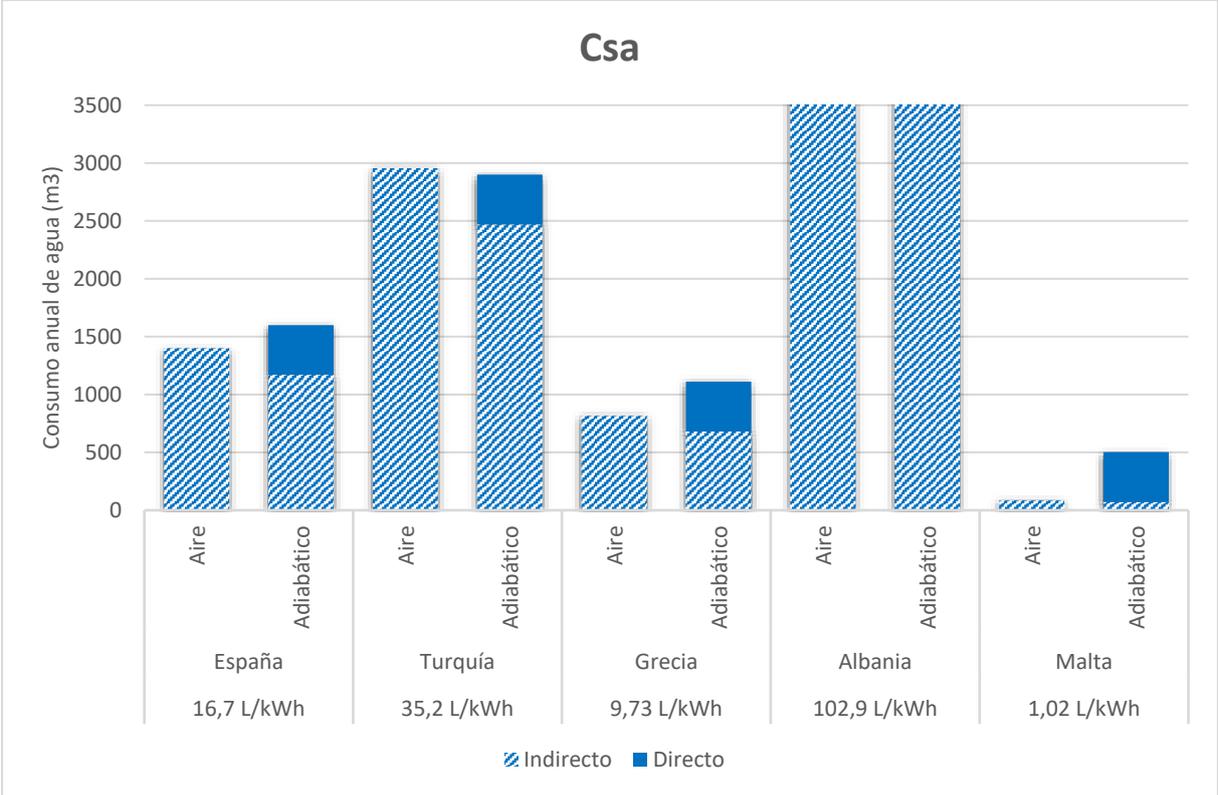


Figura 27: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Csa, desglosados los consumos directo e indirecto.

8.2. Resultados en la climatología Csb

El Csb es un clima mediterráneo similar al Csa, si bien se caracteriza por ser algo más estable y menos extremo, con veranos secos y frescos e inviernos suaves. Por ello, sus demandas de refrigeración pueden llegar a ser algo superiores a las de Csa en los meses de invierno, pero en los meses más calurosos son inferiores.

En este subclima se puede encuadrar Portugal, además, está presente en otras áreas de la Península como Galicia y el occidente de Castilla y León. El consumo de agua directo anual para la máquina enfriadora seleccionada de 150 kW y equipada con paneles de preenfriamiento adiabático es de unos 415 m³ en este clima.

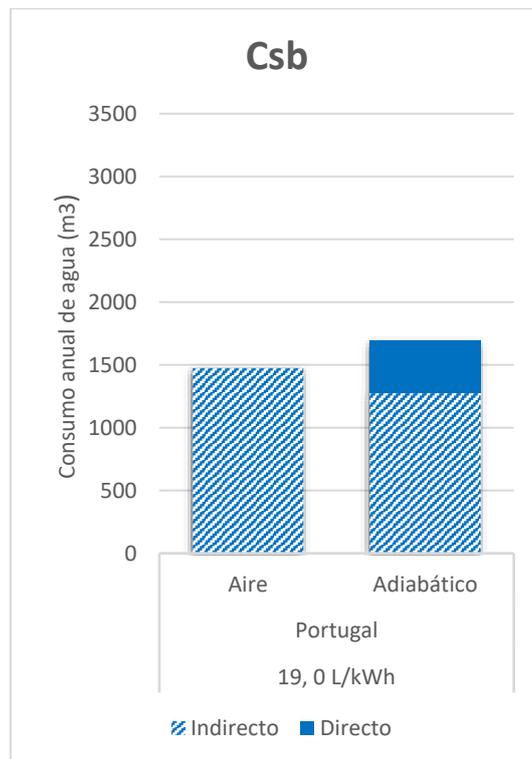


Figura 28: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticas en el clima Csb, desglosados los consumos directo e indirecto.

Globalmente, el consumo de agua con el uso de una condensadora por aire resulta en 1474 m³ anualmente, mientras con un condensador adiabático asciende hasta 1690 m³, lo que supone una diferencia del 15%, no demasiado acusada (Figura 28). El ahorro energético, sin embargo, resulta en torno a un 16% con el uso de los paneles adiabáticos, por lo que dependiendo de la disponibilidad de agua en el emplazamiento concreto de la máquina y del coste de la energía puede resultar mejor opción uno u otro tipo de equipo.

8.3. Resultados en la climatología Cfa

El Cfa es un clima considerado subtropical, por lo que no se encuentra en demasiados territorios europeos. Está caracterizado por veranos cálidos y húmedos, e inviernos frescos con precipitaciones moderadas. Las demandas de refrigeración que se encuentran en este clima son considerablemente inferiores a las vistas en Csa y Csb en los meses más fríos del año, mientras que en temporadas cálidas sus valores son muy similares.

Este subclima se puede encontrar en buena parte de Italia, además de encontrarse en menor medida en áreas balcánicas como Serbia o Croacia. El consumo de agua directo anual para la máquina enfriadora seleccionada de 150 kW y equipada con paneles de preenfriamiento adiabático es de unos 436 m³ en este clima.

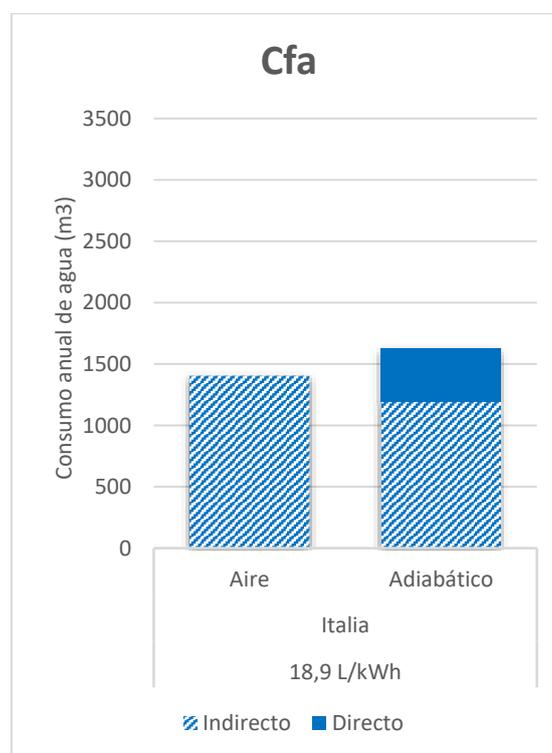


Figura 29: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Cfa, desglosados los consumos directo e indirecto.

Globalmente, el consumo de agua con el uso de una condensadora por aire resulta en 1404 m³ anualmente, mientras con un condensador adiabático asciende hasta 1626 m³, lo que supone una diferencia del 16% (Figura 29). El ahorro de energía con el preenfriamiento adiabático es aproximadamente un 18%, por lo que la situación es similar a la del caso del clima Csb.

8.4. Resultados en la climatología Cfb

Bastante más extendido y común en Europa que los vistos previamente, el Cfb es uno de los climas característicos del continente. Se puede encontrar en los países del centro y occidente como Francia, Reino Unido, Países Bajos, Bélgica, Irlanda y Luxemburgo. Todos estos territorios presentan una gran influencia del Océano Atlántico, con veranos frescos y precipitaciones durante todo el año.

La demanda de refrigeración en este clima se presenta considerablemente menor que en climas como Csa, Csb y Cfa, pues las temperaturas medias a lo largo de todo el año se encuentran por debajo. El consumo de agua directo anual para la máquina enfriadora seleccionada de 150 kW y equipada con paneles de preenfriamiento adiabático es de unos 362 m³ en este clima.

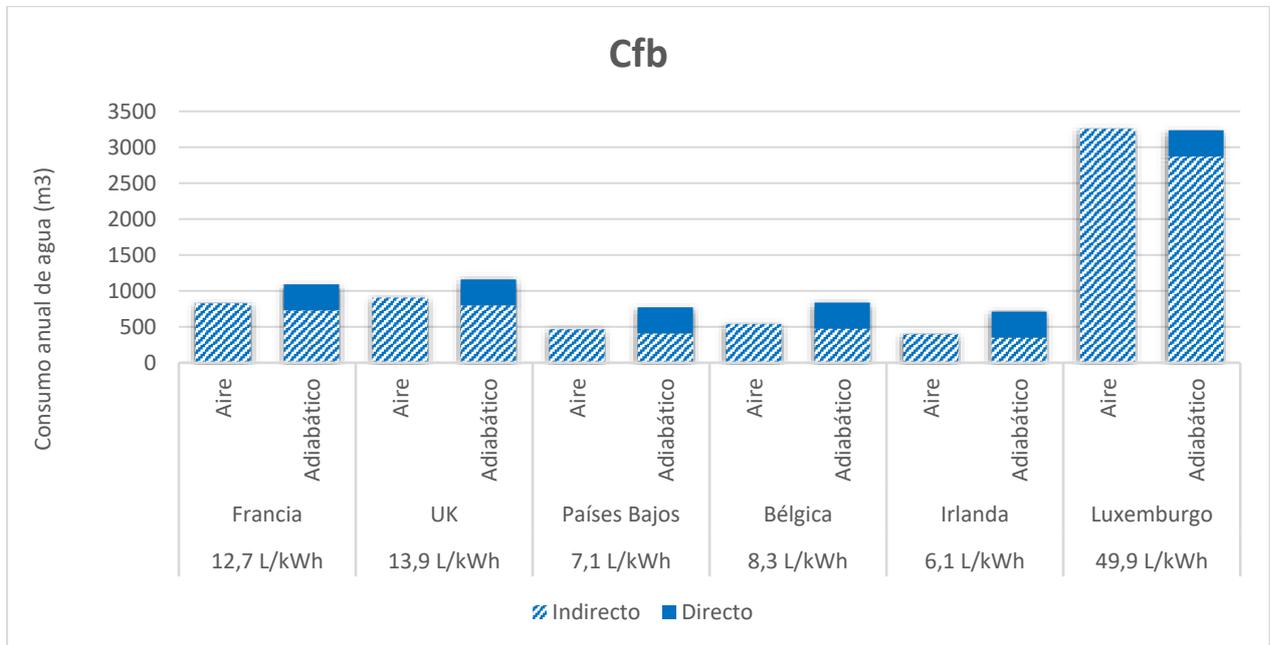


Figura 30: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Cfb, desglosados los consumos directo e indirecto.

Los países situados en esta región climática ya presentan generalmente resultados más desfavorables para el empleo de los condensadores adiabáticos. El peso del consumo directo sobre el total representa una porción más grande. Esto es debido principalmente a que el consumo indirecto, por lo general, es más reducido que el de climas cálidos, dado que el rendimiento de los equipos es mejor a temperaturas moderadas. En el caso de Francia, por ejemplo, el consumo global de una condensadora por aire resulta en 826 m³ anualmente, mientras con un condensador adiabático es un 16% superior (Figura 29). La excepción es Luxemburgo, que con un mix energético dominado por la energía hidroeléctrica presenta consumos indirectos muy elevados.

8.5. Resultados en la climatología Dfb

El clima con mayor presencia en Europa es el Dfb, dominando todo el centro y el este del continente desde Alemania hasta Rusia, incluyendo las regiones alpinas, los Balcanes, los países Bálticos... Este clima continental se caracteriza por las precipitaciones a lo largo de todo el año, inviernos fríos y veranos templados.

La demanda de refrigeración es notablemente inferior a la del Cfb, especialmente en invierno. El consumo de agua directo anual para la máquina enfriadora seleccionada de 150 kW y equipada con paneles de preenfriamiento adiabático es de unos 319 m³ en este clima. En estas condiciones el resultado en cuanto a consumo global es siempre más favorable a las condensadoras por aire, puesto que las bajas temperaturas medias permiten un rendimiento aceptable de estos equipos. No obstante, la influencia del mix eléctrico siempre es clave, de modo que mientras países como Suiza o Austria tan solo presentan un consumo de un 5% mayor con condensadores adiabáticos, el promedio es de un 49% superior (Figura 31).

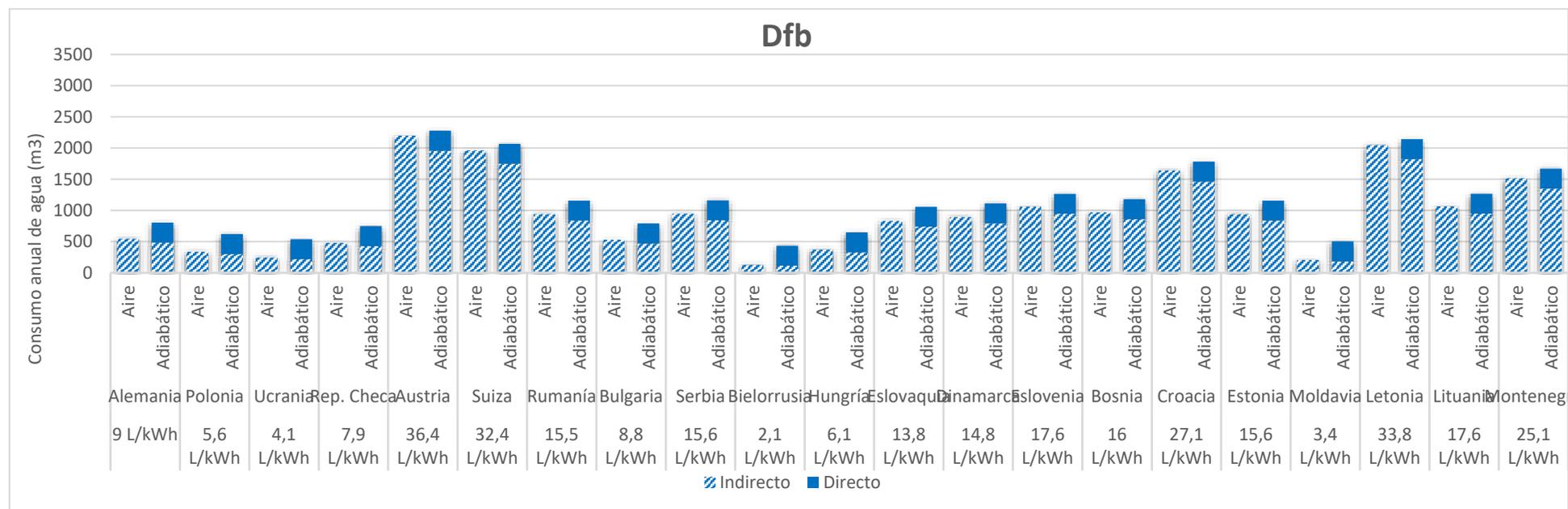


Figura 31: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en el clima Dfb, desglosados los consumos directo e indirecto.

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

8.6. Resultados en la climatología Dfc

El clima subpolar húmedo Dfc es un clima continental, al igual que el Dfb, extendido a lo largo de las latitudes más altas de todo el mundo. En el caso de Europa se puede encontrar en Escandinavia y en Islandia. Se caracteriza por veranos breves y frescos e inviernos muy fríos, con precipitaciones en forma de nieve.

La demanda de refrigeración en este clima es la más baja de todas las estudiadas, tal y como podía esperarse, especialmente en invierno. El consumo de agua directo anual para la máquina enfriadora seleccionada de 150 kW y equipada con paneles de preenfriamiento adiabático apenas alcanza los 254 m³ en este clima. En estas condiciones de frío y en muchos casos también elevada humedad, el resultado de consumo global es siempre más favorable a las condensadoras por aire, que rinden adecuadamente. Sin embargo, llama la atención que los consumos globales son generalmente más altos en este clima Dfc que en el Dfb. Esto se debe a la gran influencia de los mix eléctricos de estos países. Mientras que el consumo directo sí es inferior debido a las condiciones ambientales, el consumo indirecto en las naciones escandinavas es muy elevado dada la influencia de las fuentes de energía hidroeléctrica y de la biomasa (Figura 32).

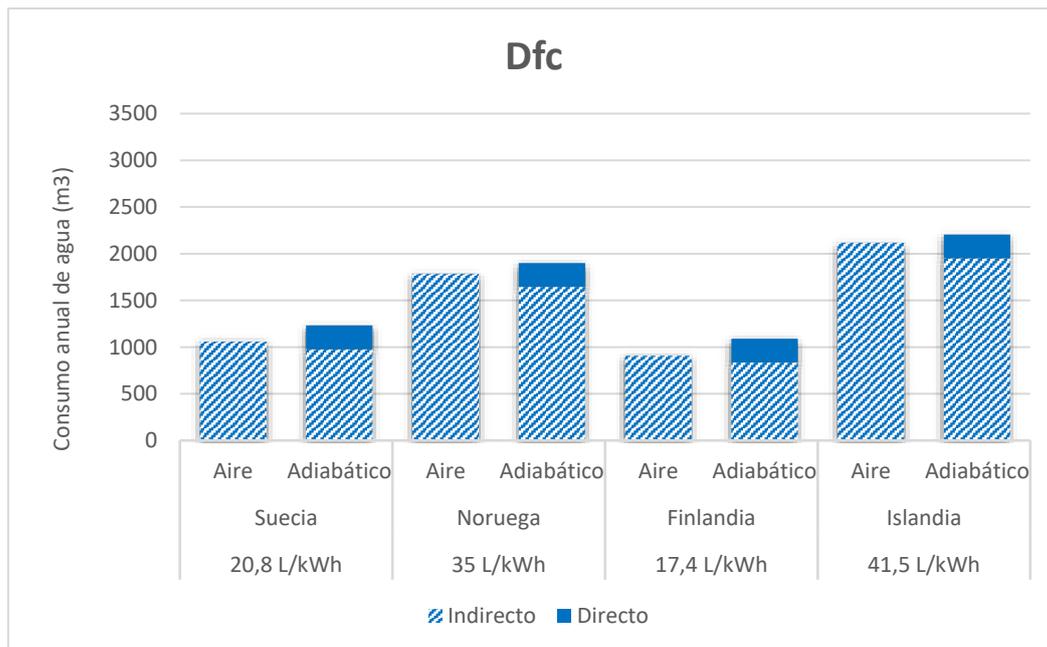


Figura 32: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticas en el clima Dfc, desglosados los consumos directo e indirecto.

En cualquier caso, pese a que las diferencias en cuanto a consumo global no sean muy grandes, no tiene demasiado sentido el uso de paneles de preenfriamiento, puesto que las condensadoras por aire tienen rendimientos muy razonables en estas condiciones exteriores y durante gran parte del año se puede satisfacer la demanda incluso solamente con free cooling.

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

8.7. Resultados en las climatologías BSk y BSh

Por último, en Europa también se pueden encontrar pequeñas zonas dominadas por climas clasificados como secos, tales como BSk y BSh. Estos son más propios de regiones del continente africano y asiático, pero en áreas del mediterráneo se pueden ver. De hecho, las predicciones (Beck et al., 2018) afirman que en un futuro no muy lejano este tipo de subclimas se harán más presentes en Europa.

Ambos climas se caracterizan por sus bajas precipitaciones, contando el BSk con temperaturas medias inferiores a las del BSh, pero siendo ambas elevadas. El primero de ellos es predominante en Macedonia, y en España puede encontrarse en zonas del interior de la península como Castilla-La Mancha y Aragón. El BSh se encuentra en algunas islas del Mediterráneo como Chipre.

La demanda de refrigeración en estos climas es elevada al ser muy secos y con altas temperaturas. El BSk presenta resultados de demanda muy similares al Csa, mientras que el BSh es más cálido y requiere mayores aportes energéticos. El consumo de agua directo anual para la máquina enfriadora seleccionada de 150 kW y equipada con paneles de preenfriamiento adiabático llega hasta los 641 m³ y 690 m³ en BSk y BSh, respectivamente, valores que duplican e incluso casi triplican a algunos de los casos vistos previamente.

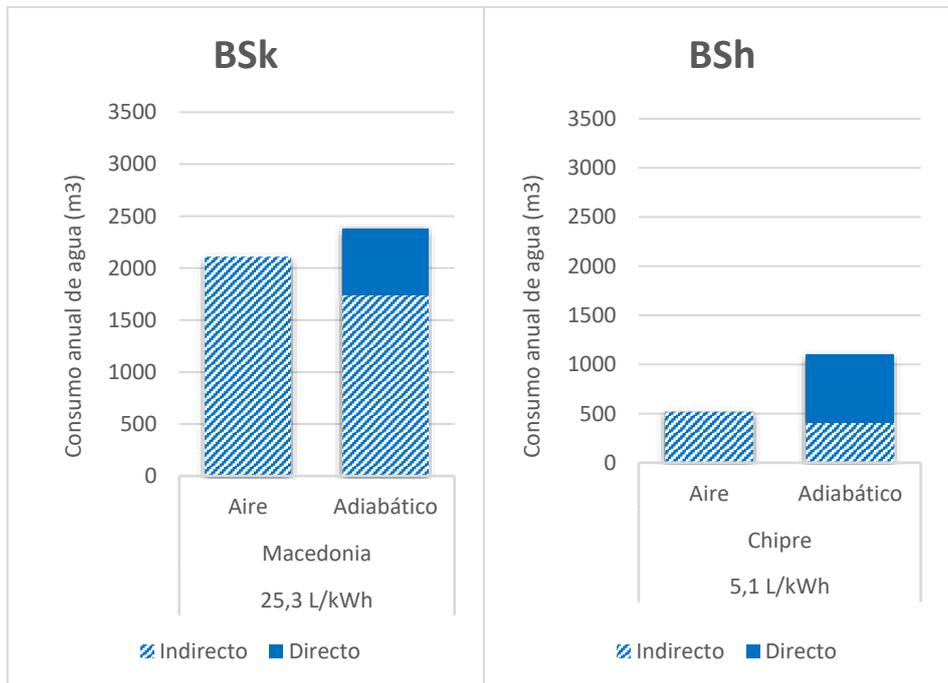


Figura 33: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en los climas BSk y BSh, desglosados los consumos directo e indirecto.

Globalmente, el consumo de agua con el uso de una condensadora por aire en el caso de Macedonia con un clima BSk resulta en 2110 m³ anualmente, mientras con un condensador

adiabático asciende hasta 2382 m³, lo que supone una diferencia no demasiado acusada, del 13% (Figura 33). De esta similitud en el resultado en cuanto a gasto de agua global puede plantearse que merezca la pena el uso de un sistema adiabático dado el considerable ahorro de energía eléctrica, de en torno al 21%.

En el caso de Chipre con un clima BSh, el consumo asociado al funcionamiento de una condensadora por aire es de 519 m³, mientras con un condensador adiabático es de 1102 m³. Este último caso se ve claramente afectado por el hecho de que el mix eléctrico de Chipre está ampliamente dominado por las centrales de fuel-oil, cuyo consumo hídrico asociado es relativamente bajo.

8.8. Comparativa de países con mix similar en distintos climas

La presentación de los datos de consumo de todos los países proporciona información interesante en cuanto a los territorios en los que conviene más la instalación de uno u otro tipo de equipos de refrigeración. Además, da una idea de la dimensión que representa el consumo de agua asociado a la electricidad que consumen las máquinas, que en la mayoría de los casos supera con creces al agua de consumo directo.

Sin embargo, es complicado discernir qué parte de las diferencias encontradas entre países se debe solo al impacto del clima, dado que las estructuras de generación de electricidad son diferentes en cada caso y tienen un gran peso en el consumo indirecto de los equipos. En España, por ejemplo, el mix eléctrico es muy diverso, con porciones importantes de generación eólica, nuclear y de los ciclos combinados, y en menor medida también de fotovoltaica, hidroeléctrica y otras. Esta compleja composición hace complicado comparar los consumos obtenidos en España con los de algún país similar en mix eléctrico pero situado en otro clima.

Comparando todas las estructuras de las redes eléctricas en Europa, se han encontrado algunos países que guardan gran similitud entre sí, lo que hace posible comparar sus resultados con la única variable del clima entre ellos, a fin de conocer la influencia del clima en los consumos globales de agua.

8.8.1. Reino Unido y Alemania

Los mix eléctricos de Reino Unido y Alemania son muy semejantes (Figura 34), ambos cuentan con una fracción de energía producida a partir de combustibles fósiles ligeramente superior a la mitad, seguida de la eólica con casi una cuarta parte del total, y completada con la energía de la biomasa, fotovoltaica y finalmente una pequeña parte de hidroeléctrica.

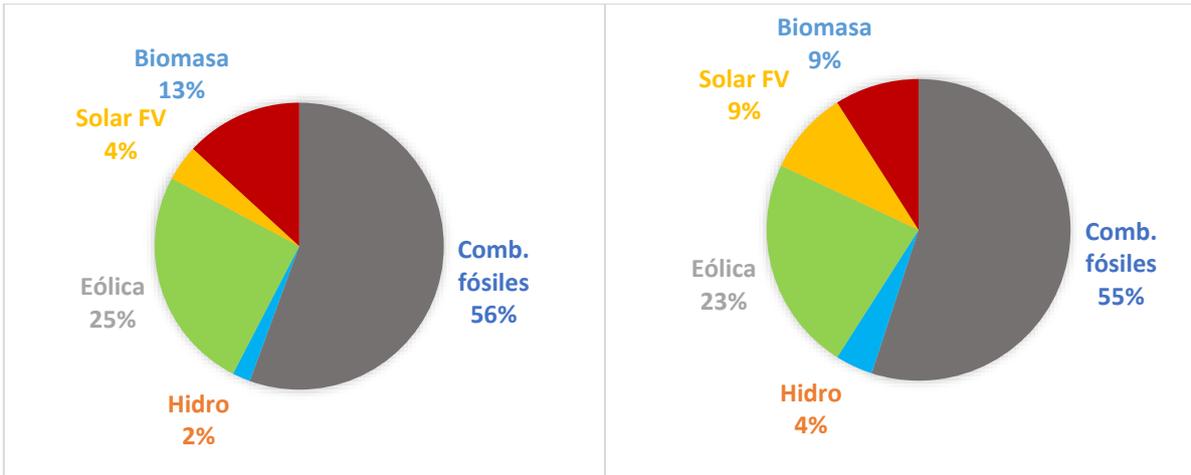


Figura 34: Mix eléctricos de Reino Unido y de Alemania. Fuente de datos: (International Energy Agency, 2022)

Comparando los resultados obtenidos de consumos de agua anuales con el empleo de ambos sistemas de refrigeración (Figura 35):

- En Reino Unido, con un clima Cfb, los consumos globales son de 906 y 1161 m³ en cada tipo de equipos, una diferencia del 28% a favor de las condensadoras por aire.
- En Alemania, con un clima Dfb, los consumos globales son de 546 y 805 m³ en cada tipo de equipos, una diferencia del 47% a favor de las condensadoras por aire.

Con unos mix muy similares, se desprende el resultado esperable de que todos los consumos son superiores en el clima más cálido. Más relevante es el hecho de que la diferencia entre los dos tipos de equipos es considerablemente mayor en el clima más frío. Esto refleja que, a medida que aumentan las temperaturas medias, si bien los consumos tanto directos como indirectos crecen en ambos sistemas, los condensadores adiabáticos incrementan su ventaja competitiva en términos de eficiencia energética.

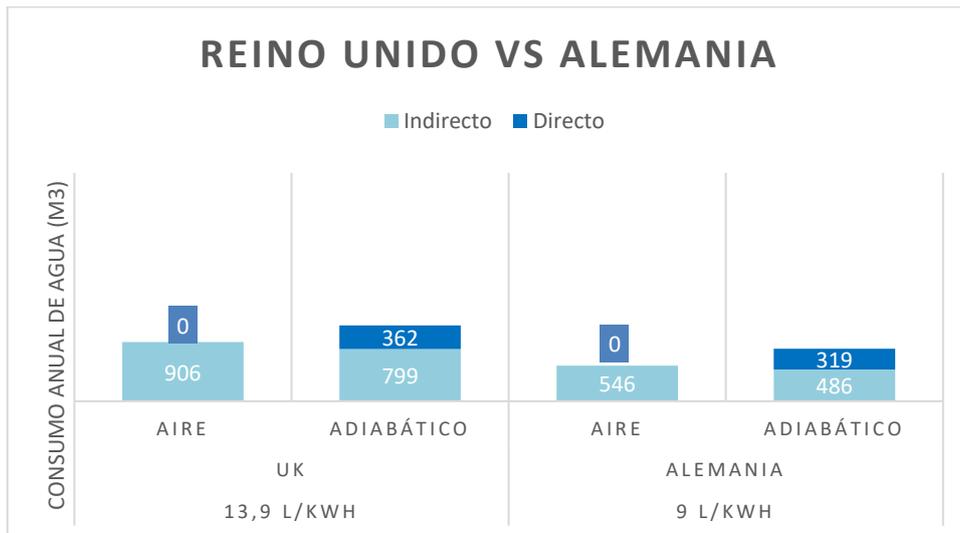


Figura 35: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en Reino Unido y Alemania, desglosados los consumos directo e indirecto.

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

8.8.2. Turquía y Finlandia

Otra pareja de países cuyos sistemas de producción de electricidad son equiparables son Turquía y Finlandia (Figura 36). Salvando las pequeñas diferencias, ambos generan aproximadamente la mitad de su energía a partir de combustibles fósiles, una cuarta parte a partir de la energía hidroeléctrica y el resto es dominado por la eólica y la energía de la biomasa. Sin embargo, ahí terminan sus similitudes, pues se encuentran en climas totalmente diferentes. Por ello son un buen ejemplo para comparar sus consumos de agua.

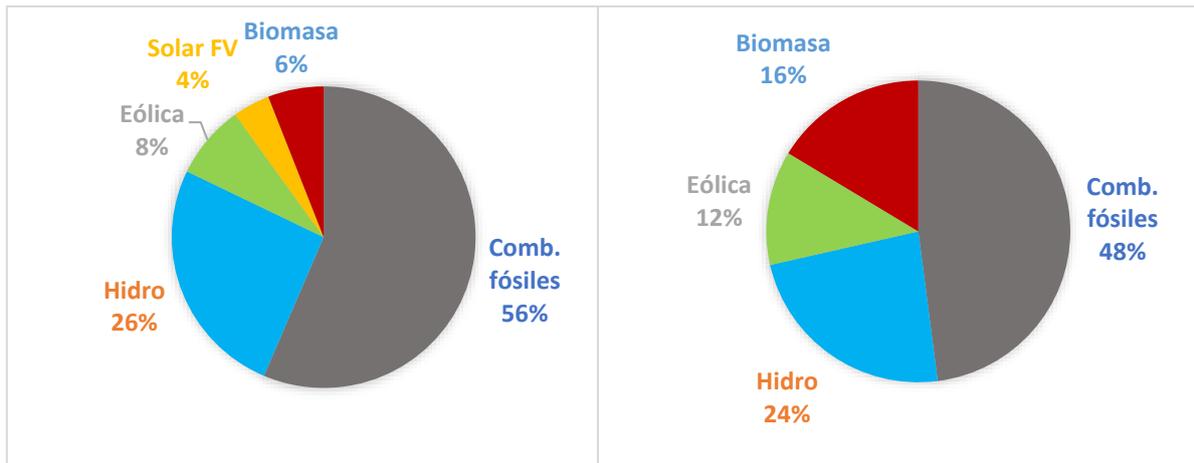


Figura 36: Mix eléctrica de Turquía y de Finlandia. Fuente de datos: (International Energy Agency, 2022)

Comparando los resultados obtenidos de consumos de agua anuales con el empleo de ambos sistemas de refrigeración (Figura 37):

- En Turquía, con un clima predominante Csa, los consumos globales son de 2956 y 2900 m³ en cada tipo de equipos, prácticamente iguales e incluso ligeramente favorables a los condensadores adiabáticos.
- En Finlandia, con un clima Dfc, los consumos globales son de 907 y 1090 m³ en cada tipo de equipos, una diferencia del 20% a favor de las condensadoras por aire.

De estos resultados se deduce, en primer lugar, que evidentemente todos los consumos son muy superiores en el clima Csa, que cuenta con unas condiciones ambientales más adversas para la refrigeración. Además, al igual que en la comparación anterior, el clima más frío cuenta con unas características que hacen más favorable el empleo de condensadoras por aire, mientras que en el más caluroso es incluso menor el consumo de los equipos adiabáticos al mejorar considerablemente su rendimiento a altas temperaturas. Por último, se puede señalar que los consumos indirectos en ambos casos son muy superiores a los vistos previamente. Puede llamar la atención el mayor consumo de agua en Finlandia que en Alemania o Reino Unido, no obstante, debido a la importante presencia de la energía hidroeléctrica como fuente.

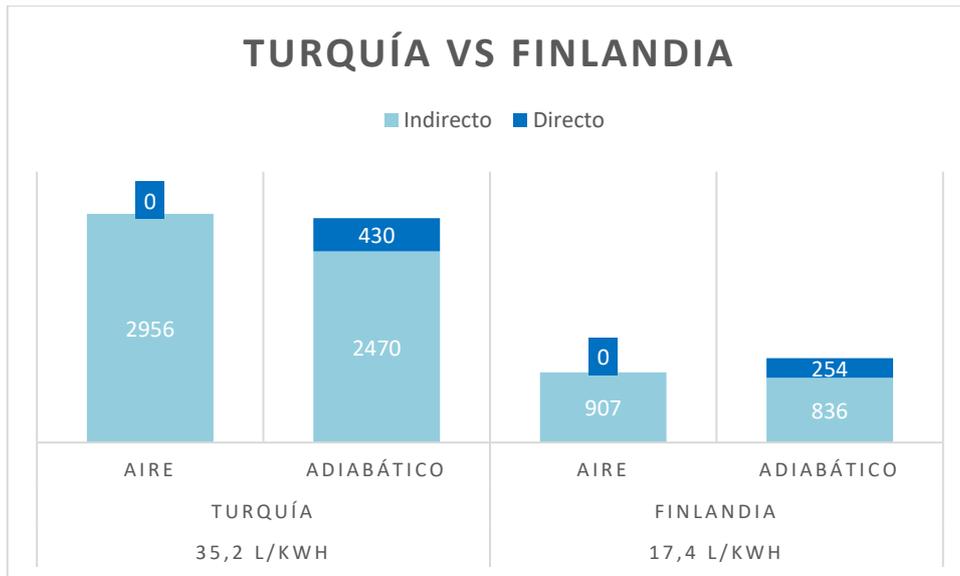


Figura 37: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en Turquía y Finlandia, desglosados los consumos directo e indirecto.

8.8.3. Bosnia y Macedonia

Por último, también se ha encontrado una gran similitud entre los mix eléctricos de las repúblicas balcánicas de Bosnia y Herzegovina y Macedonia del Norte (Figura 38). Ambas cuentan con estructuras de generación poco diversificadas, dominadas por los combustibles fósiles (especialmente carbón) y complementadas con una importante porción de energía hidroeléctrica. En los últimos años están desarrollando paulatinamente otras fuentes de apoyo como la eólica, aunque aún no tienen un peso significativo. Pese a ser territorios cercanos entre sí, sus climas predominantes son diferentes.

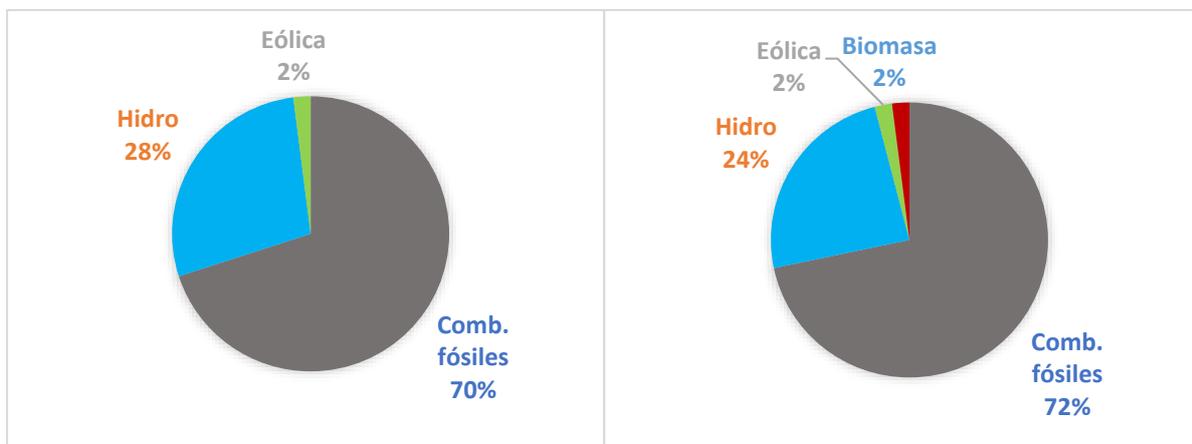


Figura 38: Mix eléctricos de Bosnia y de Macedonia. Fuente de datos: (International Energy Agency, 2022)

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

Comparando los resultados obtenidos de consumos de agua anuales con el empleo de ambos sistemas de refrigeración (Figura 39):

- En Bosnia, con un clima Dfb, los consumos globales son de 955 y 1179 m³ en cada tipo de equipos, una diferencia del 22% a favor de las condensadoras por aire.
- En Macedonia, con un clima BSk, los consumos globales son de 2110 y 2382 m³ en cada tipo de equipos, una diferencia del 12% a favor de las condensadoras por aire.

Continuando en la línea de las comparaciones previas, todos los consumos son muy superiores en el clima BSk, algo esperable dado que sus condiciones ambientales son peores para la refrigeración. Del mismo modo, el clima más frío cuenta con unas características que hacen más favorable el empleo de condensadoras por aire, mientras que en el más caluroso la diferencia en el consumo es notablemente inferior, viéndose influenciado por el mejor rendimiento de los condensadores adiabáticos a altas temperaturas.

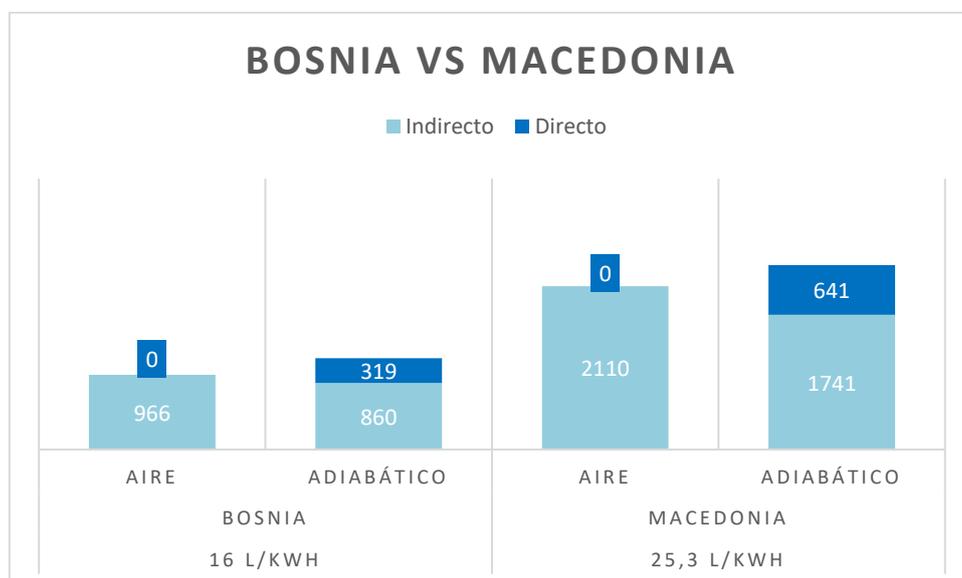


Figura 39: Consumo global anual de agua en condensadoras por aire y adiabáticos en Bosnia y Macedonia, desglosados los consumos directo e indirecto.

En estas comparaciones se ha observado con claridad que, dejando a un lado la influencia del mix eléctrico, las condiciones ambientales tienen un peso fundamental en la idoneidad de uno u otro sistema. Tal y como se puede apreciar, al incrementarse las temperaturas, el consumo indirecto de agua asociado al consumo eléctrico aumenta. Pero no lo hace en igual medida en los condensadores adiabáticos que en los sistemas por aire, sino que en estos últimos el gasto crece más debido al mayor empeoramiento de su eficiencia. De este modo, en climas muy calurosos el consumo global llega a ser muy similar o incluso menor en los equipos con preenfriamiento.

Si bien el condicionante principal que influye sobre los consumos y por tanto sobre la conveniencia de uno u otro sistema por lo general va a ser el mix eléctrico, no hay que dejar

de lado la importancia del clima en que se encuentren tanto los equipos como las centrales de generación de electricidad. Estas comparaciones demuestran que en determinados casos con gran similitud en la estructura de producción eléctrica el resultado en cuanto a consumos globales puede diferir enormemente. Serán más adecuados los condensadores adiabáticos cuando se den las condiciones:

- Clima caluroso y seco. Pese a que esto supone un mayor consumo directo en el equipo, es cuando más mejora su eficiencia energética respecto a las condensadoras por aire, y por consiguiente el consumo indirecto es mucho menor.
- Mix eléctrico dominado por fuentes como la hidroeléctrica o la energía de la biomasa, o con importantes aportaciones de estas. Esto implica unos consumos indirectos muy altos que causan que el consumo directo sea en proporción menos destacado.

En caso de cumplirse ambas condiciones, con gran probabilidad será oportuno el empleo de condensadores adiabáticos en los sistemas de refrigeración. En la actualidad no son demasiados los países de Europa en los que se dan las dos circunstancias, no obstante, la proyección de aumento de temperaturas a nivel global puede cambiar drásticamente la situación.

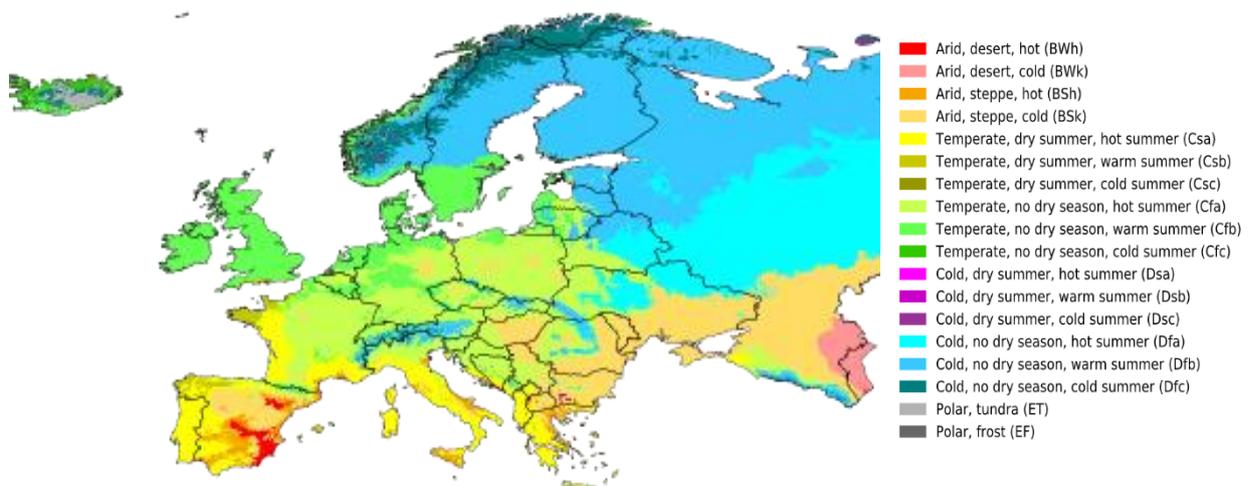


Figura 40: Mapa Koppen-Geiger de Europa previsto para la segunda mitad del siglo XXI. Fuente: (Beck et al., 2018)

Tal y como se aprecia en la Figura 40, se prevé que en las próximas décadas la influencia del cambio climático provoque que la mayor parte de Europa se encuentre entre los climas Csa, Cfa y Bsk, considerablemente más secos y calurosos que los que predominan actualmente. Los climas Cfb y Dfb quedarán relegados a regiones más septentrionales. Esta evolución afectará inevitablemente a los rendimientos de los equipos enfriadores y a sus consumos, tanto directos como indirectos, favoreciendo según los datos expuesto a los condensadores adiabáticos cuanto mayor sea el ascenso térmico.

9. Conclusiones y líneas futuras

- Una de las primeras conclusiones que se extraen de este estudio es la llamativa falta de datos en todo lo relativo al consumo de agua en la generación energética. Tratándose de una materia que cada vez cobra una mayor importancia como lo es la eficiencia en el uso del agua, es de destacar que apenas unos pocos autores han dedicado un análisis en profundidad al empleo de agua en la producción de energía eléctrica. Además, se ha apreciado cierta inconsistencia en la información existente, dado que en algunos casos en la literatura se presentan datos sin citar la metodología llevada a cabo para su obtención. En general, se aprecia una falta de criterios comunes que conduce a diferencias significativas e incluso contradicciones en los resultados de cada uno de los estudios.
- En relación con lo expuesto previamente, se puede afirmar que resulta extremadamente complicado hallar valores de los consumos indirectos asociados a las centrales de producción de energía con precisión. Cada planta generadora tiene unas características particulares, muy rara vez se encuentran centrales exactamente iguales, por lo que el único método totalmente preciso sería estudiar el consumo de cada central en el mundo. Especialmente destacable es el caso de las centrales hidroeléctricas, en cuya investigación se han encontrado diferencias en las tasas de consumo de agua por evaporación de varios órdenes de magnitud entre embalses. Tal y como se ha mencionado en el capítulo correspondiente, estas se pueden atribuir al ratio profundidad-superficie, la radiación solar incidente, la humedad relativa promedio, la velocidad del viento, etc. Por ello los valores aquí presentados, y que resumen toda la literatura existente al respecto, no pueden ser tomados en ningún caso como datos exactos, sino como referencias sujetas a variabilidad debida a multitud de factores.
- Un concepto importante que se menciona en este trabajo, pero cuyo impacto no se estudia en profundidad, es la cantidad de agua captada continuamente del entorno para los procesos de refrigeración de las centrales termoeléctricas. Pese a que no puede considerarse consumo como tal, la masa de agua que requieren de manera constante (de la cual devuelven gran parte al medio) supone un enorme impacto en lugares con recursos hídricos limitados. Por ello tampoco se debe obviar su existencia; mientras que el consumo de agua en la refrigeración de centrales termoeléctricas es relativamente reducido, las captaciones de agua no lo son tanto, variando ampliamente en función de si los sistemas son de lazo abierto o cerrado.

- Tras la recopilación y análisis de los mix eléctricos de todos los países de Europa se puede afirmar que la variabilidad en sus composiciones es total, existiendo combinaciones de todo tipo. Algunos territorios cuentan con una gran diversificación en las fuentes, como puede ser España, donde hay varias fuentes con un peso importante en el sistema. Por el contrario, otras naciones dependen por completo de una única fuente de generación de energía eléctrica, lo que las deja más expuestas y vulnerables a cualquier tipo de problema de suministro. Estas diferencias entre países se deben fundamentalmente a dos razones. En primer lugar, a la disponibilidad de recursos en el propio territorio, ya sean yacimientos de combustibles fósiles, posibilidad orográfica e hidrológica de construir centrales hidroeléctricas, condiciones favorables a las nuevas renovables, etc. En segundo lugar, el grado de desarrollo de cada país influye en su capacidad de modernizar y diversificar sus estructuras de generación eléctrica, viéndose en las naciones más empobrecidas sistemas menos eficientes, ecológicos y con menor seguridad de suministro.
- La mencionada variabilidad en los mix eléctricos resulta ser clave en los resultados de consumo de agua. El peso de las diferentes tecnologías en la estructura eléctrica es el factor que mayor influencia tiene sobre el consumo indirecto asociado al consumo de energía de los equipos. Esto es debido a que existen diferencias muy abultadas en el impacto hídrico de las centrales de generación de electricidad. Mientras que para obtener energía de una fuente como el gas tan solo se consumen unos 0,9 L/kWh en promedio, la energía hidroeléctrica o la biomasa requieren aproximadamente 70 y 90 L/kWh. Dicha diferencia se traduce en que países con un mix muy dependiente de recursos fósiles presentan consumos de agua indirectos relativamente reducidos, mientras que otros en los que predomina la energía hidroeléctrica consumen enormes cantidades de agua en la generación.
- Además de la importante repercusión del mix particular de cada país sobre sus consumos de agua, el otro factor que más influencia tiene es el clima en el que se sitúan tanto los equipos como las centrales energéticas. Por una parte, el consumo directo en los condensadores adiabáticos es evidentemente superior en climas más secos y calurosos, donde los paneles de enfriamiento entran más horas en funcionamiento. Por otra parte, en las propias centrales de generación eléctrica no existe el mismo consumo en un clima más frío y húmedo que en uno más árido, un hecho poco investigado previamente y el cual se ha demostrado. Por ello, se han planteado unos factores de corrección de los consumos de agua promedios en centrales en función del clima, tomando como referencia sus depresiones de bulbo húmedo. Esta corrección según el clima es importante, pues los valores de los que se

parte en la bibliografía son intermedios y los reales variarán en torno a ellos dependiendo de lo extremo de las condiciones.

- Una de las conclusiones de mayor importancia tras desarrollar este estudio es que se ha constatado que casi en la totalidad de los casos resulta siendo superior el consumo indirecto de agua de los equipos, asociado a su consumo eléctrico, que su consumo directo in situ. Ese consumo indirecto es “invisible” a ojos del consumidor final, pero no debe ser despreciado en términos de eficiencia energética e impacto ambiental, pues en algunos casos puede llegar a valores desmesurados haciendo parecer escaso en proporción el consumo directo.
- Además, según se ha demostrado con las comparaciones de consumos en países con mix semejantes y diferentes climas, el consumo indirecto aumenta en menor medida en los condensadores adiabáticos que en los sistemas por aire al incrementarse las temperaturas. Así, en climas muy calurosos el consumo global llega a ser muy similar o incluso menor en los equipos con preenfriamiento.
- Una importante limitación que se ha encontrado en este trabajo es la imprecisión que implica suponer que los equipos de refrigeración se encuentran en la misma región climática que las centrales eléctricas de las que se abastecen. En primer lugar, no se surten de una sola central ni de las más cercanas, ya que todas las redes eléctricas se encuentran interconectadas entre sí dentro de los países e incluso entre ellos, formando una malla para garantizar el suministro. Por otra parte, dichas centrales pueden estar localizadas en mayor o menor proporción en distintos climas. Por ejemplo, para España, cuyo clima predominante es el Csa, una gran parte de la producción eléctrica se concentra en el noroeste peninsular, donde los climas más extendidos son Csb y Cfb. Se requeriría un estudio pormenorizado de la localización de cada central para conocer el clima en que se encuentran y realizar las correcciones por clima con precisión.
- El consumo de agua directo resulta problemático por la posible escasez existente en el emplazamiento en el que se encuentran instalados los equipos. En algunos casos puede resultar que el consumo global con un condensador adiabático es inferior, no obstante, el análisis no debe terminar ahí. Antes de seleccionar este tipo de máquinas se ha de garantizar que donde se vayan a localizar no haya excesivo estrés hídrico y el suministro esté asegurado.
- Todos los valores obtenidos y cálculos realizados evolucionarán en los próximos años, dado que dependen tanto del clima como del mix eléctrico. Actualmente es

complicado conocer cómo cambiarán los consumos de agua. Por un lado, con el aumento previsto de las temperaturas en Europa las condensadoras por aire verán reducida su eficiencia en regiones en las que en la actualidad son favorables. Además, en la generación de electricidad 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.

Líneas futuras:

En este trabajo se ha profundizado en la viabilidad del empleo de sistemas de condensación adiabáticos frente a las más extendidas unidades condensadoras enfriadas por aire, todo ello desde el punto de vista de los consumos directos e indirectos de agua asociados a la operación de los equipos.

- Posteriores estudios sobre la misma materia podrían extender el abanico de dispositivos analizado, incluyendo también las torres de refrigeración y los condensadores evaporativos. Si bien estos equipos se emplean cada vez menos dadas sus costosas necesidades de mantenimiento y su riesgo de legionelosis, sus rendimientos en cuanto a consumo energético son los mejores, con lo que sus consumos de agua indirectos también resultarán considerablemente más reducidos que en los casos investigados.
- También resultará atractiva la ampliación de este mismo estudio abarcando todos los continentes del mundo, sin limitarse tan solo a Europa. Para ello será necesaria la recopilación y análisis de los mix eléctricos de todos los países y la clasificación climática de todos ellos. En algunos territorios de continentes como África o Asia la escasez de datos publicados puede suponer una mayor complejidad en la observación.
- Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, una de las limitaciones de este trabajo reside en la vigencia de los datos recabados y calculados. Dado que los mix eléctricos de los países y los climas que los caracterizan se encuentran en constante evolución, en pocas décadas los resultados de este mismo análisis podrían diferir considerablemente. Por ello, una línea de investigación consistente en la proyección de futuro de los resultados sería útil.

10. Bibliografía

- ASHRAE. (2019). *ASHRAE Handbook. HVAC Applications. Chapter 53: Evaporative cooling.*
- ASHRAE. (2020). *ASHRAE Handbook. HVAC Systems and Equipment. Chapter 41: Evaporative air-cooling equipment.*
- Averyt, K., Fisher, J., Huber-Lee, A., Lewis, A., Macknick, J., Madden, N., Rogers, J., & Tellinghuisen, S. (2011). *Freshwater Use by U.S. Power Plants. Electricity's Thirst for a Precious Resource.* www.ucsusa.org/publications. Fecha de último acceso: 12/05/2022
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- 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).
- Borodinecs, A., Lebedeva, K., Prozuments, A., Brahmanis, A., Grekis, A., Zajecs, D., Zekunde, A., & Vatin, N. (2021). Feasibility of Reducing Electricity Consumption of Air Conditioning Equipment by Condenser Direct Evaporative Cooling Technology. Example of Case Study in Dubai. *Atmosphere*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/atmos12091205>
- Bumbacher, B., & Schmid, R. (2011). *Leibstadt Nuclear Power Plant: technical description.* https://www.kkl.ch/fileadmin/seiteninhalt/Dateien/01_Unternehmen/E_Publikationen/technische_beschreibung_kkl_en.pdf.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (1989). *Termodinámica* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Chazarra, A., Flórez, E., Peraza, B., & Tohá, T. (2018). *MAPAS CLIMÁTICOS DE ESPAÑA AEMET (1981-2010).*
- CNAT. (2018). *Informe ambiental 2018: Centrales nucleares Almaraz y Trillo.*
- Comisión Europea. (2011). *REGLAMENTO DELEGADO (UE) N. 626/2011 DE LA COMISIÓN de 4 de mayo de 2011 por el que se complementa la Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta al etiquetado energético de los acondicionadores de aire.*
- Cooperman, A., Dieckmann, J., & Brodrick, J. (2012). *Water/Electricity Trade-Offs in Evaporative Cooling, Part 2.* www.ashrae.org.
- Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X., Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B., & Hasan, A. (2012). Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 9, pp. 6823–6850). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.007>

- Earp, K. J., & Moreo, M. T. (2021). *Evaporation from Lake Mead and Lake Mohave, Nevada and Arizona, 2010–2019*. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20211022>. Fecha de último acceso: 01/05/2022
- Ebrahimpour, A. (2011). *New software for generation of typical meteorological year*.
- EIA. (2021). *Thermoelectric cooling water data in the USA*. <https://www.eia.gov/electricity/data/water/>. Fecha de último acceso: 16/05/2022
- Evapco Brazil. (2022). *¿Qué es el enfriamiento adiabático?* <https://www.evapco.com.br/es/enfriamiento-adiabatico-101>
- FAO. (2021). *Necesidades de agua de riego*. <https://www.fao.org/aquastat/es/data-analysis/irrig-water-use/irrig-water-requirement>. Fecha de último acceso: 23/05/2022
- Farnsworth, R. K., Thompson, E. S., & Peck, E. L. (1982). *Evaporation Atlas for the Contiguous United States*. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/54dd5e0be4b08de9379b38e4>. Fecha de último acceso: 05/04/2022
- Foro Nuclear. (2016). *Agua y energía nuclear: un binomio imprescindible*. <https://www.foronuclear.org/Actualidad/a-Fondo/Agua-y-Energia-Nuclear-Un-Binomio-Imprescindible/>. Fecha de último acceso: 01/07/2022
- Gosse, P., & Samie, R. (2020). Water evaporation at wet-cooled nuclear power plants on river banks: Application to the French Rhône river. *Water-Energy Nexus*, 3, 155–169. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.07.001>
- He, S., Gurgenci, H., Guan, Z., Huang, X., & Lucas, M. (2015). A review of wetted media with potential application in the pre-cooling of natural draft dry cooling towers. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 44, pp. 407–422). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.037>
- Herrero Fuerte, M. (2021, April 26). *¿Qué es COP y EER? Coeficientes de rendimiento y Eficiencia Energética en refrigeración y bomba de calor*. CaloryFrio. <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/definiciones-cop-y-eer.html>. Fecha de último acceso: 13/04/2022
- HMX Ate Group. (2021). *EVAPORATIVE COOLING – PRINCIPLE OF OPERATION*. <https://www.ategroup.com/Hmx/Why-Evaporative/>. Fecha de último acceso: 28/04/2022
- IGN. (n.d.). *Evaporación media anual en España*. Retrieved July 2, 2022, from https://www.ign.es/espmmap/mapas_clima_bach/Mapa_clima_08.htm. Fecha de último acceso: 10/06/2022

- International Energy Agency. (2022, April 22). *Countries and regions - IEA*. <https://www.iea.org/Countries>. Fecha de último acceso: 12/07/2022
- Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A., & Scherer, L. (2019). Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 115). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>
- Jones, R. K., Baras, A., Saeeri, A. al, al Qahtani, A., al Amoudi, A. O., al Shaya, Y., Alodan, M., & Al-Hsaien, S. A. (2016). Optimized Cleaning Cost and Schedule Based on Observed Soiling Conditions for Photovoltaic Plants in Central Saudi Arabia. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(3), 730–738. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2535308>
- Junta de Andalucía. (2015). *Sistemas de explotación y balances Demarcación Hidrográfica del Guadalete y Barbate*. https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/agua/3_planificacion_hidrologica/planificacion2021_27/documentos_previos_2021_2027_dh_gb/Documentos%20Iniciales/DI_MEMORIA_GB.pdf.
- Krarti, M., & Aldubyan, M. (2021). Mitigation analysis of water consumption for power generation and air conditioning of residential buildings: Case study of Saudi Arabia. *Applied Energy*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116767>
- Lohrmann, A., Child, M., & Breyer, C. (2021). Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system. *Energy*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121098>
- López Moreno, J. I. (2008). *Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del Pirineo*. 61–81. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2762772>
- Macknick, J., Newmark, R., Heath, G., & Hallett, K. C. (2012). Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: A review of existing literature. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045802>
- Marinhas, S. (2013). *Eurovent chiller certification key stones and future challenges*. 31–33. http://www.promodul.fr/sites/default/files/Juin_2012-Lettre%20Information%20CLEA.pdf
- Martínez, F. J. R., Alonso, J. F. S. J., Gómez, E. V., González, A. T., Esquivias, P. M., & Hernández, J. M. R. (2020). Energy consumption reduction of a chiller plant by adding evaporative pads to decrease condensation temperature. *Energies*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/en13092218>

- Pistochini, T., & Modera, M. (2011). Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 631–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.004>
- Puckorius, P. R., Thomas, P. T., & Augspurger, R. L. (1995). *Why Evaporative Coolers Have Not Cause Legionnaires' disease*.
- Saman, W., Bruno, F., & Liu, M. M. (2009). *Technical background research on evaporative air conditioners and feasibility of rating their water consumption Prepared for the Water Efficiency Labelling and Standards (WELS) scheme Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts Prepared by Professor Wasim Saman*.
- Sanza Pérez, J., Andrés Chicote, M., Varela Díez, F., & Velasco Gómez, E. (2017). A new method for calculating conduction response factors for multilayer constructions based on frequency–Domain spline interpolation (FDSI) and asymptotic analysis. *Energy and Buildings*, 148, 280–297. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.010>
- Scherer, L., & Pfister, S. (2016). Global water footprint assessment of hydropower. *Renewable Energy*, 99, 711–720. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.021>
- Sesma, D., & Rubio-Varas, M. del M. (2019). *The use of water for power generation in the most arid country in Europe: The use of water for power generation in the most arid country in Europe: The thermoelectric water footprint in Spain*.
- Sohani, A., & Sayyaadi, H. (2018). 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*, 172, 248–264. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.008>
- Stillwell, A. S., Webber, M. E., Lawler, D. F., Maidment, D. R., Mckinney, D. C., & Allen, D. T. (2013). *Water Impacts on Thermoelectric Power Generation*. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/21969>
- Torcellini, P., Long, N., & Judkoff, R. (2003). *Consumptive Water Use for U.S. Power Production*. <http://www.osti.gov/bridge>
- Tremblay, A., Tardif, S., Strachan, I. B., & Turpin, C. (2014). Studying net evaporation from the Eastmain-1 reservoir. *Hydro Review*. <https://www.hydroreview.com/world-regions/studying-net-evaporation-from-the-eastmain-1-reservoir/#gref>
- Webber, M. E. (2018). *Water for energy: thermal power plants*. <https://stem.guide/topic/thermal-power-plants/?Lang=es>.
- Zahedi, R., Ranjbaran, P., Gharehpetian, G. B., Mohammadi, F., & Ahmadihangar, R. (2021). Cleaning of floating photovoltaic systems: A critical review on approaches from technical and economic perspectives. In *Energies* (Vol. 14, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en14072018>

- Zhang, H., Feng, X., & Wang, Y. (2017). Economic analysis based on energy and water consumptions between air-cooling and water-cooling. *Chemical Engineering Transactions*, *61*, 367–372. <https://doi.org/10.3303/CET1761059>
- Zhang, H., Feng, X., & Wang, Y. (2018). Comparison and evaluation of air cooling and water cooling in resource consumption and economic performance. *Energy*, *154*, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.095>

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

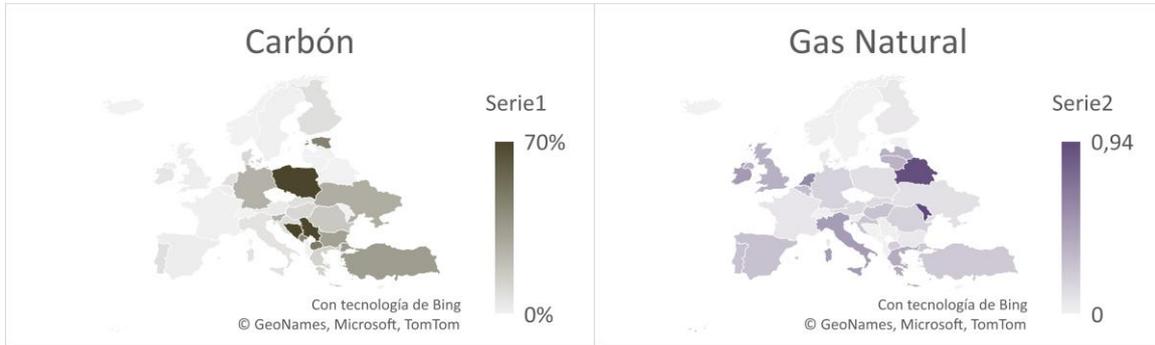


Figura 41: Peso relativo del Carbón y el Gas Natural como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elab.propia

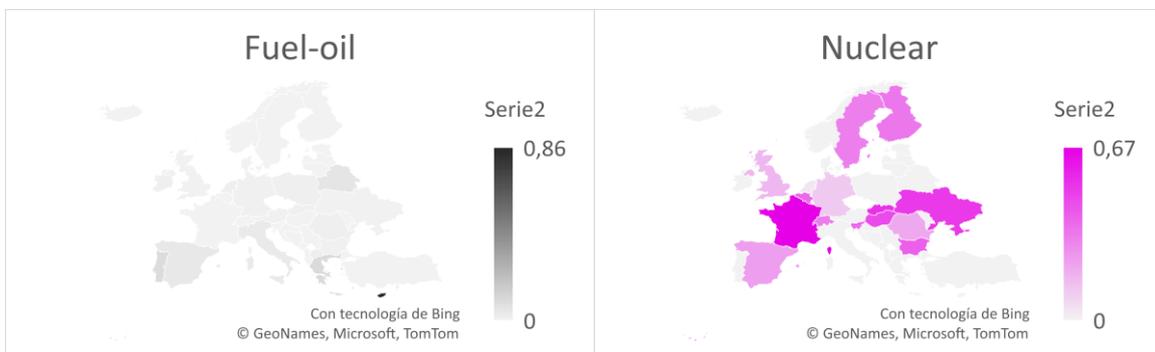


Figura 42: Peso relativo del Fuel-oil y la Nuclear como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elaboración.propia

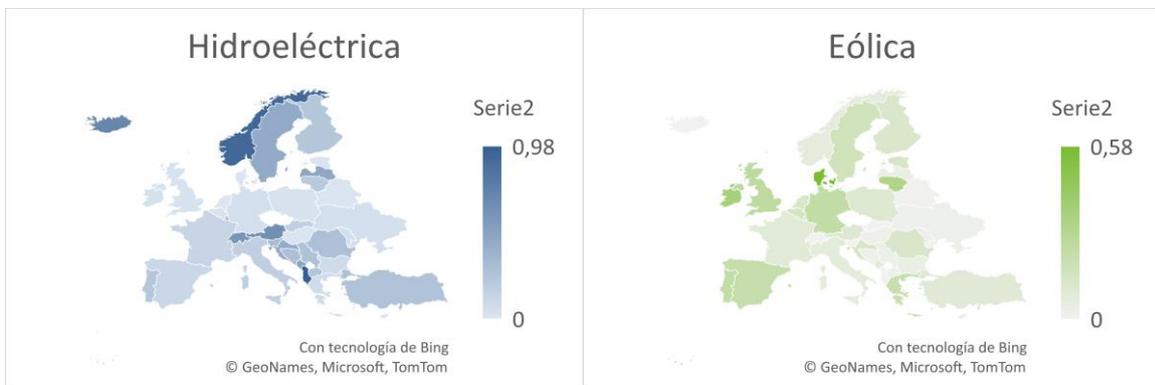


Figura 43: Peso relativo de la Hidroeléctrica y la Eólica como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elab.propia

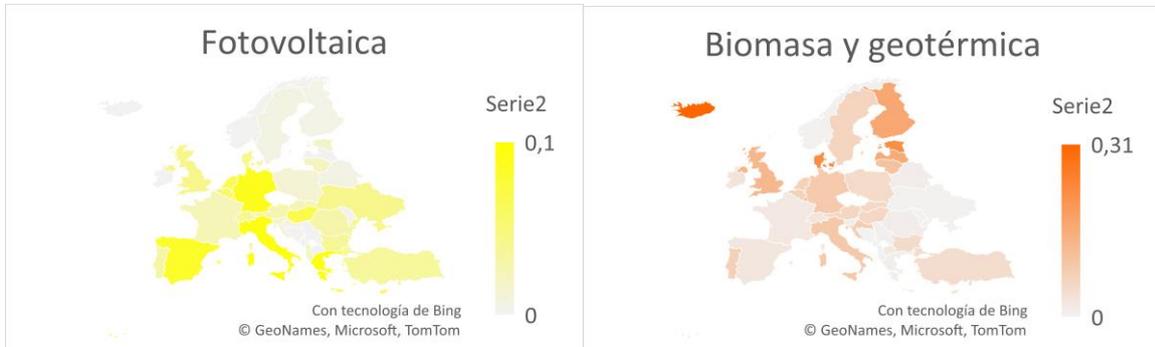


Figura 44: Peso relativo de la Fotovoltaica y la Biomasa como fuentes de energía en los mix de Europa. Fuente: Elab.propia

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).

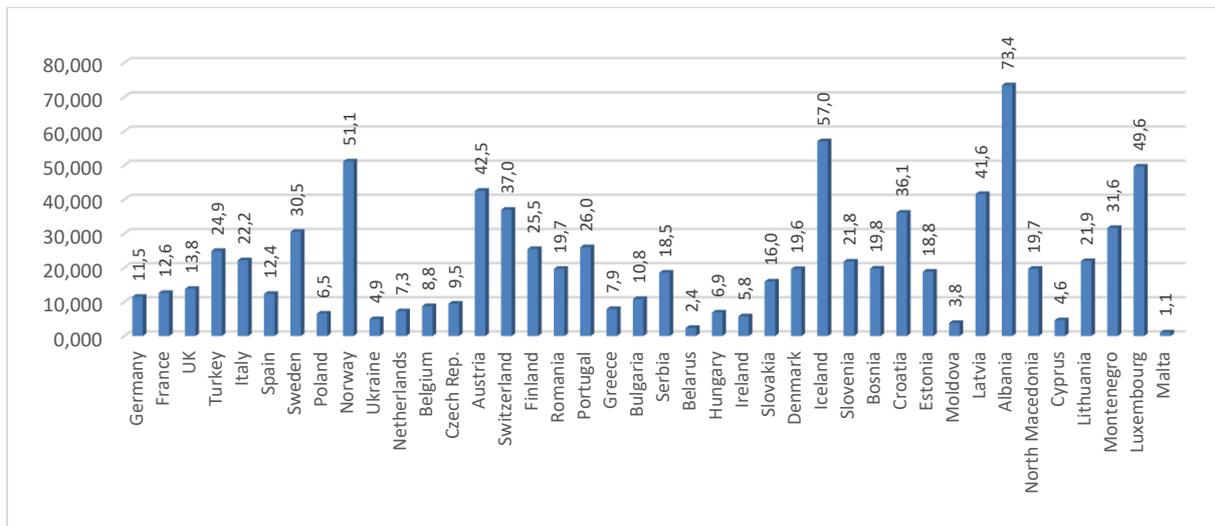


Figure 1. Water consumption in electricity generation (l/kWh) [1] [3]-[7].

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.