

(Editores)  
Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso

RECURSOS MINERALES Y  
MEDIOAMBIENTE: UNA HERENCIA  
QUE GESTIONAR Y UN FUTURO  
QUE CONSTRUIR

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020





# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

HOMENAJES



Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso  
(editores)

*Recursos minerales y  
medioambiente: una herencia  
que gestionar y un futuro  
que construir*

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Álvarez García, Rodrigo; Ordoñez Alonso, Almudena (editores). (2020). *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2020 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

[www.publicaciones.uniovi.es](http://www.publicaciones.uniovi.es)

ISBN: 978-84-17445-95-9

DL AS 1451-2020



Jorge Loredo Pérez





## Índice

PRÓLOGO .....	13
<i>Santiago García Granda, Rector de la Universidad de Oviedo</i>	

### SEMBLANZA PERSONAL

Bosquejo a vuelapluma de Jorge Loredo Pérez, alumno, colega, colaborador y, sobre todo, amigo entrañable .....	17
<i>J. García-Iglesias.</i>	

Jorge Loredo: un compañero de viaje y un maestro de vida.....	21
<i>N. Roqueñí.</i>	

Casi un cuarto de siglo trabajando con Jorge: una experiencia de vida.	25
<i>A. Ordóñez.</i>	

Jorge Loredo: un gran hombre, un gran científico, un gran maestro y, ante todo, una gran persona.....	29
<i>M. I. Rucandío.</i>	

### ARTÍCULOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

¿Se está gestando una nueva crisis del petróleo?.....	33
<i>I. Álvarez.</i>	

Mineralogía, textura y geoquímica de depósitos minerales y residuos mineros: una herramienta de interés en estudios de contaminación de suelos.....	45
<i>R. Álvarez, J. Álvarez-Quintana y A. Ordóñez</i>	

Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular .....	59
<i>C. Ayora, S. Orden, F. Macías y J. M. Nieto</i>	

Mineralogía magnética aplicada al estudio de los yacimientos; repaso sobre el magnetismo de los minerales y ejemplos de aplicación: el metasomatismo ferrífero de la dolomía encajante de las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida e historia de los «gossans» de la Faja Pirítica Ibérica.....	71
<i>L. Barbanson y M. Essalbi</i>	
Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular – Aplicación al proyecto Carlés .....	83
<i>C. Castañón, A. Martín-Izard, I. Diego y D. Arias</i>	
Determinación de niveles de fondo y referencia de elementos traza en suelos: un enfoque metodológico avanzado .....	93
<i>E. Chacón, A. Callaba, P. Fernández-Canteli, F. Barrio-Parra, M. Izquierdo-Díaz y E. de Miguel</i>	
Historia de las aguas minerales y termales .....	105
<i>M. M. Corral, M. E. Galindo, J. Á. Díaz, C. Ontiveros y J. M. Fernández.</i>	
Mobility of Thallium and other trace elements in mine drainage waters from two carbonate-hosted Lead-Zinc ore deposits in the northeastern Italian Alps .....	115
<i>S. Covelli, E. Pavoni, N. Barago, F. Floreani, E. Petranich, M. Crosera, G. Adami &amp; D. Lenaz</i>	
Comentarios heterodoxos sobre el cambio climático .....	129
<i>J. R. Fernández</i>	
The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage.....	141
<i>J. Fernández, E. Álvarez, J. M. Baltuille &amp; J. Martínez</i>	
Metodologías de fraccionamiento secuencial como herramienta útil para la evaluación de la movilidad de mercurio y arsénico y su impacto en la cuenca minera de Asturias .....	153
<i>R. Fernández-Martínez, A. Ordóñez, R. Álvarez e I. Rucandio</i>	
Recursos geotérmicos en Asturias .....	167
<i>C. García de la Noceda</i>	
Análisis de la presencia de mercurio en diferentes compartimentos ambientales del estuario del río Nalón como consecuencia de la minería..	179
<i>E. García-Ordiales, N. Roqueñí, P. Cienfuegos, S. Covelli y L. Sanz-Prada</i>	
Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva.....	193
<i>S. González-Nistal, R. Álvarez y F. Ruíz</i>	

Escombreras asociadas a minería de sulfuros: pasivo ambiental y potencial activo económico desde una perspectiva de minería circular .....	205
<i>J. A. Grande, J. M. Dávila, J. C. Fortes, M. Santisteban, A. M. Sarmiento, F. Córdoba, M. Leiva, M. L. de la Torre, A. Jiménez, J. Díaz-Curiel, B. Biosca, A. T. Luís, N. Durães, E. A. Ferreira da Silva, M. J. Rivera, J. Aroba, B. Carro, J. Borrego y J. A. Morales.</i>	
Mercurio en Almadén – datos recientes (2000-2020) sobre su presencia en el medioambiente y sus implicaciones.....	219
<i>P. L. Higuera, J. M. Esbrí, E. García-Ordiales y J. D. Peco</i>	
Evaluación medioambiental temprana de riesgos a la salud, a la seguridad y al propio medioambiente por proyectos geo-energéticos .....	245
<i>A. Hurtado y S. Eguilior</i>	
European dimension of the social license to operate in mining.....	257
<i>K. Komnitsas</i>	
El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería .....	265
<i>J. F. Llamas</i>	
Las aguas subterráneas y los acuíferos: su carácter estratégico en escasez y periodos de sequía.....	277
<i>J. Antonio López-Geta</i>	
Comportamiento del agua de mina en instalaciones geotérmicas: Análisis de un caso particular .....	297
<i>C. Loredó</i>	
Una tecnología para reducir las emisiones: el almacenamiento geológico de CO <sub>2</sub> .....	309
<i>R. Martínez Orío y P. Fernández-Canteli</i>	
Perspectivas sobre reducción de emisiones de mercurio originadas en la producción de energía .....	321
<i>M. R. Martínez Tarazona, M. A. López Antón y R. García</i>	
Almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas subterráneas cerradas: situación actual y balances de energía .....	333
<i>J. Menéndez</i>	
Contribución del yacimiento de Carlés a la mineralogía española .....	345
<i>M. Mesa</i>	
La descarbonización de las industrias minerales en el Principado de Asturias .....	357
<i>A. Olay</i>	

Notas sobre liderazgo .....	367
<i>J. C. Rodríguez-Ovejero</i>	
Viabilidad económica ambiental para la recuperación o reducción del consumo de agua de plantas de procesamiento de oro .....	377
<i>J. Soto, J. Melendez y P. Cienfuegos</i>	
La explotación minera del karst fósil en la sierra del Aramo: del Calcolítico al siglo xx .....	391
<i>M. Suárez</i>	

# **ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA Y ELÉCTRICA EN MINAS SUBTERRÁNEAS CERRADAS: SITUACIÓN ACTUAL Y BALANCES DE ENERGÍA**

*Javier Menéndez*

Hunaser Energía, Oviedo, España

## **RESUMEN**

Existen más de un millón de minas abandonadas alrededor del mundo. Cuando cesa la actividad extractiva en una explotación minera, ya sea subterránea o a cielo abierto, los promotores deben acometer costosos proyectos de restauración y rehabilitación, que se pueden ver agravados, en el caso de las explotaciones subterráneas, por el coste «eterno» asociado al bombeo de las aguas de escorrentía. En el caso de las explotaciones subterráneas, finalizados los trabajos de clausura cesa el bombeo desde las cotas más profundas de la explotación y comienza el proceso de inundación que, en función de los caudales, puede prolongarse entre 3-10 años. La cota definitiva de la lámina de agua será establecida por cuestiones de seguridad en función de las construcciones existentes en las inmediaciones de la explotación minera. Por otro lado, en el contexto energético actual, la naturaleza intermitente de algunas fuentes de generación renovable, como la energía eólica o la energía solar fotovoltaica, requieren grandes sistemas de almacenamiento que permitan ajustar la generación y la demanda. En este trabajo se analizan las posibles opciones de utilización de minas clausuradas para la creación de nuevos negocios asociados al sector energético. En el caso de explotaciones inundadas se estudia el aprovechamiento del potencial geotérmico del embalse subterráneo generado tras la inundación para el suministro de energía térmica (calor/frío) a edificios situados en el entorno. Además, se analizan las explotaciones subterráneas en una fase inicial de clausura (sin inundar) para la construcción de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Por ello, sistemas hidroeléctricos de almacenamiento y bombeo subterráneo (HABS) o sistemas almacenamiento subterráneo de aire comprimido (ASAC) podrían ser construidos en los huecos mineros para almacenar agua o aire comprimido a alta presión. Diferentes configuraciones de sistemas de almacenamiento de energía térmica y eléctrica son presentadas, analizando la situación actual y los balances de energía.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se inicia la fase extractiva en una explotación minera es necesario implementar un sistema de bombeo para evacuar el drenaje de los niveles permeables así como el agua que se infiltra a través de las propias labores subterráneas. Una vez finalizada la explotación cesan los trabajos de bombeo y se procede a la inundación del hueco minero. La circulación libre del agua subterránea tras el cese del bombeo conducirá al restablecimiento del equilibrio potenciométrico, fenómeno conocido como ‘rebote’ del nivel. Por tanto, el flujo de agua subterránea durante la vida activa de la mina será muy diferente al esperable tras su clausura (Younger *et al.*, 2002). Tras la actividad minera, el comportamiento del sistema hidrogeológico local puede verse modificado, como consecuencia de la posible interconexión entre acuíferos, la generación de un «nuevo acuífero pseudocárstico» o la conexión entre aguas superficiales y subterráneas

La actual transición energética hacia una economía baja en carbono implica la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables que, dada su naturaleza intermitente, no son gestionables y requieren grandes sistemas de almacenamiento de energía que permitan incrementar tanto la penetración en el mix eléctrico así como la eficiencia de las fuentes renovables. Respecto a la energía térmica, en el año 2017 el 19,5% del total de la energía térmica empleada en la Unión Europea para la calefacción y refrigeración procedió de fuentes renovables. Actualmente existe un gran número de instalaciones que emplean el agua de minas inundadas en fase de post-clausura para la generación de energía térmica a partir de bombas de calor de alta eficiencia en sistemas de lazo abierto o cerrado, dependiendo fundamentalmente de la calidad de las aguas (Hall *et al.*, 2011). Los sistemas de lazo cerrado, al igual que los sistemas geotérmicos convencionales, dónde se realizan perforaciones en el subsuelo, se utilizan cuando la calidad de las aguas es mala, efectuándose el intercambio de calor en el propio pozo (Haehnlein *et al.*, 2010). Cuando los volúmenes de agua son elevados y calidad es óptima se utilizan sistemas de lazo abierto, dónde se instala un intercambiador de calor tubular, fabricado en acero AISI 316 y situado en el exterior, para realizar el intercambio con el agua del circuito secundario de calefacción y refrigeración. El agua almacenada en el embalse subterráneo es bombeada por medio de bombas sumergibles y enviada al intercambiador de calor situado en la superficie (circuito primario), donde se realiza el intercambio con el agua de los circuitos principales que conducen a los centros de consumo. Una vez realizado el intercambio, el agua de mina se vierte al río en las condiciones establecidas. El agua del circuito principal llega hasta la bomba de calor, situada normalmente en el centro de consumo final de energía, el cual eleva o reduce la temperatura final de suministro en función de la consigna establecida. La eficiencia de los sistemas geotérmicos se define como el cociente entre la producción de energía térmica y el consumo de energía eléctrica del sistema, y se denomina *Coefficient of Performance (COP)*. En el caso de centrales geotérmicas a partir de aguas de mina, el consumo de energía eléctrica principal es el correspondiente a la bomba de calor, aunque también hay que considerar otros consumos correspondientes a la circulación del agua desde las instalaciones mineras hasta los centros de consumo. Además,

en determinados casos también podrían considerarse los costes de bombeo asociados a las bombas sumergibles situadas en la vertical del pozo.

Respecto al almacenamiento de energía eléctrica, una planta hidroeléctrica de almacenamiento y bombeo (HAB) consiste básicamente en dos embalses de agua situados a diferentes cotas, una tubería de presión que conecta ambos embalses, una turbina Francis reversible, que puede operar en modo turbina o en modo bomba, generando o consumiendo energía, respectivamente, así como un motor-alternador conectado a su vez a una subestación eléctrica. Su fundamento es aprovechar la energía potencial del agua entre el depósito superior e inferior para generar energía eléctrica en modo turbina, y consumir energía en el bombeo del agua hacia el depósito superior, ambas operaciones cuando son requeridas por los distintos servicios de ajuste del sistema eléctrico. Otra forma de almacenar energía eléctrica en espacios subterráneos son los sistemas ASAC. Los sistemas convencionales ASAC consisten en la compresión del aire a partir de condiciones atmosféricas (1 bar, 20 °C) en grandes compresores (consumiendo energía eléctrica), el almacenamiento del aire comprimido a elevadas presiones en una cavidad subterránea y la expansión de la mezcla del aire comprimido junto con gas natural en una turbina de gas convencional (generando energía eléctrica). Es importante tener en cuenta que el macizo rocoso donde se instala el almacenamiento de aire comprimido está sometido a cargas cíclicas de compresión y descompresión durante toda la vida útil de la planta, pudiendo originar problemas de estabilidad causados por fatiga (Khaledi *et al.*, 2016). Al igual que los sistemas HABS, la operación del compresor o turbina se llevan a cabo según los requerimientos del sistema eléctrico. A diferencia de los sistemas HABS, los sistemas ASAC pueden consumir y generar energía eléctrica simultáneamente.

En el presente trabajo se analiza la situación actual de los sistemas de almacenamiento de energía térmica en forma de grandes embalses de agua generados tras los procesos de inundación de explotaciones mineras, y a partir de la construcción de plantas geotérmicas de baja entalpía. Además, se presentan dos tipos de almacenamiento de energía eléctrica en explotaciones mineras sin inundar. Por un lado, sistemas HABS, donde se requiere la construcción de un embalse subterráneo de agua, y por otro, los sistemas ASAC, donde se almacena aire comprimido a altas presiones en las cavidades subterráneas. Finalmente se llevan a cabo los balances energéticos preliminares de cada uno de los sistemas presentados.

## 2. SITUACIÓN ACTUAL

### 2.1. Sistemas geotérmicos de baja entalpía a partir de agua de mina

La Figura 1 muestra el esquema de una central geotérmica de baja entalpía en las instalaciones de una explotación minera inundada. El potencial térmico de las aguas de minas inundadas en la Unión Europea ha sido estimado en 3000 MW<sub>t</sub> (Díez y Díaz-Aguado, 2014). El potencial térmico del agua almacenada en tres minas de carbón ha sido analizado en la Cuenca Carbonífera Central Asturiana (CCCA) en función de distintas variables obteniendo un potencial de 20 MW<sub>t</sub> (Menéndez *et al.*, 2020a). En el estudio se concluyó que la viabilidad económica depende de la temperatura de impulsión, de la



cantidad de energía y de la distancia hasta el punto de consumo final. En el año 1990 se construyó una planta de energía geotérmica en Nueva Escocia (Canadá) en una mina cerrada de carbón (Jesop, 1995). Un sistema con una configuración en lazo abierto suministra energía a una superficie de 16700 m<sup>2</sup> de edificios mediante un sistema compuesto por 11 bombas de calor. Una planta geotérmica en una antigua mina de uranio fue instalada en Marienberg (Alemania) con una potencia de 690 kW, una temperatura media de 12°C, alta calidad y un caudal de 120 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (Matthes y Schreyer, 2007). En Freiberg (Alemania) un antiguo castillo emplea el agua almacenada en una antigua galería situada 60 m por debajo del castillo para el suministro de calefacción y refrigeración. El sistema cuenta con 2 sondeos (190 mm de diámetro en la ida y 330 mm de diámetro en el retorno), un caudal de 3 l s<sup>-1</sup>, una temperatura media de 10,2 °C y un COP de 3,5 (Kranz y Dillenhart, 2010).

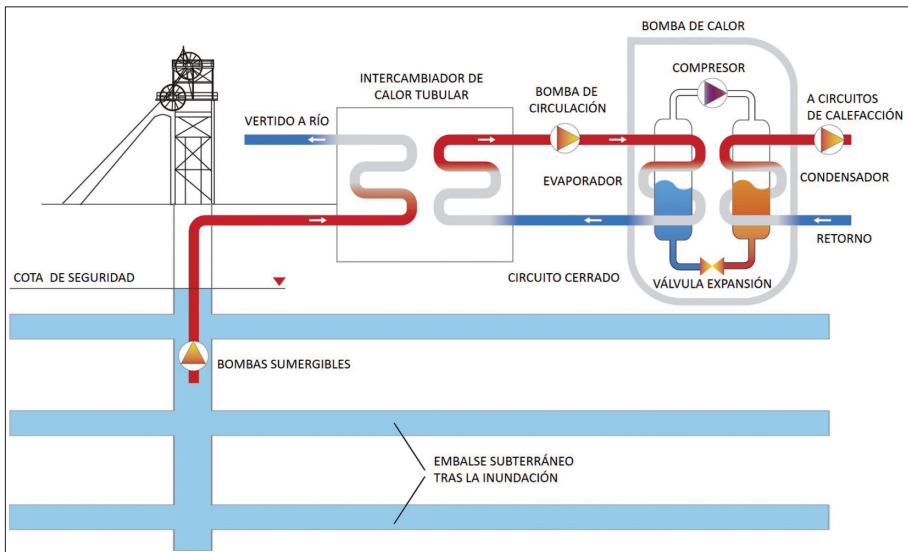


Fig. 1. Esquema de una planta geotérmica en una explotación de carbón inundada (Menéndez et al., 2020a)

En Heerlen (Holanda), existe un sistema que utiliza la energía geotérmica contenida en las aguas de una mina de carbón abandonada (Hall *et al.*, 2011). El proyecto cuenta con 5 pozos de 700 m de profundidad para suministrar energía térmica a 350 viviendas, 3800 m<sup>2</sup> de una superficie comercial y 16200 m<sup>2</sup> de edificios residenciales. Los sistemas de calefacción se basan en sistemas de suelo radiante, donde la temperatura es muy inferior a la requerida en sistemas con radiadores convencionales. Debido a la calidad de las aguas, se emplean tuberías de plástico e intercambiadores de calor fabricados en titanio para resistir la corrosión. La instalación se completa con 4 bombas de calor con una potencia de 700 kW y un COP de 5,6, debido a la alta temperatura del agua en invierno (30-35 °C a 700 m de profundidad) y a la baja temperatura en verano (16-19 °C a 250 m de profundidad). El siste-

ma suministra el 80% de las necesidades de energía térmica anuales de los centros de consumo. En el Norte de España (CCCA), una planta geotérmica que utiliza el agua de una mina de carbón inundada a una temperatura media de 23°C (Pozo Barredo) fue construida para suministrar energía térmica (calor/frío) al Hospital de Mieres, un edificio con una superficie construida de 28000 m<sup>2</sup> y 120 camas de hospitalización. El sistema cuenta con un sistema de bombas sumergidas en el interior del pozo vertical a 100 y 200 m de profundidad, un intercambiador de calor tubular y tres bombas de circulación de 55 kW de potencia para enviar en agua desde la explotación minera hasta las instalaciones del Hospital, dónde se encuentran las bombas de calor con una potencia de 3500 kW (Gzyl *et al.*, 2016). El caudal de agua en el circuito cerrado que conduce al Hospital es de 540 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> en tuberías enterradas de polietileno de ida y retorno de 400 mm de diámetro a través de los 2 km que separan la explotación minera y el centro hospitalario. El sistema ha sido ampliado recientemente hasta los 5000 kW para suministrar energía a un centro educativo y a una comunidad de viviendas de Mieres. Al igual que el proyecto de Haarlén, esta nueva instalación cuenta con sistemas de climatización mediante suelo radiante, lo que permite un aumento de la eficiencia global del sistema al requerir temperaturas más bajas en comparación con sistemas convencionales. Esta nueva ampliación convierte al sistema de geotermia del Pozo Barredo (Asturias) en unos de los sistemas más importantes a nivel mundial de geotermia de baja entalpía a partir de aguas de mina.

## 2.2. Sistemas subterráneos de almacenamiento de energía eléctrica

Con relación a los sistemas HABS, aunque se han realizado numerosos estudios a nivel mundial, todavía no existen plantas de este tipo en operación. El sistema convencional HAB es el sistema de almacenamiento de energía eléctrica más maduro y eficiente que existe en la actualidad, suponiendo más del 90% de la capacidad de almacenamiento de energía eléctrica a nivel mundial (Pérez-Díaz *et al.*, 2015; Rehman *et al.*, 2015). Mientras en un sistema convencional HAB, donde el reservorio inferior y superior están excavados en la superficie, en un sistema HABS uno de los dos depósitos, normalmente el inferior, es subterráneo. Por lo tanto, los sistemas HABS no están limitados por restricciones topográficas, pudiendo instalarse en zonas que cuentan con una orografía menos acentuada, a la vez que cuentan con unos impactos medioambientales mucho más bajos. El esquema de un sistema HABS en una explotación de carbón clausurada se muestra en la Figura 2.

El primer esquema de un sistema de HABS fue propuesto por Reginald A. Fesseden en 1901 (Fesseden, 1907). En 1960 se propuso la idea de utilizar una mina abandonada como embalse inferior de un sistema hidroeléctrico de HABS (Harza, 1960). La excavación de túneles o pozos fue propuesta en macizos rocosos de granito en Singapur (Wong, 1996). El potencial de una mina de hierro también fue analizado en EE. UU. como embalse subterráneo de sistemas HABS (Severson, 2011). En Sudáfrica se han estudiado los huecos de minas subterráneas de oro en la denominada *Far West Rand* para la implantación de sistemas HABS (Winde *et al.*, 2016). En Alemania también se han llevado a cabo varios estudios para el aprovechamiento de minas subterráneas de carbón como embalses inferiores de sistemas HABS en las cuencas

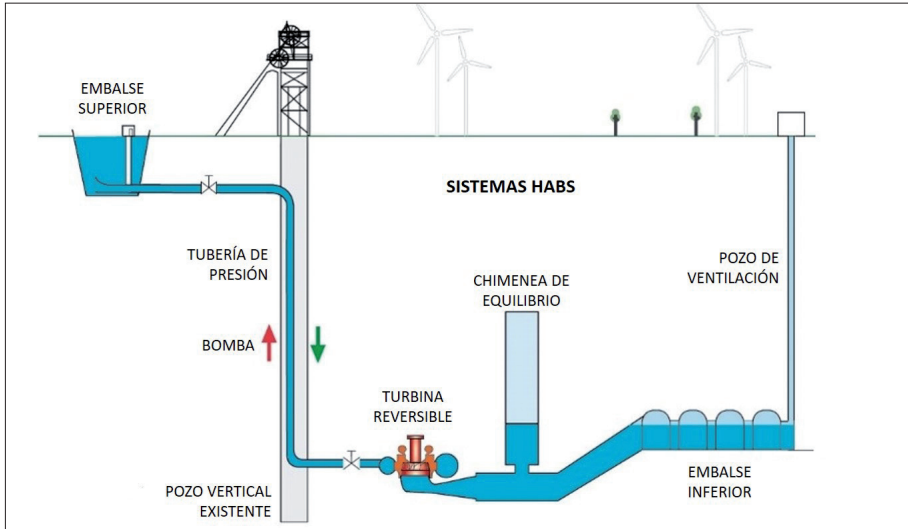


Fig. 2. Esquema de un sistema HABS en explotaciones mineras cerradas

mineras del Harz y del Ruhr (Madlener y Specht, 2013; Alvarado *et al.*, 2015). Finalmente, la construcción de sistemas HABS también ha sido analizada en España, en las explotaciones mineras de carbón situadas en la CCCA (Menéndez *et al.*, 2019a). Uno de los aspectos más destacados en la operación de plantas HABS es la presencia de aire en el embalse inferior subterráneo. Durante las fases de llenado y vaciado del embalse, este aire debe ser expulsado por medio de pozos de ventilación para evitar que aumente su presión e influya en la descarga de la Turbina Francis, reduciendo el salto neto y por ello la cantidad de energía almacenada (Menéndez *et al.*, 2019b). Además, la estabilidad de la caverna de la casa de máquinas, donde se alojan la turbina Francis y el motor-generator, también ha sido analizada en las explotaciones de carbón de la CCCA (Menéndez *et al.*, 2019c). La eficiencia energética global de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica HABS se define como el cociente entre la energía producida en modo turbina y la energía consumida en modo bomba. La eficiencia de los sistemas HABS oscila entre 0,7 y 0,8 (Menéndez *et al.*, 2020b). Por otra parte, la eficiencia de la turbina Francis se estima sobre el 0,9, la eficiencia del alternador en un 0,985 y la eficiencia del transformador en el 0,9.

Dos tipos de sistemas de ASAC pueden ser diferenciados. Por una parte, los sistemas convencionales diabáticos (D-ASAC), donde un combustible, normalmente gas natural, es necesario para incrementar la temperatura del aire comprimido en una cámara de combustión, a la entrada de la turbina de gas, y por otro, sistemas adiabáticos, (A-ASAC), en los que se instala un sistema de almacenamiento de energía térmica aprovechando los gases de escape en el proceso de compresión, que posteriormente se utiliza para incrementar la temperatura del aire a la entrada de la turbina de gas, eliminando el uso del combustible fósil. La Figura 3 muestra los esquemas de D-ASAC y A-ASAC en explotaciones de carbón cerradas.

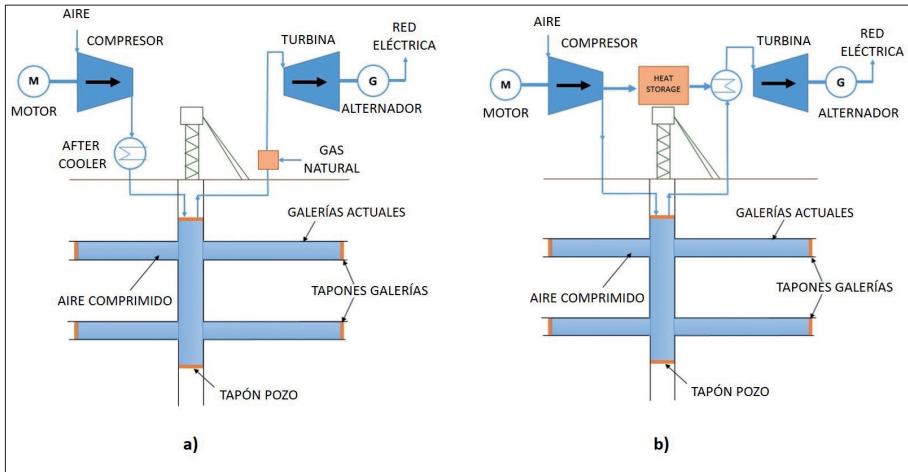


Fig. 3. Sistemas ASAC en explotaciones mineras cerradas. (a) D-ASAC; (b) A-ASAC

Actualmente existen dos plantas diabáticas D-ASAC en operación a nivel mundial. La primera instalación de un sistema D-ASAC fue la planta de Huntorf, contruida en 1978 en Alemania en una caverna de sal. El volumen de almacenamiento es de  $310000 \text{ m}^3$  a una profundidad de 600 m. La planta tiene una potencia de 320 MW y opera a unas presiones entre 4 - 7 MPa, con ciclos diarios de producción a plena carga de 2-3 h (Crotofino *et al.*, 2001; Succar y Williams, 2008). La segunda planta fue construida en el año 1991 también en cavernas de sal en McIntosh, Alabama (EE. UU). La planta dispone de un volumen de almacenamiento de aire comprimido de  $538\,000 \text{ m}^3$  a una profundidad de 450 m y opera a presiones entre 4,5 - 7,6 MPa. La potencia instalada es de 110 MW y el ciclo de operación a plena carga es de 24 h (He *et al.*, 2017; Nakhmkin *et al.*, 1992). La central de McIntosh, a diferencia de la de Huntorf, cuenta con un sistema de recuperación de calor de los gases de combustión antes de la salida a la atmósfera, reduciendo significativamente el consumo de gas natural. La eficiencia energética de los sistemas D-ASAC se define como el cociente entre la energía generada en la expansión en la turbina y la suma de la energía consumida en la etapa de compresión más la energía aportada por el gas natural. La eficiencia global de las plantas D-ASAC oscila entre 0,4 y 0,5, mientras que la eficiencia aumenta hasta 0,7-0,8 en el caso de los sistemas A-ASAC (Tola *et al.*, 2017), dónde se elimina el consumo de gas natural. La eficiencia de las plantas que se encuentran actualmente en operación es de 0,42 en el caso de la planta de Huntorf, y de 0,54 en la planta de McIntosh, debido fundamentalmente al sistema de recuperación de calor de los gases de combustión (Lutyński, 2017). Además del ahorro energético, la eliminación del gas natural reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) cuando un sistema de almacenamiento de energía térmica es considerado en los sistemas A-ASAC.

### 3. BALANCES DE ENERGÍA

#### 3.1. Almacenamiento de energía térmica

La cantidad de energía térmica almacenada en una explotación subterránea depende del volumen de agua almacenado y de la diferencia de temperatura del agua de mina a la entrada y a la salida de la bomba de calor. La energía estática se define por medio de la Ecuación (1).

$$E_s = \eta c \rho V (T_h - T_c) \quad (1)$$

dónde  $E_s$  es la energía estática en kWh,  $c$  es el calor específico del agua de mina,  $4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\eta$  es un factor de conversión de unidades (kWh/kJ), correspondiendo un valor de  $2,7 \times 10^{-4}$ ,  $\rho$  es la densidad del agua de mina ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $V$  es el volumen de agua almacenada, en  $\text{m}^3$ , y  $T_h - T_c$  es la diferencia de temperatura a la entrada y salida de la bomba de calor. En la Tabla 1 se muestra la cantidad de energía almacenada en GWh en tres explotaciones mineras inundadas con diferentes volúmenes de huecos y caudales de descarga, considerando un salto térmico de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $2500 \text{ h año}^{-1}$  de calefacción y refrigeración (Ochsner, 2008). En función de los caudales de descarga, comprendidos entre  $600$  y  $2400 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , la potencia de las instalaciones aumenta desde  $5,81$  hasta  $17,42 \text{ MW}$ .

*Tabla 1. Balance de energía y potencia de plantas geotérmicas baja entalpía (Menéndez et al., 2020a)*

Parámetro	Unidades	A	B	C
Diferencia de temperatura ( $T_h - T_c$ )	$^\circ\text{C}$	5	5	5
Volumen de huecos	$\text{m}^3 (\times 10^6)$	2,50	5,00	7,50
Energía estática	GWh	14,52	29,03	43,55
Caudal anual de descarga	$\text{m}^3/\text{año} \times 10^6$	1,50	3,00	6,00
Caudal horario descarga	$\text{m}^3/\text{h}$	600	1200	2400
Potencia térmica	MW	5,81	11,61	17,42

#### 3.2. Almacenamiento de energía eléctrica

La energía eléctrica almacenada en un sistema HABS depende del salto neto entre el embalse superior e inferior y del volumen de agua movido. La cantidad de energía se obtiene aplicando la Ecuación (2).

$$E_{HABS} \rho \cdot g \cdot V \cdot H \cdot \eta \cdot \alpha \quad (2)$$

donde  $E_{HABS}$  es la energía total almacenada por cada ciclo productivo, en kWh,  $\rho$  es la densidad del agua ( $1.000 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ),  $V$  es el volumen de agua movida en cada ciclo, en  $\text{m}^3$ ,  $H$  es el salto neto, expresado en m. c. a,  $\eta$  es la eficiencia de la turbina reversible y  $\alpha$  es el factor de conversión de unidades (J/kWh) correspondiente a  $2,77 \times 10^{-7}$ . En la Tabla 2 se muestra el balance energético y la potencia instalada en sistemas HABS considerando para tres instalaciones tipo, considerando diferentes volúmenes de agua y saltos netos medios. Además, se con-

sidera una eficiencia de la turbina Francis de 0,9 y una eficiencia global del sistema de 0,77.

Tabla 2. Balance de energía y potencia de sistemas HABS en minas cerradas

Parámetro	Unidades	A	B	C
Salto neto medio	m. c. a	200	400	600
Volumen de agua	m <sup>3</sup> (x10 <sup>6</sup> )	0,50	1,00	2,00
Generación energía/ciclo	MWh	238,38	953,53	2860,60
Consumo energía/ciclo	MWh	309,59	1238,35	3715,06
Ciclo turbinado	h/ciclo	4,00	6,00	8,00
Caudal	m <sup>3</sup> /s	34,72	46,30	69,44
Potencia turbina	MW	59,60	158,92	357,57

En un sistema D-ASAC con turbina de gas, la cantidad de energía depende del volumen del reservorio de aire comprimido y de la diferencia de entalpías en el proceso de expansión en la turbina de gas. La cantidad de energía se obtiene aplicando la Ecuación (3). En un sistema A-ASAC, donde no es necesario el gas natural, la cantidad de energía se obtiene aplicando la Ecuación (4).

$$E_{ASAC} = (\dot{m}_a + \dot{m}_{GN}) \cdot (h_{e1} - h_{e2}) \cdot \eta \cdot t_c \quad (3)$$

$$E_{ASAC} = \dot{m}_a \cdot (h_{e1} - h_{e2}) \cdot \eta \cdot t_c \quad (4)$$

donde  $E_{ASAC}$  es la energía total almacenada por cada ciclo productivo, en kWh, son el flujo másico de aire comprimido y de gas natural respectivamente, en kg s<sup>-1</sup>,  $(h_{e1} - h_{e2})$  es la diferencia de entalpías en el proceso de expansión de la turbina de gas, en KJ/kg,  $\eta$  es la eficiencia de la turbina de gas y  $t_c$  es el tiempo de ciclo a plena carga, en h. La Tabla 3 muestra el balance de energía y la potencia obtenida para 3 instalaciones A-ASAC con presiones máximas de 100 bar y considerando diferentes volúmenes de almacenamiento con una eficiencia de la turbina de gas de 0,85.

Tabla 3. Balance de energía y potencia de sistemas A-ASAC en minas cerradas.

Parámetro	Unidades	A	B	C
Caudal de aire	kg/s	100	150	200
Volumen del reservorio	m <sup>3</sup>	15000	33000	60000
Presión máxima	bar	100	100	100
Presión mínima	bar	60	60	60
Energía	MWh	115,60	260,10	460,00
Ciclo descarga	h/ciclo	2,00	3,00	4,00
Potencia	MW	57,80	86,70	115,00

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la situación actual de los sistemas de almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas cerradas. La utilización de minas cerradas para la construcción de centros de almacenamiento de energía térmica y eléctrica tiene un gran potencial debido al gran número de instalaciones existentes alrededor del mundo. Estos nuevos sistemas energéticos se caracterizan por poseer bajos impactos medioambientales, a la vez que permiten dinamizar económicamente unas zonas deprimidas debido al cierre de las explotaciones mineras. Además, la generación de energía térmica a partir de agua de mina reduce las emisiones de GEI, mientras que los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica son muy beneficiosos para el sistema eléctrico, permitiendo ajustar la curva de generación y demanda en un mix eléctrico donde las energías renovables no gestionables están cobrando una enorme relevancia.

En el caso de minas inundadas se plantea la construcción de centrales geotérmicas de baja entalpía mediante el uso de intercambiadores de calor tubulares y bombas de calor de alta eficiencia para el suministro de energía térmica a edificios situados en el entorno de las minas. La energía térmica almacenada en las minas depende del volumen de agua almacenada y de la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de la bomba de calor. Por su parte, la potencia térmica instalada dependerá del caudal de agua bombeado.

Respecto a los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, es preferible que las instalaciones se encuentren en la fase de clausura, donde todavía no han cesado los trabajos de bombeo. Sistemas HABS o sistemas ASAC pueden ser construidos empleando los huecos mineros para el almacenamiento de agua o aire comprimido a alta presión, respectivamente. En el caso de los sistemas HABS la cantidad de energía almacenada depende del volumen de agua movido y del salto neto entre los reservorios superior e inferior. Por su parte, los sistemas ASAC almacenan aire comprimido a presiones entre 40-100 bar, y la cantidad de energía depende principalmente del volumen de aire comprimido almacenado en los huecos mineros.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, R., Niemann, A., Wortberg, T., 2015. Underground pumped-storage hydroelectricity using existing coal mining infrastructure. *E-proceedings of the 36th IAHR world congress*. The Netherlands: The Hague.
- Crotogino, F., Mohmeyer, K. U., Scharf, R., 2001. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation. *The Solution Mining Research Institute Spring Meeting*, Orlando, Florida, USA.
- Díez, R., Díaz-Aguado, M., 2014. Estimating limits for the geothermal energy potential of abandoned underground coal mines: a simple methodology. *Energies* 7 (7): 4241-4260.
- Fessenden, R. A. *System of Storing Power*, application filed June 7, 1907: 1,247,520 Patented Nov. 20, 1917, 1917.
- Gzyl, G., Banks, D., Younger, P., Głodniok, M., Burnside, N., Garzon, B., Skalny, A., 2016. Low Carbon After-Life e overview and first results of project LoCAL. *Proceedings of the International Mine Water Congress, IMWA*, Freiberg (Germany), 593-599.

- Haehnlein, S., Bayer, P., Blum, P., 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 14: 2611–2625.
- Hall, A., Scott, J. A., Shang, H., 2011. Geothermal energy recovery from underground mines. *Renewable. Sustainable Energy Reviews*, 15: 916–924.
- Harza, R.D., 1960. Hydro and pumped storage for peaking. *Power Engineering* 64 (10): 79–82.
- He, W., Luo, X., Evans, D., Busby, J., Garvey, S., Parkes, D., Wang, J., 2017. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system. *Applied Energy*, 208: 745–757.
- Jessop, A., 1995. Geothermal energy from old mines at Springhill, Nova Scotia, Canada. *Proceedings World Geothermal Congress*, 463–468.
- Khaledi, K., Mahmoudi, E., Datcheva, M., Schanz, T., 2016. Analysis of compressed air storage caverns in rock salt considering thermomechanical cyclic loading. *Environmental Earth Sciences*, 75: 1149
- Kranz, K., Dillenhart, J., 2010. Mine water utilization for geothermal purposes in Freiberg, Germany: determination of hydrogeological and thermophysical rock parameters. *Mine Water and the Environment*, 29: 68–76.
- Lutyński, M., 2017. An overview of potential benefits and limitations of Compressed Air Energy Storage in abandoned coal mines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 268, 012006.
- Madlener, R., Specht, J. M., 2013. An exploratory economic analysis of underground pumped-storage hydro power plants in abandoned coal mines. FCN Working Paper No. 2/2013, 34 p.
- Matthes, R., Schreyer, J., 2007. Remediation of the Old Wismut-Shaft 302 in Marienberg and installation of a technical plant for geothermal mine water use. *IMWA symposium 2007: water in mining environments*, 227–231.
- Menendez, J., Fernández-Oro, J. M., Galdo, M., Loredó, J., 2019b. Pumped-storage hydropower plants with underground reservoir: influence of air pressure on the efficiency of the Francis turbine and energy production. *Renewable Energy*, 143: 1427–1438.
- Menendez, J., Fernández-Oro, J. M., Galdo, M., Loredó, J., 2020b. Efficiency analysis of underground pumped storage hydropower plants. *Journal of Energy Storage*, 28: 101234.
- Menendez, J., Loredó, J., Fernández-Oro, J. M., Galdo, M., 2019a. Energy storage in underground coal mines in NW Spain: assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance. *Renewable Energy*, 134: 1381–1391.
- Menendez, J., Ordóñez, A., Fernández-Oro, J. M., Loredó, J., Díaz-Aguado, M., 2020a. Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings. *Renewable Energy*, 146: 1166–1176.
- Menéndez, J., Schmidt, F., Konietzky, H., Fernández-Oro, J. M., Galdo, M., Loredó, J., Díaz-Aguado, M. B., 2019c. Stability analysis of the underground infrastructure for pumped storage hydropower plants in closed coal mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 94: 103117.
- Nakhmkin, M., Andersson, L., Swensen, E., Howard, J., Meyer, R., Schainker, R., 1992. AEC 110 MW CAES plant: status of project. *Journal Engineering Gas Turbines Power*, 114: 695–700.
- Ochsner, K. (Ed.), 2008. Geothermal Heat Pumps. A guide to Planning and Installing. Earthscan, London. 167 p.
- Perez-Díaz, J. I., Chazarra, M., García-González, J., Cavazzini, G., Stoppato, A., 2015. Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 44: 767–784.
- Rehman, S., Al-Hadhrani, L. M., Alam, M. M., 2015. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 44: 586–598.



- Severson, M. J., 2011. *Preliminary evaluation of establishing an underground taconite mine, to be used later as a lower reservoir in a pumped hydro energy storage facility, on the Mesabi iron range*. Minnesota: Natural Resources Research Institute, University of Minnesota, Duluth, MN, Report of Investigation NRRI/RI-2011/02, 28 p.
- Succar, S., Williams, R. H., 2008. *Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power*. Princeton environmental institute report, 8 p.
- Tola, V., Meloni, V., Spadaccini, F., Cau, G., 2017. Performance assessment of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) power plants integrated with packed-bed thermocline storage systems. *Energy Conversion and Management*, 151: 343–356.
- Winde, F., Kaiser, F., Erasmus, E., 2016. Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydroelectric energy storage schemes. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 78: 668–682.
- Wong, I. H., 1996. An underground pumped storage scheme in the bukit Timah granite of Singapore. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(4): 485–489.
- Younger, P. L., Banwart, S. A., Hedin, R. S., 2002. Mine Water. Hydrology, Pollution, Remediation. *Kluwer Ac. Pubs*. Reino Unido, 442 p.