15
2019

Energía&Minas

Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Técnicos
de Minas y Grados en Minas y Energía

RELACIÓN DE COLEGIOS OFICIALES DEL CONSEJO GENERAL DE COLEGIOS OFICIALES DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS Y GRADOS EN MINAS Y ENERGÍA

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE ARAGÓN
Decano: Emilio Querol Monfil
Pº Mª Agustín, 4-6, ofic. 14 50004 Zaragoza
Tfno: Tlf./Fax 976 442 400
Ámbito territorial: Comunidad autónoma de Aragón.
Sede: Zaragoza.
http://www.coitma.com coitma@coitma.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE CATALUÑA Y BALEARES
Decano: Juan Ignacio Navarro Villanueva
C/ Rosellón, 214. 08008 Barcelona
Tfno: 93 215 13 59 / 93 215 98 09
Ámbito Territorial: Comunidades autónomas de Cataluña y Baleares.
Sede: Barcelona.
http://www.colegiominas.com barcelona@colegiominas.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE CARTAGENA, CASTELLÓN, VALENCIA, ALBACETE, MURCIA, ALICANTE Y ALMERÍA
Decano: Andrés Jerez García
C/ Salitre, 33. 30205 Cartagena (Murcia)
Tfno: 968 50 41 10 / 968 50 41 85
Ambito territorial: Comunidad Autónoma de Murcia, Comunidad Valenciana, y Provincias de Albacete y Almería.
Sede: Cartagena.
http://www.coitminas.com cartagena@coitminas.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE GALICIA
Decano: Juan Carlos Morán del Pozo
C/ Alejandro Novo González, 4 bajo. 15706 Santiago de Compostela (A Coruña)
Tfno: 981 534 356 - Fax: 981 534 357
Ambito territorial: Comunidad Autónoma de Galicia.
Sede: Santiago de Compostela
http://www.coitmgalicia.com correo@coitmgalicia.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE HUELVA, SEVILLA, CÁDIZ, BADAJOZ, CÁCERES Y CANARIAS
Decano: José Luis Leandro Rodríguez
Avda. Martín Alonso Pinzón, 11. 21003 Huelva
Tfno: 959 24 82 13 / 959 24 82 13 Fax: 959 25 79 10
Ambito territorial: Provincias de Huelva, Sevilla, y Cádiz, y Comunidades Autónomas de Extremadura y Canarias.
Sede: Huelva
http://www.cminas.com huelva@cminas.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE CASTILLA Y LEÓN - NORTE Y CANTABRIA
Decano: Victor Aitor Álvarez González
Pza. Sto. Domingo, 4-7º 24001 León
Tfno: 987 23 19 37 / 987 27 29 65
Ambito territorial: Provincias de Castilla y León - Norte y Comunidad Autónoma de Cantabria.
Sede: León
http://www.coitminasleon.com colegio@coitminasleon.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE LINARES, JAÉN, GRANADA Y MÁLAGA
Decano: Rafael Parra Salmerón
C/ Isaac Peral, 10, 1º. 23700 Linares (Jaén)
Tfno: 953 60 63 12 / Fax: 953 65 38 20
Ambito territorial: Provincias de Jaén, Granada y Málaga.
Sede: Linares
http://www.colegiominaslinares.com colegio@minaslinares.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE MADRID, AVILA, CUENCA, GUADALAJARA, SALAMANCA, SEGOVIA, TOLEDO, VALLADOLID Y ZAMORA
Decano: Patricio Gil Cosío
C/ Almagro, 28-5º 28010 Madrid)
Tfno: 91 308 28 42 / 91 319 35 56
Ambito territorial: Comunidad Autónoma de Madrid y provincias de Toledo, Guadalajara, Cuenca, Segovia, Avila, Salamanca, Valladolid y Zamora.
Sede: Madrid
http://www.coitm.org secretaria@coitm.org

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DEL PAÍS VASCO, NAVARRA, LA RIOJA Y SORIA
Decano: Jonatan Rodríguez Calzada
C/ José Mª Olabarri, 6. 48001 Bilbao
94 423 76 67 / 94 423 76 67
Ambito territorial: Comunidades Autónomas de País Vasco, Navarra y La Rioja y la Provincia de Soria.
Sede: Bilbao.
http://www.colminasbi.org colegio@colminasbi.org

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS
Decano: José Augusto Suárez García
C/ Caveda, 14. 33002 Oviedo
Tfno: 98 521 77 47 y 521 77 51 / 98 522 96 74
Ambito territorial: Comunidad Autónoma del Principado de Asturias.
Sede: Oviedo
http://www.colminas.es correo@colminas.es

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE CIUDAD REAL
Decano: José Carlos Losilla Rayo
Pza. de la Constitución, 13 - 1º 13400 Almadén (Ciudad Real)
Tfno: 926 710 517 / 600 579 698 - Fax: 926 098 080
Ámbito territorial: Provincia de Ciudad Real.
Sede: Almadén.
http://www.icoitma.com secretaria@icoitma.com

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA
Decano: Antonio Villareal Pacheco
Pza. Sta. Bárbara, 26. 14200 Peñarroya-Pueblonuevo (Córdoba)
Tfno: 957 56 06 95 / Fax: 957 56 70 77
Ambito territorial: Provincia de Córdoba.
Sede: Peñarroya - Pueblo Nuevo (Córdoba)
http://www.minaspya.org

Energía&Minas

Revista profesional, técnica y cultural de Ingenieros Técnicos de Minas y Grados en Minas y Energía

Edita:
Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Técnicos de Minas y Grados en Minas y Energía
C/ D. Ramón de la Cruz, 88. Oficina 55
28006 Madrid
Tel: 91 402 50 25 / Fax: 91 402 50 63
www.consejominas.org
consejominas@consejominas.org

Comité Ejecutivo:
PRESIDENTE:
José Luis Leandro Rodríguez
VICEPRESIDENTE:
Emilio Querol Monfil
SECRETARIO:
Rafael Parra Salmerón
TESORERO:
Víctor Aitor Álvarez González
Consejeros:
Andrés Jerez García
Carlos Morán del Pozo
Juan Ignacio Navarro Villanueva
Patricio Gil Cosío
Jonatan Rodríguez Calzada
José Augusto Suárez García
José Carlos Losilla Rayo
Juan Antonio Cruz Romero
Antonio Villareal Pachecho

Directora de la publicación:
Nuria Yagües Pérez

Fotografía de portada:
Antonio Palanco Salguero

Colaboran en este número:
Fernando Diaz Riopa, Javier Amorrortu Barreda, Constantino Penedo Ferreiro, Pablo Núñez Fernández, José Ramón García Álvarez, Jesús Caballos, Ramón Hervás Fernández, María de los Remedios Gil Ortega, José García Cascallana, José Carlos Losilla Rayo, Juan José Argudo García, José Luis Díez Basora, Jesús A. Teva Córdoba, Antonio Daza Sánchez, Jesús Gutiérrez–Ravé Caballero, Grupo RNM244-Seminario Antonio Carbonell

Diseño y maquetación:
Arts&Press

Impresión:
Cofás

ISSN 1699-7743
DEPOSITO LEGAL: AS-3.629/2004

Prohibida la reproducción total o parcial del contenido de esta revista sin previa autorización. Los artículos e informaciones firmadas expresan la opinión de sus autores, con la que Energía y Minas no se identifica necesariamente.

04 editorial

El falso debate de la necesidad de colegiación 4

06 actualidad tecnológica

MINERÍA
Manejo selectivo de los estériles de mina. Clasificación NAG-PAG 6

La curva de Bradley en el sector minero 12

Turismo minero en la provincia de Huelva: “todo un tesoro bajo sus pies” 20

ENERGÍA
Evaluación energética de la cogeneración mediante biogás procedente de la digestión anaerobia de fangos de una estación depuradora de agua residuales 28

Intercambiadores de calor subterráneos en sondeos geotérmicos superficiales 52

HIDROLOGÍA
La gestión del agua en distintas civilizaciones: de grecia a la actualidad 60

SEGURIDAD Y SALUD
Visión descriptiva de los planes de contingencia en los puertos de interés general 76

MEDIO AMBIENTE
La piel de las rocas 84

90 actualidad colegial

Grado de Minas y Energía: una profesión que mira al futuro 90

EL FALSO DEBATE DE LA NECESIDAD DE COLEGIACIÓN

José Luis Leandro Rodríguez.
Presidente del Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Técnicos y Grados en Minas y Energía

En más de una ocasión hemos oído decir a compañeros, que como no firman proyectos, no necesitan estar colegiados. Nada más lejos de nuestro ordenamiento jurídico.

La vigente Ley de Colegios profesionales, de conformidad con la redacción formulada en la Ley Ómnibus 25/2009 de 22 de diciembre, establece como criterio general la obligatoriedad de la colegiación y que esta se especificará a través de una Ley estatal. Una Ley que aún no ha sido promovida, ni por tanto aprobada, durante estos últimos nueve años que cumplirá pronto la citada Ley, conocida como Ómnibus.

Mientras ello no ocurra, se mantiene intacta la obligatoriedad de la colegiación para el ejercicio de las profesiones de Ingeniería Técnica, entre ellas obviamente la nuestra.

Por tanto, todos los titulados en Ingeniería Técnica de Minas en sus distintas especialidades y los nuevos titulados de Grado en Minas y Energía a los que les faculta para ejercer la profesión de Ingeniero Técnico, desde cualquiera de los ámbitos en que hagan uso de las competencias adquiridas a través de su titulación universitaria, han de estar obligatoriamente incorporados a un Colegio Profesional.

Para mayor claridad, el Tribunal Constitucional en diversas sentencias, ha considerado inconstitucionales artículos de normas autonómicas, que eximían de la colegiación a sus funcionarios, indicando el Alto Tribunal, que la colegiación sirve como elemento definitorio de la Institución Colegial en razón de la actividad profesional que se realiza. Además, el Constitucional mantiene que la vigente Ley de Colegios, no contiene una excepción a la regla de la colegiación para los profesionales que ejercen su actividad al servicio de cualquiera de las Administraciones Públicas, ya sea estatal, autonómica, provincial, local o en cualquier empresa o ente público.

En el ámbito privado, cualquier titulado universitario que, por dicha condición, esté prestando servicios en una empresa, aunque no firme ningún trabajo técnico, ha de estar colegiado necesariamente.

Es más, desde aquí, no solo informamos de la obligatoriedad de colegiación, sino que además se planteen considerar tanto los que ejercen en la función pública como los que trabajen por cuenta ajena en el ámbito privado, disponer de un seguro de responsabilidad civil profesional específico para este caso, que como todos sabéis, tenemos como opción, en el seguro contratado por el Consejo General para nuestros libre ejercientes. Cada año son más los compañeros que se incorporan a ésta interesante opción.

Desde el Instituto de Graduados e Ingenieros Técnicos de España (INGITE), al que pertenecemos y desde nuestro propio Consejo General y los Colegios que lo componen, se está informando a administraciones y empresas, del necesario cumplimiento de la normativa en este sentido.

A modo de conclusión: La colegiación debemos plantearla como una garantía básica para la sociedad en general, a la que prestamos servicio desde distintos campos de actuación profesional y mucho más importante que eso, como una contribución a la defensa y superveniencia de nuestra bonita profesión en el presente y futuro. Nadie lo hará por nosotros.

ESCANÉAME

Manejo selectivo de los estériles de mina. Clasificación NAG-PAG

Fernando Diaz Riopa. Ingeniero Técnico de Minas.
Javier Amorrortu Barreda. Ingeniero Técnico de Minas.
Constantino Penedo Ferreiro. Ingeniero Agrónomo.
Pablo Núñez Fernández. Licenciado en Geología.
José Ramón García Álvarez. Licenciado de Grado en ciencias Químicas.
Jesús Caballos. Licenciado en ciencias de la Información.

La generación de aguas ácidas ha sido una de las principales problemáticas ambientales en la actividad minera históricamente. Por ello, en la actualidad, la minería se dota de técnicas que evitan impactos negativos sobre el medio. Una de las claves fundamentales para lograr este objetivo es realizar una adecuada caracterización del estéril de mina que sirva de base para su correcta gestión. Los estériles se dividen en dos categorías, según su potencial acidificante, NAG-PAG (No generadora o posiblemente generadora de ácido). Previo al inicio de la actividad, se establece un procedimiento de selección para la fase de operación, y se diseñan las instalaciones más adecuadas para el almacenamiento del material PAG.

Dentro de la actividad minera, los procesos de extracción y tratamiento del mineral generan estériles mineros. Estos materiales pueden tener propiedades físicas y químicas variables. Los volúmenes y el tipo de material producido por la actividad minera dependen del tipo de yacimiento y de las diferentes alternativas tecnológicas utilizadas para su extracción. La composición química de los estériles varía de forma considerable de acuerdo con el mineral extraído y la naturaleza de la formación geológica que contiene al yacimiento mineral.

La roca estéril es un producto de la excavación y es almacenada de forma indefinida en depósitos que suelen estar localizadas en zonas cercanas a las áreas de extracción. Este tipo de materiales generado durante la excavación de la superficie, con el objetivo de exponer las zonas mineralizadas para su extracción o aprovechamiento económico.

El Drenaje Ácido de Roca (ARD: Acid Rock drainage) es la salida de agua ácida de las minas metálicas o de carbón. El ARD se produce por la oxidación de los sulfuros al ser éstos expuestos al aire y al agua; el proceso de oxidación tiene lugar desde condiciones de pH neutras a condiciones de pH ácidas, con o sin disolución de metales pesados, aunque este tipo de drenaje siempre contiene sulfatos (Gard Guide, INAP, 2011).

La minería sostenible aborda este problema ambiental asociado a la minería metálica: se han desarrollado los conocimientos para predecir sus riegos, y los procedimientos y técnicas para prevenir sus efectos en el medio ambiente.

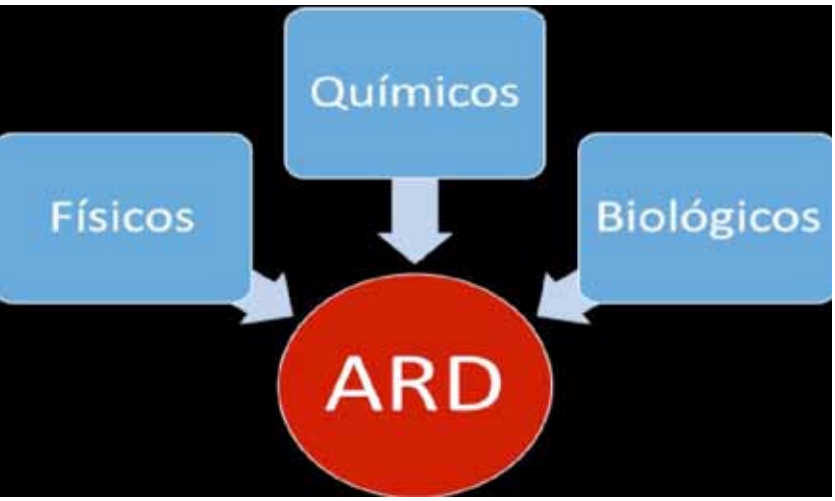
El ARD es un fenómeno abordado en el MTWR **BREF (Best Available Techniques) – Documento de referencia de la gestión de Residuos de las Industrias Extractivas (MTWR: Tailings and Waste-Rock in Mining Activities)**, de conformidad con la *Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006 sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE*.

La Directiva 2006/21/CE tiene como objetivo, Artículo 1:

"…establecer las medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir en la medida de lo posible los efectos adversos sobre el medio ambiente, en particular sobre las aguas, el aire, el suelo, la fauna, la flora y el paisaje, y los riesgos para la salud humana derivados de la gestión de los residuos de las industrias extractivas".

El BREF establece las **Mejores Técnicas Disponibles – MTD** (en inglés BAT) en relación con la gestión de la roca estéril y de los residuos de extracción y tratamiento procedentes de la actividad minera.

El hecho de que el BREF defina MTD específicas para prevenir el ARD, hace evidente que es un fenómeno que puede ocurrir en la actividad minera, y que por tanto existe el conocimiento y las técnicas para su control, incorporándose estas MTD en los proyectos de minería sostenible como el propuesto para la reapertura del Proyecto minero de cobre de Touro (A Coruña). Es precisamente la no aplicación de estas MTD en anteriores actividades extractivas de antiguas minas, como la de Touro, lo que puede implicar



Factores que influyen en la generación de drenaje ácido de roca.

la creación de pasivos ambientales, principalmente la generación de aguas ácidas.

GENERACIÓN DE ARD

La generación del ARD es un fenómeno complejo controlado por una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Es preciso conocer una serie conceptos para poder valorar los riesgos del drenaje ácido, definir las MTD específicas para su prevención, los controles ambientales necesarios y las medidas apropiadas para un manejo selectivo del estéril de mina según su potencial acidificante.

El ARD se refiere al agua ácida que se crea cuando los minerales con sulfuros, en particular la pirita, se oxida por su exposición a condiciones atmosféricas y, a través de una reacción química natural, producen ácido. El ARD tiene el potencial de introducir acidez y metales disueltos en el agua, lo que puede tener consecuencias medioambientales negativas, por ello se debe realizar una evaluación preliminar del potencial de generación, e implantar MTD para contrarrestar dicho fenómeno.

La pirita, arsenopirita y calcopirita son relativamente estables en soluciones oxigenadas en un amplio rango de pH; la pirrotina y marcasita son menos estables y se oxidan a Fe(III) como hidróxidos por encima de pH 2, aproximadamente(1), (2):

$4Fe_7S_8 + 69\ O_2 + 74H_2O = 28Fe(OH)_3 + 64H^+ + 32SO_4^{2-}$ (1)

$4FeS_2 + 15\ O_2 + 14H_2O = 4Fe(OH)_3 + 16H^+ + 8SO_4^{2-}$ (2)

Además, las especies Fe(II) se oxidan a Fe(III), de la siguiente forma:

$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ = 4Fe^{3+} + 2H_2O$ (5)

Las especies Fe(III) también son fuertes agentes oxidantes que ayudan en la oxidación de los sulfuros:

$FeAsS + 7Fe^{3+} + 4H_2O = 8Fe^{2+} + AsO_4^{3-} + 8H^+ + S$ (6)

$CuFeS_2 + 10Fe^{3+} + 4H_2O = 11Fe^{2+} + Cu^{2+} + 8H^+ + S + SO_4^{2-}$ (7)Bibliografía la prevención y el control del ARD son piezas clave en la gestión de explotaciones mineras sostenibles durante su funcionamiento y después del cierre de las mismas.

CONSECUENCIAS DEL ARD

El pH del agua disminuye una vez que comienza la oxidación del sulfuro. En condiciones de pH bajo, el Fe^{2+} (hierro ferroso) se puede oxidar a hierro férrico, que a su vez es capaz de reducirse de nuevo, oxidando a otros minerales . Como resultado, el ARD frecuentemente contiene altas concentraciones de otros metales disueltos (As, Sb, Bi, etc. procedentes de la oxidación de otros sulfuros presentes en el yacimiento, tales como la arsenopirita u otros.

La formación de ARD ocurre naturalmente donde los minerales de sulfuro están expuestos a la atmósfera.

Las actividades de excavación tienen el potencial de acelerar el proceso de ARD al aumentar la superficie expuesta a la oxidación de los minerales de sulfuro. De hecho esta problemática también aparece en otras actividades como la obra pública, como puede observarse en los taludes de la autovía AG-64 Ferrol – Vilalba, a su paso por As Pontes.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TASA DE ARD

La tasa del ARD depende de una serie de factores, tales como:

1. Tipo de minerales presentes: no todos los minerales de los sulfuros se oxidan a la misma velocidad, y pueden ser neutralizados por la presencia de otros minerales, lo que ralentizaría la producción de ARD.

   Este proceso de neutralización natural es intenso cuando existe carbonato cálcico (principal constituyente de las cali-

zas), pero también son neutralizantes los carbonatos de hierro y magnesio, ciertos minerales silicatados y los hidróxidos de hierro y aluminio, que pueden ayudar a elevar el pH.

La cantidad relativa de estos minerales y rocas con capacidad neutralizadora de la acidez, respecto a la cantidad de sulfuros, determina la acidificación o no de las aguas. Si existe bastante carbonato cálcico, Su capacidad de neutralización afectara de forma significativa a la cinética del proceso global, siendo en ocasiones capaz de mantener la neutralidad del medio, si, por el contrario, la cantidad de sulfuros es grande, una vez consumidos los materiales neutralizantes los drenajes volverán a ser ácidos.

2. Cantidad de oxígeno presente: los minerales de sulfuro se oxidan más rápido cuanto más elevada sea la concentración de oxígeno. Como resultado, las tasas de formación de ARD son más altas en áreas donde los sulfuros están expuestos al aire que cuando están cubiertos por una capa de tierra de este modo se evita la exposición directa al oxígeno del aire, y con ello la generación de ARD.
3. Cantidad de agua disponible: A menudo se producen mayores volúmenes de ARD en las áreas donde hay más agua de infiltración disponible para la reacción, por ello, deben encapsularse los estériles de mina con potencial ARD. El agua es importante, además, porque puede transportar los productos de oxidación.
4. El grado de división de los minerales expuestos y su área superficial (m^2/m^3): aceleran en gran medida la reacción química de oxidación de los sulfuros y la formación de ARD.
5. Microorganismos presentes: algunos microorganismos pueden acelerar la producción de ARD. Hay una serie de bacterias que oxidan los minerales de azufre para recibir una fuente de energía; estas bacterias pueden variar la tasa de oxidación de azufre y son un factor importante en la formación del ARD.

IMPACTOS DEL ARD

El ARD tiene el potencial de disminuir la calidad del agua al reducir el pH y aumentar el contenido de metales disueltos tanto en aguas superficiales y subterráneas. El impacto ambiental del ARD depende del tamaño y la sensibilidad del cuerpo de agua afectado, y la cantidad de neutralización y dilución que se produce. Por ejemplo, el mismo volumen de ARD tendría un impacto mucho mayor en la calidad del agua en un regato que lo que tendría en el cauce de un río relevante, que tiene una mayor **capacidad de dilución**, y en su desembocadura, hay que considerar que el agua salada tiene una mayor **capacidad de amortiguación** de ácido que el agua dulce.

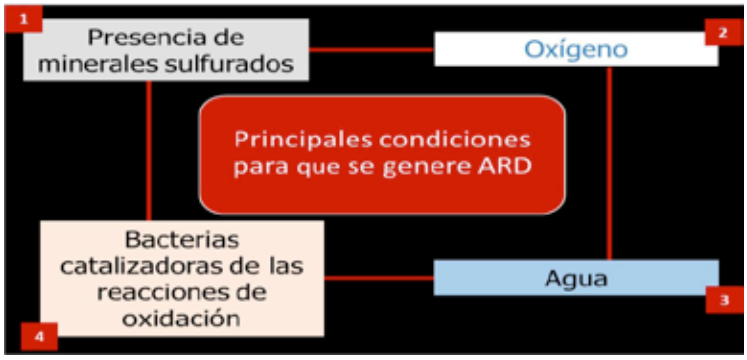
El agua ácida puede producir también efectos sobre la operación minera: el alto contenido de sulfatos en las aguas ácidas puede deteriorar la calidad del agua de mina, creando problemas de corrosión en las instalaciones y equipos de producción minera. Además dificulta las actuaciones de revegetación y estabilización de los residuos mineros, ya que la generación de ácido puede frenar el establecimiento de una capa vegetal.

Finalmente, los depósitos de estériles que generan ARD pueden convertirse en pasivos ambientales, requiriendo la aplicación de medidas correctoras muy costosas.

MANEJO SELECTIVO NAG-PAG

La composición mineral de los estériles es función de su litología. Dependiendo del contenido de azufre y de las propiedades de lixiviación, los estériles se clasifican generalmente en dos categorías: con potencial ARD, denominado PAG (*Potentially acidic rock drainage generating*), y sin potencial ARD, denominado NAG (*Non potentially acidic rock drainage generating*). Esto requiere un **manejo selectivo** de los materiales, que implica una **preordenación química y manejo selectivo de flujos de estériles,** definida en el BREF como:

"Segregación de materiales en función de sus propiedades químicas y de lixiviación para reducir la cantidad total de residuos que se eliminarán en una instalación de residuos de Categoría A (es decir, que contienen residuos peligrosos) y permitir el posible uso de la fracción inerte como subproductos, por ejemplo, áridos. El manejo selectivo



Factores que influyen en la generación de ARD.

también permite una administración más específica de cada volumen al adaptar y optimizar los tratamientos de residuos implementados".

A modo de ejemplo, se muestra la gestión selectiva propuesta para el PAG y el NAG, de acuerdo con el MTWR BREF (EC-JRC 2009), y que se corresponde con el Manejo Selectivo que se plantea en el Proyecto Touro:

- Las formaciones geológicas en un depósito de mineral de sulfuros a menudo muestran **zonificación**, con un **contenido elevado de pirita en las capas cercanas al mineral**. En la minería a cielo abierto, en algunos casos, es posible **administrar selectivamente** los tipos estériles de mina utilizando las propiedades geoquímicas como criterio. Una cuidadosa cartografía geológica y análisis de seguimiento utilizando testigos de sondeos son medios muy útiles para proporcionar la información necesaria para la clasificación. En base a esto, es posible separar el estéril en PAG y NAG.
- El estéril NAG requerirá medidas de almacenamiento menos rigurosas que los estériles PAG, para este último se han diseñado instalaciones y operaciones de manejos específicas: depósito de estériles PAG, encapsulamiento, almacenamiento por debajo del nivel freático, etc.
- El material NAG también se puede usar para amortiguar el ácido generado por el material PAG, por ejemplo, en la mezcla, la disposición conjunta o la encapsulación.
- La gestión selectiva de los estériles no exige tecnología avanzada, sino simples rutinas para la recopilación de información y la gestión del material de acuerdo con estos resultados.
- El estéril de bajo contenido en azufre puede cumplir los criterios de calidad exigibles para materiales de construcción, evitando el uso de nuevas materias primas y permitiendo el desarrollo de la **economía circular** (uso como árido en construcción y obra pública).

Al aplicar la preclasificación, se pueden lograr los siguientes beneficios:

- Prevención y / o reducción de la cantidad total de materiales estériles.
- Prevención y / o reducción de la cantidad total de estériles no inertes.
- Prevención y / o reducción de la cantidad total de estériles peligrosos.
- Reducción de la huella de las instalaciones de materiales extractivos.

APLICACIÓN DEL MANEJO SELECTIVO EN EL PROYECTO DE LA MINA DE TOURO

La clasificación previa y la manipulación selectiva de los volúmenes de estériles se suelen aplicar en la minería de metales con materiales estériles potencialmente generadores ácidos y no ácidos, como es el caso de la Mina de Touro, basándose en la evaluación de la relación de potencial de acidificación.

El proyecto de explotación incluye la caracterización, instalaciones y procedimientos específicos para la gestión NAG-PAG.

El programa de caracterización de estériles implementado en este proyecto tiene en cuenta, métodos, guías y normas aceptadas, a nivel europeo e internacionalmente, para predecir el comportamiento ambiental de los estériles. La caracterización inicial se basa en un grupo de muestras de sondeos cuidadosamente seleccionadas y representativas (225 muestras) de los volúmenes que se estima extraer durante la vida de la mina.

La evaluación del potencial generador de ARD debe llevarse a cabo mediante **ensayos**

geoquímicos estáticos y dinámicos o cinéticos. Los resultados de estos ensayos nos permiten definir el manejo ambiental adecuado de los residuos mineros.

El cometido de los ensayos estáticos es caracterizar el potencial de generación de ácido de una muestra representativa. Los definidos como potencialmente generadores de ácido, PAG, o los inciertos serán sobre los que se realicen los ensayos cinéticos.

Los ensayos cinéticos geoquímicos implican someter las muestras a las condiciones ambientales y simular condiciones controladas en el laboratorio, con el fin de confirmar el potencial para generar acidez, determinar las velocidades de generación de ácido, oxidación de sulfuros, neutralización y, además, poder ensayar técnicas de control y tratamiento, si fuese necesario. El ensayo cinético más habitual es el de Celda Húmeda (HCT),El procedimiento de prueba se basa en ciclos de lavado con agua y evaluación del lixiviado. Se puede realizar in situ con agua de lluvia (en 1 año hidrológico completo) o en forzado (4 meses).

Los programas de caracterización geoquímica con muestras del yacimiento de Touro incluyen métodos de vanguardia aceptados internacionalmente para predecir el comportamiento ambiental de los estériles de mina. ■

BIBLIOGRAFÍA

Directiva 2006/21/Ce del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006 sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE.

Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries in accordance with Directive 2006/21/EC. Elena Garbarino, Glenn Orveillon, Hans G. M. Saveyn, Pascal Barthe, Peter Eder. 2018.

Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera. Ministerio de Minería de Chile. Noviembre 2002.

Drenaje acido de mina generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Osvaldo Aduvire - Dr. Ing. de Minas. Madrid 2006.

Ian Wark Research Institute & Environmental Geochemistry International (2002) ARD Test Handbook. P387A Project. Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage, AMIRA International, Melbourne.

The International Network for Acid Prevention (INAP) (2009) Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide) http://www.gardguide.com.

Mine Environment Neutral Drainage (MEND) (2009) Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Report 1.20.1. December 2009.

Nordstrom, D.K. and ALPERS, C.N. 1999, Geochemistry of Acid Mine Waters, in: The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques, and Health Issues (Plumlee, G.S., September 2014 and M.J. Logsdon, eds), Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, Volume 6A, Ch. 6, p. 133-154.

Proyecto Touro. Plan de muestreo y ensayos de laboratorio. Golder Associates. Febrero 2018.

Overview of Materials Characterization and Environmental Management Planning. Life Cycle Geo. Presentation given by Tom Meuzelaar. Abril 2019.

1. Hinojosa O., Oxidación de sulfuros, importante proceso de pretratamiento, Seminario (TPA 5340), Maestria en tecnología de protección ambiental, Universidad Técnica de Oruro, 2002.

2. Marsden, J. and House I., The Chemistry of gold extraction, first Edition, Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña, 1992.

3. Peters, E., Direct Leaching of Sulfides: Chemistry and applications, Metal. Trans. 7(B), 505-517, 1976.

4. Osseo-Asare, K., Xue, T. and Ciminelli, V., Solution chemistry of cyanide leaching systems In: Precious Metals: Min. Extr.& Proc. Ed. Kudryk, Metall Soc. AIME, pp 173-197, 1984.

5. Garrels, R. and Christ, C.L., Solutions, Minerals and Equilibra, New York, pp 440, 1965.

6. Senanayake, G. & Muir, D. M., Speciation and reduction potentials of metal ions in concentrated chloride and sulphate solutions relevant to processing base metal sulphides, Metal. Trans. 19(B), 1988.

Se han consultado otras publicaciones.

La curva de Bradley en el sector minero

Bradley´s curve in the mining sector

Ramón Hervás Fernández. Ingeniero Técnico de Minas, Grado en Ingeniería de Tecnología de Minas y Energía. Máster Oficial Universitario en Prevención de Riesgos Laborales, Auditor de Prevención de Riesgos laborales.

RESUMEN

El objeto de esta comunicación es explicar cómo una organización, en este caso minera, puede saber en qué estado de madurez en seguridad se encuentran sus trabajadores. Para ello, se utiliza una herramienta denominada "Curva de Bradley", ideada por DuPont en 1994, que permite a través de diferentes fases ver la evolución de dicha madurez, prestando especial atención a las últimas fases (independiente e interdependiente), para lo cual es fundamental centrarse en los comportamientos inseguros de los operarios mineros, origen del 80% de los accidentes laborales. Asimismo, se hace una breve descripción del modelo de gestión preventiva denominado "Seguridad Basada en el Comportamiento", el cual nos facilita una mayor comprensión de los actos inseguros cometidos por los operarios de la explotación.

ABSTRACT

The purpose of this communication is to explain how an organization, in this case mining, can know in what state of maturity in security its workers are. For this, a tool used "Bradley Curve" is used, devised by DuPont in 1994, which allows the evolution of this maturity through different phases, paying special attention to the last phases (independent and interdependent), for which It is essential to focus on the unsafe behaviors of mining operators, the origin of 80% of occupational accidents. Likewise, a brief description is made of the preventive management model called "Behavior Based Safety", which facilitates a greater understanding of the unsafe acts committed by the operators of the operation.

PALABARAS CLAVE: Curva de Bradley, accidentes laborales, comportamiento inseguro, operario minero, seguridad basada en el comportamiento.

KEYWORDS: Bradley´s curve, occupational accidents, unsafe behavior, mining operator, Behavior Based Safety.

INTRODUCCIÓN

Para los que nos dedicamos a la gestión preventiva uno de los aspectos más difíciles de tratar no tiene nada que ver con equipos móviles de trabajo o con las Disposiciones Internas de Seguridad, sino con las personas que trabajan en la explotación minera y sus comportamientos. En este sentido, de todos es sabido que la minería es una de las actividades que mayores riesgos entraña para los trabajadores que desempeñan las labores propias del sector.

Dichos trabajadores se enfrentan diariamente a riesgos que, en caso de que se materializaran en accidente, podrían causar importantes daños a la salud. Además, estos riesgos se agravan con el hecho de que la mayoría de los trabajos mineros se realizan a la intemperie, lo cual hace que los trabajadores se vean expuestos a condiciones ambientales extremas, siendo además el lugar de trabajo muy rápidamente cambiante en el tiempo, a veces de forma diaria.

Por todo ello, podemos decir que la probabilidad de producirse el accidente es alta en este sector, y dada su peligrosidad estaríamos hablando de que dicho accidente se pueda transformar en mortal para el trabajador. También es cierto que hasta que se llega a esta fatal consecuencia para la salud del operario existen riesgos o situaciones de menor entidad que se deben conocer y que pueden dar lugar a los llamados “incidentes”, basados en los comportamientos inseguros de los operarios mineros.

Por otro lado, se puede afirmar que existe una correlación directa entre el nivel de cultura de seguridad de cualquier empresa y su número de accidentes, de tal manera que cuanto mayor sea dicho nivel de cultura de seguridad, menor será el número de incidentes y, por tanto, el de accidentes. Asimismo, se mejorarán aspectos tan importantes en la organización como la productividad, la calidad, los beneficios y por supuesto el clima laboral. También se ha comprobado que empresas del mismo sector minero, con los mismos procedimientos de gestión y procesos de trabajo tienen diferentes índices de accidentabilidad, incluso para distintos centros de una misma empresa.

Por tanto, cabe deducir de lo anterior que es fundamental reducir el número de incidentes ya que con ello estaríamos atacando o disminuyen-

do directamente el número de accidentes. Es decir, que se hace necesario saber en qué nivel de seguridad en el trabajo se encuentra nuestra organización para poder resolver con mayor o menor facilidad dichos incidentes.

En este sentido, en la década de los noventa del siglo pasado, el director general de DuPont, Ed Woolard, creó el denominado *DuPont Discovery Team* para definir un sistema que permitiese alcanzar una mejora en la seguridad de las organizaciones que fuese sostenible y duradera.

Fue entonces cuando nace la famosa "Curva de Bradley" (Figura 1) que nos ayuda a comprender el nivel de madurez en seguridad de la organización. Veámoslo con un ejemplo para un maquinista minero:

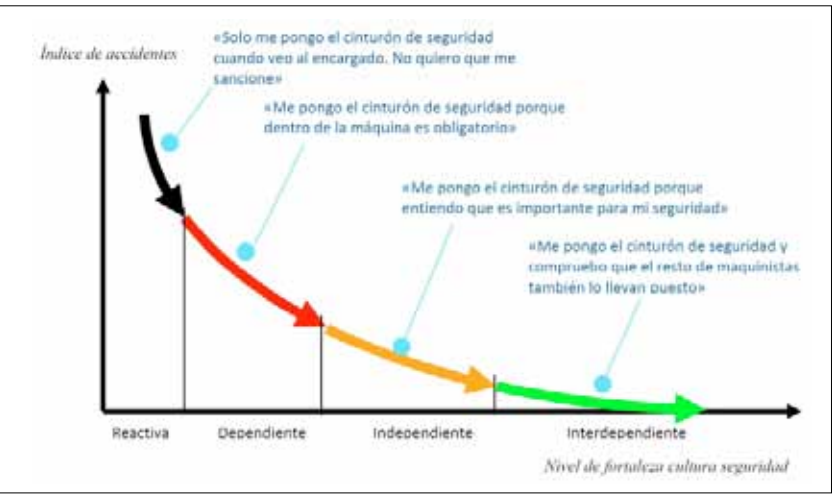


Figura 1. Curva de Bradley (DuPont, 1994)

FASES DE LA CURVA DE BRADLEY

Fase 1 = Reactiva: seguridad basada en el instinto natural.

La organización solo actúa en seguridad después de que se haya producido un problema (accidente, inspección de seguridad por parte de la Autoridad Minera...). Nadie está comprometido con la seguridad: ni la dirección, ni los mandos intermedios ni los propios trabajadores mineros.

Fase 2 = Dependiente: seguridad basada en las reglas.

La organización trabaja en la evaluación de riesgos y dicta reglas y normas (Disposiciones Internas de Seguridad, procedimientos de trabajo, etc.) basadas en accidentes experimentados y/o normativa específica, que en el sector minero es abundante. Solo están comprometidas con la seguridad las personas con funciones específicas de seguridad. Se cumplen las normas impuestas si las personas indicadas están en el puesto de trabajo incidiendo sobre el propio trabajador.

Fase 3 = Independiente: seguridad basada en el compromiso personal.

El operario minero entiende porqué se han establecido las reglas y acepta el valor añadido que hay para seguirlas. Todo el personal está comprometido con la seguridad, mediante su compromiso particular, la formación y el uso adecuado de equipos de trabajo. Mi seguridad es mi responsabilidad se podría resumir esta fase.

Fase 4 = Interdependiente: seguridad basada en la cooperación entre equipos. Como equipo, ahora los operarios se cuidan mutuamente y no aceptan que nadie incumpla las normas de seguridad establecidas. Además, son capaces de proponer mejoras y soluciones en la seguridad de la explotación o planta minera. Todos los estamentos de la empresa (dirección, mandos intermedios y resto de trabajadores) tienen un compromiso colectivo con la seguridad.

En las fases 1 y 2 se trabaja más en la redacción de normas y su cumplimiento, en el diseño y control de puestos y equipos de trabajo, fijos o móviles, como palas cargadoras y/o planta de clasificación de mineral, por ejemplo, en la formación de los operarios mineros (*ITC 02.01.02 Formación preventiva para el desempeño del puesto de trabajo*), cumplimiento de normativa industrial (electricidad, aire comprimido, etc.), laboral (iluminación, temperatura, polvo, etc.), entre otras cuestiones. A estos efectos se utilizan los correspondientes controles periódicos, auditorías o inspecciones, reglamentarias o no. Tras estas auditorías se elaborará un plan de acción con las medidas propuestas para mejorar las situaciones inseguras, a medio/largo plazo, con responsables de su cumplimiento y con fechas al efecto. Todo esto evitará condiciones inseguras que posteriormente pueden provocar accidentes laborales.

Pero la clave está en centrarse en los comportamientos inseguros, los cuales pueden ser corregidos de forma inmediata, ya que además de estar relacionados con el 80% de todos los accidentes laborales (Figura 2), trabajar sobre los accidentes no parece que tenga mucho sentido, primero porque se producen con poca frecuencia, afortunadamente, y segundo porque ya es demasiado tarde. Centrándonos, pues, en el comportamiento del operario minero podremos llegar a las fases 3 y 4 de la curva (independiente e interdependiente). Al mismo tiempo que se accede a dichas fases aumentaremos el nivel de madurez de la empresa.

Veremos qué herramientas podemos utilizar para llegar a las fases mencionadas y alcanzar con ello el objetivo deseado de "cero accidentes". Aunque, como se ha comentado, cada empresa minera tiene su propia cultura de seguridad, influenciada por el titular del derecho minero o explotador, que determinará su índice de accidentabilidad.

CAUSAS INMEDIATAS DE ACCIDENTES

Actos inseguros (aprox. 80%)

1. Operar equipos sin autorización.
2. No señalar o advertir.
3. Fallo en asegurar adecuadamente.
4. Operar a velocidad inadecuada.
5. Poner fuera de servicio los dispositivos de seguridad.
6. Eliminar los dispositivos de seguridad.
7. Usar equipo defectuoso.
8. Usar los equipos de manera incorrecta.
9. Emplear en forma inadecuada o no usar el equipo de protección personal.
10. Instalar carga de manera incorrecta.
11. Almacenar de manera incorrecta.
12. Levantar objetos de forma incorrecta.
13. Adoptar una posición inadecuada para hacer el trabajo.
14. Realizar mantenimiento de los equipos mientras se encuentran en marcha.
15. Hacer bromas pesadas.
16. Trabajar bajo la influencia del alcohol y/u otras drogas.

Condiciones peligrosas (aprox. 20%)

1. Protecciones y resguardos inadecuados.
2. Equipos de protección inadecuados o insuficientes.
3. Herramientas de protección inadecuadas o insuficientes.
4. Espacio limitado para desenvolverse.
5. Sistemas de advertencia insuficientes.
6. Peligro de explosión o incendio.
7. Orden y limpieza deficientes en el lugar de trabajo.
8. Condiciones ambientales peligrosas: gases, polvos, humos, emanaciones metálicas, vapores.
9. Exposiciones a ruidos.
10. Exposiciones a radiaciones.
11. Exposiciones a temperaturas altas o bajas.
12. Iluminación excesiva o deficiente.
13. Ventilación insuficiente.

Figura 2. Causas de accidentes (lista no exhaustiva).

Las ventajas de actuar sobre este comportamiento son claras: la mayor parte de los problemas de seguridad se inician ahí, por lo que es el momento de evitar que la situación vaya a mayores y provoque un accidente. Por otro lado, el trabajador percibe que la medida propuesta es inmediata, a diferencia de las condiciones inseguras que irán planificadas a medio/largo plazo. Finalmente, el efecto se multiplica estadísticamente hablando.

Pongamos por ejemplo que en una explotación minera el operario accede a una tolva a 5 metros de altura sin ningún tipo de protección, ni colectiva ni individual. Es observado por su encargado que rápidamente se apresura a decirle que no está permitida esa operación sin protec-

ción. Inicialmente el trabajador advertido puede que perciba esa situación como algo personal, que la empresa está contra él. En este caso, estaríamos en la fase 2 antes descrita. La cuestión es convencerle de que un comportamiento seguro va en beneficio de él y de la propia compañía. Si eso se consigue y el trabajador cambia de actitud cada vez que trabaje en altura habremos dado un gran paso en la madurez en seguridad de ese operario y entraríamos en la fase 3. Si finalmente este trabajador es capaz de advertir a otros trabajadores, compañeros o de empresas externas, de la prohibición de trabajar en altura sin protección habremos llegado a la situación ideal de madurez en una empresa, estaríamos ya en la fase 4 de la Curva de Bradley. Llegar hasta aquí no es fácil ni mucho menos. Se requieren muchos esfuerzos y un clima laboral que favorezca la confianza y la comunicación entre todos los trabajadores.

Hay diferentes herramientas para ese convencimiento del que hemos hablado. Las visitas de seguridad al puesto de trabajo para detectar esos comportamientos inseguros y corregirlos inmediatamente, pueden ser una herramienta magnífica. Otra sin duda es la ejemplaridad de los mandos intermedios: encargado, jefe de planta, el propio director facultativo, etc. El operario debe percibir que la seguridad es un proceso sin fin y a ello ayuda que esos mandos intermedios sean ejemplares. Cualquier impresión negativa persistirá más que muchas otras positivas en la mente de aquel. Finalmente, la falta de ejemplaridad significa bajo nivel de expectativas, es decir, que el mejor resultado que se puede esperar de tu equipo en materia de seguridad va a estar relacionado con el nivel más bajo de expectativas que haya podido demostrar. Volviendo al ejemplo anterior, si mi encargado accede a trabajos en altura sin protección, ¿por qué he de hacerlo yo? Se preguntará y se responderá el trabajador minero. Además, este operario entenderá que la seguridad puede "adaptarse" y en función de qué circunstancias cumpliré o no la norma.

Si además de ser ejemplares, fomentamos la comunicación con el resto de trabajadores, agradeciendo sus comportamientos seguros (que los tiene sin duda), reforzando positivamente lo que hace bien y actuamos rápidamente para conseguir que el puesto de trabajo sea más seguro estaremos sin lugar a dudas contribuyendo a mejorar el comportamiento de cualquier trabajador. Además, sería ideal a estas alturas de la madurez en seguridad del operario, obtener su compromiso formal de que va a cambiar su actitud y a partir de ese momento trabajará con seguridad en altura. Pero esto no puede acabar aquí, ya que podemos obtener el compromiso por parte del trabajador de que su actitud o comportamiento va a ser "bueno" a partir de una determinada situación concreta (trabajos en altura), pero lo cual no quiere decir que para el resto de operaciones vaya a actuar bien (podría andar por la explotación sin ropa de alta visibilidad, por zonas no autorizadas para peatones, etc.). Por tanto, no debemos bajar la guardia ya que deliberadamente o no se puede volver a equivocar. Si el encargado hoy no está en la planta seguramente, por ahorrar tiempo…, subiré a la tolva de 5 metros de altura sin protección. Si se da esta circunstancia en la empresa minera habremos retrocedido peligrosamente en la gestión de la seguridad basada en el comportamiento.

Las visitas de seguridad al puesto de trabajo para detectar esos comportamientos inseguros y corregirlos inmediatamente, pueden ser una herramienta magnífica.

SEGURIDAD BASADA EN EL COMPORTAMIENTO

Como comentamos anteriormente, trabajar sobre los accidentes no parece muy práctico si nuestro objetivo es disminuirlos sino, más bien, centrarnos en las condiciones inseguras de nuestros operarios mineros, o lo que es lo mis-

Figura 3. Observación de comportamiento
(Revista Seguridad y Medio Ambiente Nº 134 Fundación MAPFRE).

mo, trabajar en su comportamiento. Para ello, es necesario asumir que en cualquier explotación minera debemos tener normas: Disposiciones Internas de Seguridad, procedimientos internos (espacios confinados, alturas, etc.), normas de obligado cumplimiento (elaboradas por la Autoridad Minera y/o Dirección Facultativa), entre otras. Y que además esas normas pueden ser no respetadas por los trabajadores de la explotación, sean propios o contratados. Veamos a continuación las razones principales por las que un trabajador decide incumplir una norma:

- Falta de conocimiento: el trabajador no conoce la norma (DIS, etc.) bien porque no ha sido formado e informado, bien porque no se ha actualizado dicha formación, por lo que puede estar trabajando en la explotación de forma insegura sin saberlo.
- Falta de atención: el director facultativo o el titular del derecho minero actúa como si la seguridad no fuera tan importante como la calidad o la producción. Por tanto, si el inmediato superior prefiere la producción a la seguridad y además no es ejemplar, es fácil entender que el propio operario no cumpla las normas establecidas en la explotación.
- Falta de medios: el operario minero no dispone de la herramienta o equipo adecuado, o incluso el equipo de protección individual. Puede que aún teniéndolo tuviera que desplazarse por la explotación hasta encontrarlo, en este caso prefiere saltarse la norma, por aquello de ahorrar tiempo, y "adaptarse" a la situación.
- Decisión consciente y deliberada: la mayoría de las veces cuando el trabajador toma una decisión deliberada lo hace por "buenas razones", está convencido que haciéndolo de una determinada manera, aunque incumpliendo las normas de seguridad, él siente que trabaja de manera más eficiente.

De las 4 razones expuestas, la que mayor peso tiene en el comportamiento inseguro de un trabajador en una explotación minera, dando por hecho que la organización le ha facilitado los medios y formación adecuados, sería en nuestra opinión la elección que hace de forma consciente y deliberada. Esta elección la hace porque el propio trabajador valora lo que gana al incum-

plir las normas (ahorro de tiempo, aumenta la producción, menos esfuerzo, posible reconocimiento de su encargado, etc.) y lo que pierde al cumplirlas, que generalmente será tiempo. Es decir, que ante cualquier decisión que tomemos en el ámbito laboral y que pueda afectar a nuestra seguridad instintivamente elegimos "ganar" o "perder", equilibramos nuestro comportamiento en función de las "ventajas" o "desventajas" que nos produce tal decisión.

Entre las ventajas ya hemos citado algunas anteriormente, y entre las desventajas (de trabajar de forma segura) tendríamos el accidente ocurrido o la sanción impuesta por parte de la empresa al propio trabajador (el artículo 29 de la Ley 31/95 así lo contempla). Se da la circunstancia de que estas "desventajas" se pueden considerar riesgos eventuales, es decir, se pueden producir o no, mientras que las "ventajas" (ahorro de tiempo, menos esfuerzo, etc.) son hechos que se pueden experimentar, de ahí que nuestro comportamiento esté altamente influenciado por las consecuencias percibidas o experimentadas, frente a las probables o eventuales.

MODELOS PARA AFRONTAR EL COMPORTAMIENTO

Existen diferentes modelos para explicar cómo podemos afrontar estos comportamientos, sabiendo ya de antemano porqué los llevamos a cabo. Uno de estos modelos es el denominado "ABC" (Antecedente, Comportamiento y Consecuencia), el cual nos explica que encontrando el antecedente adecuado se puede evitar el comportamiento inseguro. Es decir, que si el trabajador minero ha sufrido una caída de altura desde 5 metros por no utilizar ningún tipo de protección, esa misma circunstancia le servirá a próxima vez para saber que su comportamiento debe ser el adecuado si no quiere sufrir de nuevo otro accidente. El mismo ejemplo nos vale para ilustrar que si el trabajador ha sido sancionado por no usar arnés de seguridad, la próxima vez se cuidará de llevarlo puesto. El inconveniente de este modelo, en nuestra opinión, es que no es fácil encontrar el antecedente, o dicho de otra forma, no debemos esperar a que el trabajador tenga un accidente (o sea sancionado) para suponer que la próxima vez su comportamiento será el correcto, ya que el accidente, afortunadamente, no se produce con frecuencia.

Por otro lado, existe otro modelo denominado "PIC NIC" (Positivo, Inmediato, Cierto – Negativo, en el Fututo, Incierto) y nos explica que si no hemos encontrado el antecedente correcto (accidente, sanción), podemos centrarnos en las consecuencias adversas, y hacer ver al operario que existen y se pueden producir en la práctica. De entrada, las consecuencias que parecen ciertas e inmediatas tendrán más poder de influir en nuestro comportamiento que las que son inciertas y a futuro (accidente, sanción) y harán, por tanto, que nuestro operario tenga un comportamiento u otro. Lo que se pretende con este modelo es hacer entender al operario que el hecho de trabajar en altura sin protección tiene consecuencias negativas, y que pueden ser ciertas e inmediatas, aunque él las perciba como inciertas y a futuro. Se trata de cambiar un hábito. Nada fácil, por supuesto.

CONCLUSIONES

Explicado de esta manera el porqué de nuestro comportamiento en el ámbito minero (extrapolable también al ámbito personal, simplemente piense si siempre ha conducido sin coger el móvil o si no ha cruzado la calle con el semáforo de peatones en rojo, por poner dos ejemplos) es fácil entender que es muy difícil cambiar un hábito de trabajo adquirido durante mucho tiempo y que se requiere mucho esfuerzo, formación, saber escuchar, comunicación (ascendente y descendente), entre otros factores, para conseguir el cambio de actitud deseado en nuestro operario. Estamos hablando de educar en la conducta.

Una cosa parece clara, y es que si nuestro trabajador no está convencido no va a cumplir las normas. De nada sirve que las cumpla solo si existe la "presión" de un mando intermedio o superior (encargado, director facultativo, etc.) ya que si esa presión disminuye volverá al estado inicial de comportamiento inseguro. Recordemos que le es más beneficioso y que además piensa que trabajando a sí es más eficaz. Si queremos que los trabajadores de nues-

Trabajar sobre los accidentes no parece muy práctico si nuestro objetivo es disminuirlos sino, más bien, centrarnos en las condiciones inseguras de nuestros operarios mineros, o lo que es lo mismo, trabajar en su comportamiento.

tra explotación sean fieles cumplidores de las normas de seguridad y, por tanto, lleven a cabo comportamientos seguros a lo largo de su vida laboral es necesario hacer mucha pedagogía y convencerles acerca de los beneficios de cumplir las normas, transmitiendo además la idea de la compañía de que trabajar de forma insegura no está permitido, a pesar de esa supuesta "eficacia" que el propio operario percibe. Cuando estén convencidos no será necesario incentivos externos para el cumplimiento de las mismas. El refuerzo positivo (reconocimiento, ascenso, cambio de puesto, participación en nuevo proyecto, etc.) en este sentido es fundamental para asegurarnos de que los cambios perduren en el tiempo, ya que hace que los operarios entiendan que hay un valor agregado el comportarse de manera segura.

Otro aspecto de especial importancia de cara a afianzar el comportamiento seguro de nuestros trabajadores es la ejemplaridad, tanto del titular de los derechos mineros como de cualquier mando intermedio con responsabilidades sobre el resto de operarios. Ya hemos incidido en su importancia. Aquellos no deben tolerar actos inseguros, ni siquiera en situaciones de presión. Es necesario que los operarios perciban que el grado de exigencia no decrece y que se antepone la seguridad a otros factores. La corrección de comportamientos inseguros debe ser argumentada, educada y nunca con carácter represivo ni amenazante.

Finalmente, mediante las visitas de seguridad a la explotación/planta minera también se contribuye a detectar comportamientos inseguros y, ¡cómo no! comportamientos seguros y trabajos bien hechos, que también los hay en nuestro centro de trabajo y que hay que empezar reconociendo y felicitando siempre que nos comuniquemos con un trabajador, si realmente queremos mostrar nuestra preocupación por mejorar su puesto de trabajo y con ello reducir accidentes laborales. Se trata de la comunicación positiva y constructiva, fundamental para influir y cambiar comportamientos. ■

BIBLIOGRAFÍA

- 1. Gómez Pardo Miguel A. 2017. "El comportamiento como eje de la cultura preventiva". Revista El Prevencionista. Edición 24.
- Serrano Oliva Antonio. 2016. "¿Qué nos enseña la curva de Bradley?". Revista Seguridad y Salud en el Trabajo.
- Quispe Chahua Héctor W. 2015. "Evaluación aplicando la técnica escalonada de la cultura de seguridad en Volcán Compañía Minera Unidad Yauli", Tesis Universidad Nacional de Ingeniería.
- P. J. García Ramón y J.F. Vallejo Carrera. 2014. "Cero accidentes es alcanzable", Revista Seguridad y Medio Ambiente nº 134 Fundacion Mapfre.

WEBGRAFÍA

- http://previpedia.es/Curva_de_Bradley
- https://latam.consultdss.com/curva-bradley/
- http://insht.es
- https://www.dupont.com/industries/safety-protection/workplace-safety-consulting.html.

Turismo minero en la provincia de Huelva: "todo un tesoro bajo sus pies"

Mining tourism in the province of Huelva: "a whole treasure under your feet"

María de los Remedios Gil Ortega. Ingeniero Técnico de Minas, Ingeniero Técnico de Obras Públicas, Técnico de Prevención de Riesgos Laborales. Director facultativo.

RESUMEN

En este artículo analizamos algunas de las posibilidades turísticas del patrimonio minero de Huelva: Mina Concepción, Mina de la Zarza, Minas de Cala, Mina Sotiel, Mina de Tharsis -Filón Norte y Mina Confesionarios..

ABSTRACT

In this article we analyze some of the tourist possibilities of the mining heritage of Huelva: Concepción Mine, Zarza Mine, Cala Mines, Sotiel Mine, Tharsis Mine -Filón Norte and Confesionarios Mine.

Palabras clave: minería, turismo, minas, patrimonio minero y Huelva
Key words: mining, tourism, mines, mining heritage and Huelva.

Puente sobre el río Odiel, ferrocarril de Concepción.

El número de experiencias sobre turismo de patrimonio minero ha crecido en los últimos años en España, contribuyendo a la revalorización de un tipo de recurso que, en determinados casos, ha conseguido hacerse un pequeño hueco en un contexto turístico cada vez más competitivo.

La minería ha supuesto una transformación paisajística de las comarcas mineras de Huelva, conformando un patrimonio añadido al de la propia naturaleza. Huelva posee un potencial turístico espectacular en torno a la minería. El atractivo que genera el patrimonio vinculado a la minería es, que, por un lado, se conozca y, por otro, perdure la riqueza y siga generando una importante actividad económica.

Como bien dice el apartado "Paisajes" del Atlas de Andalucía de la Junta de Andalucía: … "El resultado es un paisaje violento pero sorprendente, degradado pero atrayente, en el que se admira a un tiempo la capacidad creadora y destructora de una sociedad" …. Las Comarcas Mineras de Huelva atesoran estos sentimientos, donde el patrimonio minero merece su conocimiento y disfrute. Unos ejemplos de este rico patrimonio son: Mina Concepción, Mina de la Zarza, Minas de Cala, Mina Sotiel, Mina de Tharsis y Mina Confesionarios.

MINA CONCEPCIÓN

La Fija.

Está situada en el término municipal de Almonaster la Real, en un paraje llamado La Herrumbre, donde se extraía pirita para obtener cobre y azufre. Fue trabajada por los tartesios y los romanos, donde sus trabajos quedaron reflejados en pozos, galerías de desagüe y escoriales al norte del yacimiento.

En 1853, se inició el arranque mediante sistema de huecos y pilares en dos pisos y también se extrajo mineral mediante una pequeña explotación a cielo abierto que apenas llegó a 13 metros de profundidad. Tras dos cambios de propiedad, Ibarra y Compañía, en 1874, vendió la mina a James Hill Co. que, ante el mal estado de los trabajos subterráneos, continuó la explotación de Concepción a cielo abierto. La explotación llegó en la corta al nivel 6º, mediante cinco bancos, vaciando los minerales hasta el piso 9º. Estos eran transportados mediante un túnel cuya salida estaba al otro lado del respaldo sur de la Corta, junto a un recodo del Odiel, en el lugar conocido como Parra Gorda. Allí estaban los talleres, los canaleos y la planta de trituración, entre otras instalaciones. Por 1905 la

Corta de Mina Concepción.

United Alkali adquirió Concepción, con su amplia corta a cielo abierto.

Existía un ferrocarril minero que traía los minerales desde la mina de Concepción, pasando por la Fija y por el ferrocarril de El Buitrón, que llegaba hasta el embarcadero de San Juan del Puerto que conectaba con el puerto de Huelva. La línea tenía que salvar el río Odiel mediante un puente mixto, en curva, formado por seis arcos de medio punto, de mampostería de piedra y ladrillo, muy sólidamente construidos, y un tramo central cuyo tablero está constituido por una doble viga de hierro en cajón, de celosía, por cuya parte superior circulaba el tren y es conocido con el nombre de Puente de Chapa (de una longitud total de 111.5 metros, la altura sobre el nivel de estiaje en su tramo metálico es de 18.8 metros y su anchura de 3.10 metros), y un plano inclinado junto al río Tintillo, llamado "La Fija", donde tenía que subir el tren con los vagones de mineral por una pendiente de un kilómetro de longitud y una pendiente del 32%, siendo la altura que había de salvar de 168 metros. El mecanismo era el siguiente: mientras una formación subía tirada por una máquina de vapor fija en la parte superior, otro tren bajaba haciendo de contrapeso.

La corta, de forma elíptica, abierta hacia el Norte, se encuentra inundada. Sus medidas en el nivel de acceso superior, nivel 1 – 2, son de 340 x 120 metros, mientras que en el nivel medio o de acceso, son de 272 x 92 metros. Desde aquí el agua se encuentra a unos 14 metros.

MINA DE LA ZARZA

Se encuentra situada en el término municipal de Calañas. Fue un criadero con altas concentraciones en cobre y azufre.

Estas minas fueron trabajadas por tartesios y romanos, los cuales abrieron numerosos pocillos que han llegado a nuestros días y han dado nombre al cabezo de Los Silos, ya que en la región llaman silo a cualquier cueva, pozo o lugar subterráneo. Se llegaron a contar en dicho cabezo más de 800 de estos pocillos.

Permanecieron paradas hasta que en el año 1853 el ingeniero francés Don Ernesto Deligny las denunció. Entre 1859 y 1866 la empresa de Deligny, la Compagnie des Mines des Cuivres d´Huelva, benefició en La Zarza 48.926 Tm de mineral y rehabilitó el socavón Sur, conocido como Los Cepos.

La Zarza fue arrendada en 1866 a la compañía escocesa The Tharsis Sulphur and Copper Co. Ltd., cuya sede social estaba en Glasgow y, pocos años más tarde, esta compañía, que había absorbido a la francesa Compagnie des Mines de Cuivres d'Huelva, adquirió las concesiones de La Algaida que contenían en su subsuelo la importante masa mineral Nº 3.

En torno a la corta de los Silos se localizan los dos pozos de extracción y las instalaciones necesarias para la transformación del mineral, almacenaje y transporte. Estos dos pozos de extracción están dispuestos directamente en las bocaminas. La Zarza cuenta aún con el malacate Nº 4 (Dorman Lone Co. Ltd, 1913) y el pozo Algaida (de los años 30). De estructura de hierro uno y mixta: metálica y hormigón que elevaban 1000 y 2000 t/ día de mineral respectivamente.

Las instalaciones de triturado se encuentran situadas junto a los dos pozos de extracción y los silos de almacenamiento del mineral, conectados a través de cintras transportadoras a los grandes pozos de extracción. Se conservan los dos silos, uno junto al pozo N º 4 y el otro junto al Algaida, de idéntica tipología.

En 1886 la compañía inglesa inició, al pie del cabezo de los Silos. El transporte del mineral se realizaba por aquella época a lomos de caballerías y más tarde con unas máquinas de vapor llamadas La Hormiga y La Oveja. En 1891 se construyeron los canaleos para obtener el cobre a partir de las chatarras.

Pozo La Algaida y silo de triturado, almacenamiento y descarga de mineral del pozo nº 5 La Algaida.

Interior casa máquina extracción.

Hasta finales del siglo XIX, coincidiendo con la apertura del ferrocarril, La Zarza había sido explotada mediante el sistema de huecos y pilares, siendo todo el mineral extraído sometido a calcinación in situ para así poder obtener cobre.

La corta de La Zarza, que llegó a tener 13 niveles en total, estuvo en plena producción hasta 1913, año en el que la extracción a cielo abierto fue suspendida, siendo sustituida por labores subterráneas.

Con forma de doble lentejón, la impresionante e irregular corta a cielo abierto de La Zarza tiene 852 metros de longitud máxima por 240 metros de anchura media (214 y 317 metros en los lentejones de Poniente y Levante, respectivamente).

La cantidad total de mineral extraído en La Zarza entre 1867 y 1960 fue muy importante y ascendió a 27.425.859 Tm. En junio de 1991, estando en explotación por la Compañía Española de Minas de Tharsis, se realizaron en la mina de La Zarza las últimas extracciones de mineral. El cierre definitivo de sus instalaciones se produjo el 16 de enero de 1996, siendo trasladados los obreros a Tharsis.

Corta de la mina de Cala.

MINA DE LA CALA

También fue conocida con el nombre Los Dolores. Fue trabajada en la Edad de Piedra, en el Neolítico. Los trabajos romanos están demostrados por varias calicatas en la vertiente N. de la Sierra del Venero y algunos socavones, como uno, que se encontraba sobre roca caliza que descendía a 50 metros en forma de escalera de caracol. Otro, llamado de Los Esqueletos o Galería Romana, contenía, junto con otros restos, los esqueletos de varios mineros, algunos con grillos en los pies y herramientas en las manos, lo que indica que debieron morir mientras trabajaban, víctimas de un derrumbamiento.

Un tercer socavón, aún localizado a nivel más bajo, llamado Dominesa, se creyó de posible origen romano también, aunque parece ser que es más reciente y toma su nombre del descubridor y director de la mina, Antonio Domenech, en 1853. Por la segunda mitad del siglo XIX, se hizo cargo de la explotación una empresa portuguesa que, desarrollando sus trabajos sobre el llamado Filón Portugués, llegó a montar una fundición, que tuvo poco éxito debido a la escasa ley cúprica del mineral.

En el mes de junio de 1866 se expidieron en Madrid los títulos de San Fermín y Los Dolores a favor de Ángel de Ayala y Urbina, siendo registradas como minas de cobre. Cada una de las dos concesiones tenía una extensión de 12 Ha. En mayo de 1879 la propiedad de estas minas pasó Lorenzo Hernández y Muñoz de Toro, mientras que entre 1884 y 1885 figuraba como propietario Juan Christian Klein. En 1885 la empresa portuguesa Sociedad Portuguesa das Minas de Cala adquirió las minas, siendo la empresa que las explotó en forma significativa o continuada por primera vez en tiempos modernos, comprobándose de esta manera que el mineral que allí abundaba no era cobre, el cual estaba sólo en la superficie, sino que eran minas de hierro, concretamente de magnetita.

La compañía fue a la quiebra en 1893 al no poder exportar el mineral obtenido, pues este hierro no era competitivo ni siquiera en los mercados nacionales.

Los trabajos se reemprendieron en 1897 por la empresa The Cala Mines Sindicate Ltd., con sede en Londres, con un breve período de propiedad a favor del súbdito portugués Don Julio Núñez Augusto, de Lisboa, entre 1894 y 1897.

En 1900 los ingleses vendieron las minas por 21.636,44 € a unos empresarios vizcaínos que constituyeron la Sociedad Anónima Minas de Cala, creada un año antes.

El 13 de julio de 1963 la Sociedad Anónima Minas de Cala vendió a Don Ignacio Iturain Arocena las 11 concesiones mineras que le pertenecían al precio de 2.404 €, cuatro de ellas en el término municipal de Bodonal (Badajoz).

Con fecha 24 de febrero de 1965 la propiedad pasó a Compañía Minera del Andévalo S.A. que las explotó hasta 1981. Desde 1984 hasta su final en el año 2010, la mina fue explotada por la empresa Prerreducidos Integrados del Suroeste.

MINA DE SOTIEL

Sus afloramientos, ya desaparecidos por las labores mineras, consistían en vetas de requemones ferruginosos pequeños. No existían, las típicas monteras de óxidos ferruginosos, los cuales descienden en el yacimiento, junto a las piritas, hasta profundidades superiores a los 100 m.

Galería Romana.

Corta de Fraguas Viejas

En esta mina los romanos llegaron con sus socavones hasta profundidades de más de 100 metros. En su interior se encontraron norias, 3 tornillos de Arquímedes y una bomba de Ctesibio (ahora en el Museo Arqueológico Nacional, Madrid) que elevaban el agua a las galerías desde donde, por sus pendientes, saldría.

Estas minas fueron trabajadas por tartesios y romanos, los cuales abrieron numerosos pocillos que han llegado a nuestros días y han dado nombre al cabezo de Los Silos, ya que en la región llaman silo a cualquier cueva, pozo o lugar subterráneo. Se llegaron a contar en dicho cabezo más de 800 de estos pocillos. Había también dos escoriales romanos, el más importante junto a la zona llamada El Registro.

Los primeros explotadores en épocas modernas son Roberto Brunton y poco después, la empresa Daguerre d'Hospital Hermanos, que realizo labores de desescombro de trabajos antiguos, abriendo nuevas galerías y exportando mineral entre 1866 y 1875. El trabajo más importante la inició la compañía portuguesa Companhia Mineira Sotiel Coronada, que adquirió la mina en el año 1883, comenzando la explotación tanto por contramina como a cielo abierto.

En 1888 trabajaban en Sotiel un total de 940 obreros, de los que 401 estaban en trabajos subterráneos.

En los primeros años, hasta 1904, gran parte del mineral se benefició principalmente por tostación al aire libre, en las llamadas teleras.

La primera mina que compró la empresa inglesa The United Alkali Co. Ltd. en Huelva fue la de Sotiel, el 31 de diciembre de 1904, a la Companhia Mineira Sotiel Coronada. La extracción a partir de entonces y hasta 1911 fue masiva y exportada casi en su totalidad a Inglaterra. Desde 1911 los minerales de Sotiel fueron desviados casi por completo a la cementación de las Viñas.

La corta tiene forma elíptica bastante regular, abierta hacia el NW siendo sus medidas de 230 por 115 metros y casi 80 metros de profundidad, conservándose aún visibles, en diversos niveles, numerosas bocas de galerías. La mina se explotó intensamente hasta el nivel 250, ya bajo el nivel del cauce del río y, con menor intensidad hasta los 396 metros. Hacia 1924 se suspendió la extracción de piritas, mientras que se siguieron explotando las zonas cobrizas del piso 18, llamado El Infierno, la región 21 y la Masa Grande o región llamada del 5 por 100. En 1931 era la única mina en activo de United Alkali.

Aún son visibles algunas de las antiguas chimeneas de ventilación de la mina de Sotiel Coronada, única mina de la que nos quedan vestigios de la utilización del tiro forzado mediante fuego para la ventilación, así como el malacate metálico del Pozo Isidro y algunas instalaciones y construcciones de las anteriores compañías mineras, todo en bastante mal estado de conservación.

MINA DE THARSIS -FILÓN NORTE

Corta Filón Norte.

Los yacimientos minerales de Tharsis fueron explotados desde la antigüedad por tartesios y romanos que buscaron metales preciosos en las zonas superiores de las monteras de gossan. Después de los romanos no hubo trabajos mineros importantes hasta la Revolución Industrial, debido a que vinieron investigadores extranjeros en busca de escorias romanas para obtener piritas. Fue esto, por lo que, Deligny redescubre en 1853 esta mina y le da el nombre de Tharsis. Este buscó socios y formó la Compagnie des Mines de Cuivre de Huelva para poder empezar a explotar las minas de Tharsis.

En 1855 la esta compañía inició la minería a cielo abierto y en 1866 inició la explotación a cielo abierto en el Filón Norte. En la actualidad la Corta Filón Norte mide 969 metros de longitud por 548 metros de anchura en su parte central, con profundidad de algo más de 135 metros.

En 1867 la compañía francesa, por no disponer de capital suficiente, arrendó la mina a la empresa escocesa, The Tharsis Sulphur and Copper Company Limited, con sede en Glasgow que terminó por absorber a la empresa gala.

En los años setenta la compañía británica cesó sus actividades mineras y las traspasó a la Compañía Española de Minas de Tharsis S.A, que tras la crisis del cobre en 1996 adoptó la fórmula de Sociedad Anónima Laboral y pasó a ser propiedad de los trabajadores. Pero en el año 2000 Minas de Tharsis cerró definitivamente la explotación de Filón Norte (su principal cliente, Fertiberia, dejó de usar sus piritas).

Se encuentra en Filón Norte, los talleres y cocheras de ferrocarril, la fundición (siglo XIX) y el taller donde se trataban las traviesas de las vías. También hay un malacate donde subía y bajaba a contramina y se accedía a la sala de bombas y un sistema de canaleos para la cementación natural y obtención del cobre por lixiviación.

En cuanto al sistema de explotación de mineral, aparte de las galerías en la antigüedad y las cortas a cielo abierto, se utilizó el sistema de teleras. En 1877 había 450 teleras encendidas.

MINA CONFESIONARIOS

Se encuentra situada en el término municipal de Cortegana. En esta mina, existe la posibilidad de ver formaciones típicas de las monteras de gossan (es una capa de piritas oxidadas que indica que debajo de él hay cobre y azufre. Se puede comparar con una manzana: cuando se parte y se pone en contacto con el aire, al cabo de un tiempo aparece oxidada y ennegrece, el interior de la manzana sería el yacimiento de cobre y azufre y la parte oxidada sería el gossan donde se concentra oro y plata) conocidas en la zona como confesionarios. Este nombre es debido al parecido con los confesionarios de las iglesias.

En esta mina se ha extraído sobre todo pirita de hierro, debido a que es muy pobre en cobre. Por este motivo, los romanos no la trabajaron. Fue a partir del siglo XIX cuando compañías francesas decidieron aprovechar el verdadero valor de esta mina, el azufre de las piritas, para abastecer fábricas de ácido sulfúrico de su país.

El periodo de explotación de esta mina fue de 15 años. Después de la visita de sondeo de Ernesto Deliggny a mediados del siglo XIX en busca de pirita, no se explotó la mina hasta 1886, cuando la compañía francesa Compagnie des Mines de Cuivre d´Aguas Teñidas la adquirió para iniciar la explotación a cielo abierto. Pocos años más tarde la arrendaría

Corta de la Mina Confesionarios.

a la Sociedad Francesa de Piritas de Huelva, pero la explotaría por pocos años, ya que a finales del siglo XIX estaba agotada.

Existe una chimenea de la máquina de vapor que movía el malacate, el cargadero de mineral a la entrada del pueblo donde se trituraba el mineral y se volcaba para su transporte al puerto de Huelva, la estación y diversas construcciones del poblado.

Actualmente, la corta, inundada por un agua de fuerte color azul oscuro, de forma sensiblemente circular, mide 180 por 220 metros de longitud, medidas en el nivel de la galería de acceso.

En 1945 la Sociedad Francesa encargó nuevos sondeos que no indicaron la existencia de masas de mineral significativas y por tanto siguió improductiva.

CONCLUSIONES

El patrimonio minero comienza a ser entendido en España. Los avances en la protección mediante la declaración de Bienes de Interés Cultural (BIC) a castilletes, malacates, salas de máquinas etc., es un claro ejemplo de ello, pero aún insuficiente en muchos territorios en los que la amenaza de ruina pone en peligro dichos elementos y el patrimonio intangible se va perdiendo a la vez que desaparecen las generaciones de trabajadores ahora envejecidas. También es aún insuficiente el interés despertado en la comunidad científica y académica, así como de las instituciones a la hora de crear instalaciones museísticas que aseguren la pervivencia de este legado material e inmaterial. Conseguir que todo ello se traslade al ámbito político, se incluya en la labor de las administraciones a favor de la defensa del patrimonio y se concrete en una planificación adecuada es el gran reto del presente.

Os animo a conocer este increíble patrimonio, el cual, a mí me apasiona ya que me crecí en una comarca minera y como se dice en mi pueblo: “quien no sabe de donde viene, no sabe hacia dónde va”. ■

Agradecimientos: Quiero agradecer a Ángel Domínguez Sánchez–Barranco su ayuda a la realización de este artículo, por facilitarme documentación, por su disposición, por explicarme y acompañarme a descubrir este patrimonio.

BIBLIOGRAFÍA

- Carrasco Martínez I, Historia de la Faja Pirítica Ibérica, Revista Bocamina, Revista de Minerales y yacimientos de España, nº 5, abril de 2000.
- Manzano J.R., Membrillo F. y Romero E., La Tierra Herida. Fundación El Monte. Sevilla, 2005.
- Pérez Macías J.A, Las minas de Huelva en la antigüedad. Diputación Provincial de Huelva, 1998.
- Pinedo Vara I, Piritas de Huelva, minería y aprovechamiento. Editorial Summa, S.L. Madrid, 1963.
- Documentación técnica para la declaración de bien de interés cultural en la categoría de sitio histórico de la cuenca minera de Tharsis y la Zarza en Huelva.
- Alguacil Herrero I., Ganado Abad M. y Vázquez Gómez C., Mirando a cielo abierto. Egmasa,2007.

Evaluación energética de la cogeneración mediante biogás procedente de la digestión anaerobia de fangos de una estación depuradora de agua residuales

José García Cascallana. Ingeniero Técnico de Minas

El objetivo de este artículo es realizar los balances de masa y energía térmica de las líneas de fangos y biogás, generación de energía eléctrica y económico del proceso de obtención de biogás mediante digestión anaerobia mesofílica de fangos en una estación depuradora de aguas residuales. Los datos de partida se han obtenido aplicando la media aritmética simple o ponderada a cada uno de ellos durante los años 2011-2015. El resultado económico neto obtenido ha indicado unos ahorros anuales de 478.912 € en la importación de energía eléctrica a la red, 244.104 € en la disminución del transporte y tratamiento posterior del fango deshidratado y 76.590 € en el consumo de polielectrolito, unos costes de operación de 266.445 €, obteniéndose un ahorro total de 533.161 €, un periodo de amortización de 9 años y un beneficio a los 25 años de 9.031.525 € respecto a la misma planta sin digestión anaerobia.

PALABARAS CLAVE: biogás, gasómetro, intercambiador, digestor y motor de biogás.

1. INTRODUCCIÓN.

La estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Burgos trata tanto las aguas residuales municipales como las industriales del entorno de la ciudad de Burgos. Esta planta fue construida en el año 1984 y constaba hasta finales del año 2015 de un pretratamiento, un tratamiento primario y uno secundario de las aguas residuales con objeto de devolverlas al río Arlanzón depuradas y dentro de los parámetros de vertido establecidos, y además, mediante la digestión anaerobia convencional mesofílica de los fangos originados en el propio proceso, generaba biogás que era consumido en los motogeneradores instalados, produciendo una cantidad importante de energía eléctrica que era autoconsumida íntegramente en la propia planta. Para mejorar este proceso anterior, a partir de 2016 se introdujo en la planta un tratamiento terciario (decantación lamelar, ozono y rayos ultravioleta) y se instaló un pretratamiento de hidrólisis térmica al fango antes de ser digerido, con el objeto de aumentar las producciones de biogás y energía eléctrica y además, la obtención de un inferior flujo de fango deshidratado.

La digestión anaerobia es un proceso que produce energía verde y si se tiene en cuenta que la generación total de desechos en la Unión Europea ascendió a 2.505 Mt/año en 2010, lo que supone una producción personal cercana a 5 t desechos/habitante·año, se puede apreciar claramente el gran potencial energético que se puede conseguir con este tipo de proceso (Cano, 2014). El tratamiento de los fangos se ha convertido en un problema internacional dentro de la gestión de los residuos sólidos urbanos, debido a varias causas como pueden ser el estricto control actual de los vertederos, el impacto negativo en las aguas subterráneas, la emisión de CO_2 y CH_4, los malos olores, el elevado espacio necesario y los costes económicos que este tratamiento conlleva (Liao et al., 2015). El sistema de fangos activados es el tratamiento biológico más común en las EDAR debido a su buen rendimiento y alta eficacia, pero también utiliza altas cantidades de energía, representando más del 40% de la energía eléctrica total necesaria para operar en una EDAR (Silvestre et al., 2015). Desde el punto de vista termodinámico, la materia orgánica presente en las aguas residuales puede considerarse como una fuente de energía y además de

carácter renovable (Cano et al., 2015). Biogás es el nombre popularmente usado para denotar la mezcla inflamable de gases que se generan cuando un material orgánico sufre el proceso de descomposición anaeróbica. Cuando la materia orgánica se descompone en ausencia de O_2, se produce la transformación de la misma inicialmente en intermediarios ácidos y posteriormente se genera la conversión subsecuente de estos ácidos en CH_4 y el resto CO_2 con trazas de otros gases (Abbasi et al., 2012).

El objeto de este artículo es el análisis de la cogeneración a partir del biogás producido mediante digestión anaerobia mesofílica de los fangos entre los años 2011-2015 en la EDAR de Burgos sin ningún tipo de pretratamiento efectuado al fango antes de su entrada en los digestores, intentándose demostrar la viabilidad técnico-económica de este tipo de proceso en comparación con la misma planta sin digestión anaerobia y sin considerar ningún tipo de incentivo económico a las energías renovables. Se trata de conseguir que los fangos sean considerados como una materia energética, pues a partir del biogás obtenido y tras su combustión íntegra en los motogeneradores instalados se pueda producir energía eléctrica y ser autoconsumida en su totalidad en la propia planta y además disminuir el flujo de fango deshidratado y el consumo de polielectrolito, lográndose en conjunto un ahorro económico importante.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Descripción del proceso de digestión anaerobia.

Los microorganismos anaerobios descomponen los sólidos presentes en el fango en ausencia de O_2 siendo el objetivo de la digestión anaerobia reducir y estabilizar la materia orgánica, de forma que, la digestión rompe y después descompone la materia orgánica resultando que después de una adecuada digestión, los sólidos digeridos tienen poca actividad bacteriana (IDAE, 2007). El proceso de digestión anaerobia se puede dividir en las siguientes cuatro fases o etapas (Bishnoi, 2012; Moreno-Gutiérrez, 2016):

1. **Hidrólisis**: el material orgánico insoluble y los compuestos de alto peso molecular tales como lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos se solubilizan en sustancias orgánicas solubles (aminoácidos, azúcares, alcoholes y ácidos grasos de cadena larga) bajo el efecto de muchas enzimas extracelulares producidas por las bacterias hidrolíticas.

2. **Acidogénesis**: los componentes formados anteriormente se desintegran por medio de las bacterias acidogénicas resultando la formación de los compuestos intermedios denominados ácidos grasos volátiles (AGV). También puede convertirse la materia orgánica soluble directamente en acetato, NH_3-N y H_2S por fermentación o en H_2 y CO_2 por oxidación anaeróbica.

3. **Acetogénesis:** los AGV se digieren adicionalmente por las bacterias acetogénicas para formar los precursores directos del CH_4, por un lado acetato, NH_3-N y H_2S y por el otro H_2 y CO_2. Mediante las bacterias homoacetogénicas se puede convertir directamente el H_2 y CO_2 en acetato, NH_3-N y H_2S.

4. **Metanogénesis**: los metanógenos convierten el ácido acético, NH_3-N y H_2S producido previamente y el H_2 y CO_2 en CH_4 y CO_2. Los metanógenos son anaerobios estrictos y tienen una tasa de crecimiento muy lenta, por lo que, su metabolismo se considera generalmente limitante de la velocidad y se requiere un tiempo de retención prolongado para el crecimiento.

La Figura 2.1 muestra el diagrama de bloques simplificado de las fases o etapas principales de la digestión anaerobia. La mayoría de los investigadores indican que la etapa limitante de velocidad para la digestión del material particulado es la etapa de hidrólisis, mientras que la metanogénesis es la etapa de limitación de velocidad para los sustratos fácilmente biodegradables.

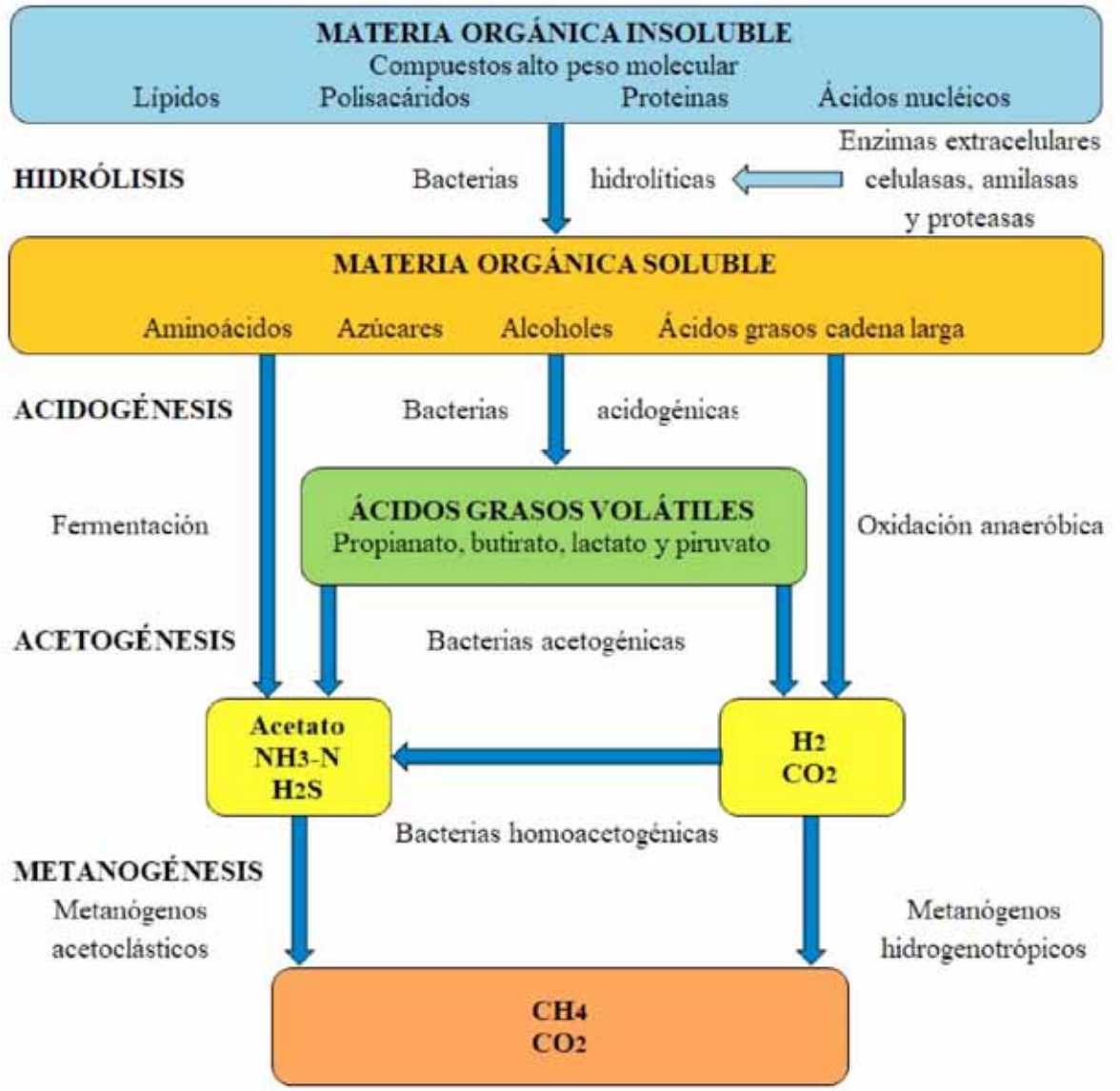


Figura 2.1. Fases o etapas principales de la digestión anaerobia (Moreno-Gutiérrez, 2016).

2.2. Descripción de la EDAR de Burgos.

La EDAR de Burgos trata las aguas residuales tanto de origen municipal como industrial de los alrededores de la ciudad de Burgos desde el año 1984 en que fue construida. El tratamiento antes del 2016 consistía en un tratamiento primario (desbaste, desarenado-desengrasado y decantación primaria) y secundario (reactores biológicos y decantación secundaria). El fango primario y secundario o activo creado en los decantadores primarios y secundarios se impulsaba por un lado a los espesadores de gravedad y por otro a los de flotación con objeto de aumentar su concentración en sólidos totales (ST). Desde estos espesadores, se enviaban a la arqueta de fangos mixtos donde ambos se mezclaban, y posteriormente se impulsaban a los digestores con el propósito de obtener por un lado fango digerido que se enviaba a deshidratación y por otro biogás que era quemado en los motogeneradores instalados para la obtención de energía eléctrica que se autoconsumía íntegramente en la propia planta.

2.3. Datos de partida.

El periodo de análisis de este artículo comprende el intervalo entre los años 2011 y 2015, siendo el caudal medio de entrada de aguas residuales

Tabla 2.1. Datos de partida del punto de diseño de fango espesado (EDAR, 2016).

Parámetros	Valores medios	Desviación típica	Coeficiente variación (%)
Fango espesado primario (m^3/d)	423	84	19,9
Fango espesado secundario (m^3/d)	242	32	13,3
Fango espesado total (m^3/d)	665	80	12
Concentración ST fango primario (%)	4,7	0,5	10,6
Concentración ST fango secundario (%)	6,7	0,8	11,9
Porcentaje sólidos volátiles (SV) fango primario (%)	72,3	3,4	4,7
Porcentaje SV fango secundario (%)	81	1,4	1,7
Caudal fango deshidratado (m^3/d)	104	14	13,5
Concentración fango deshidratado (%)	20,3	1,6	8,1
Producción biogás digestores (m^3/d)	11.155	442	4
Potencia eléctrica generada (kW)	913	84	9,2

de 91.712 17.210 m^3/d, coeficiente variación 18,8%, (EDAR, 2016) y los valores de los parámetros del fango de entrada que constituyen el punto de diseño de fango espesado se encuentran representados en la Tabla 2.1.

La EDAR disponía de una capacidad de tratamiento de aguas residuales de 118.000 m^3/d y 833.000 habitantes equivalentes y tenía instalados tres digestores de 6.000 m^3, tres motogeneradores de biogás para producción de energía eléctrica de potencias 638 (M_{638}), 597 (M_{597}) y 480 (M_{480}) kW y tres bombas centrífugas de deshidratación de fangos de 35 m^3/h (EDAR, 2016). La Tabla 2.2 muestra los parámetros de cálculo de operación asociados con la generación de biogás y energía eléctrica.

2.4. Cálculo del balance de masa y energía térmica de la línea de fangos.

Esta línea se divide en tres bloques de funcionamiento: arqueta de fangos mixtos, digestores y deshidratación, indicándose a continuación todas las Ecuaciones necesarias para realizar los balances de esta línea.

2.4.1. Bloque 1 arqueta fangos mixtos.

Las Ecuaciones 2.1 y 2.2 permiten obtener el balance de masa y energía térmica del Bloque 1 arqueta de fangos mixtos.

Tabla 2.2. Parámetros de cálculo de operación proceso (EDAR, 2016).

Parámetros	Valores	Parámetros	Valores
Proporción fango primario/secundario (%/%)	55/45	Rendimiento bombas centrífugas (%)	90
Densidad ST fango (kg/m3) (Metcalf, 1998)	1.400	Concentración fango deshidratado (%)	20,3
Calor específico ST fango (kg/kg·ºC)	1,5	Número digestores (uds)	3
Temperatura fango entrada (ºC)	15	Volumen por digestor (m^3)	6.000
Temperatura media Burgos (ºC) (IDAE, 2010)	10,7	Diámetro (m)	22
Poder calorífico inferior biogás (kJ/m^3)	21.240	Altura muros (m)	15,5
Potencia térmica específica biogás (kWh/m^3)	5,9	Altura zona cónica biogás (m)	2,5
Calor específico biogás (kJ/kg·ºC) (Biomassa, 2018)	1,56	Altura cono solera (m)	2,2
Temperatura digestión anaerobia (ºC)	37	Espesor hormigón cubierta (m)	0,3
Presión salida biogás digestores (kPa)	100,7	Espesor hormigón muros (m)	0,6
Concentración CH4 biogás (%)	62,4	Espesor hormigón solera (m)	0,6
Consumo específico polielectrolito (kg/t ST)	7,5	Espesor poliuretano paredes (m)	0,05
Consumo agua dilución (m^3/kg polielectrolito)	0,200	Conductividad térmica hormigón (W/m·ºC)	1,63
Número motogeneradores (uds)	3	Conductividad térmica poliuretano (W/m·ºC)	0,03
Temperatura salida gases chimenea (ºC)	142	Coefic. película interior cubierta (W/m·ºC)	0,10
Rendimiento recuperador energía (%)	85	Coefic. película exterior cubierta (W/m·ºC)	0,04
Número gasómetros (uds)	3	Coefic. película interior muro (W/m·ºC)	0,13
Volumen total gasómetros (m3)	2.262	Coefic. película exterior muro (W/m·ºC)	0,04
Reducción SV (%)	45,2	Coefic. película interior solera (W/m·ºC)	0,17
Temperatura biogás gasómetros (ºC)	30	Coefic. película exterior solera (W/m·ºC)	0,04
Pérdidas intercambiadores y tuberías (%)	10	(Aroca-Lastra y Varela-Díez, 2014)	
*Nota: todos los volúmenes de biogás están expresados en condiciones STP (0ºC y 100 kPa)			

Balance de masa

$$M_{ST\text{-}pr}+M_{ag\text{-}pr}+M_{ST\text{-}se}+M_{ag\text{-}se}= M_{ST\text{-}fm}+M_{ag\text{-}fm} \qquad (2.1)$$

Balance de energía térmica

$$M_{ST\text{-}pr}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_0+M_{ag\text{-}pr}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_0+M_{ST\text{-}se}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_0+M_{ag\text{-}se}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_0=M_{ST\text{-}fm}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_0+M_{ag\text{-}fm}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_0 \qquad (2.2)$$

donde $M_{ST\text{-}pr}$ es el flujo másico de ST del fango primario (kg/h), $M_{ag\text{-}pr}$ el de agua del fango primario (kg/h), $M_{ST\text{-}se}$ el de ST del fango secundario (kg/h), $M_{ag\text{-}se}$ el de agua del fango secundario (kg/h), $M_{ST\text{-}fm}$ el de ST del fango mixto (kg/h), $M_{ag\text{-}fm}$ el de agua del fango mixto (kg/h), $C_{p\text{-}ST}$ el calor específico de los ST del fango (kJ/kg·ºC), $C_{p\text{-}ag}$ el calor específico del agua (kJ/kg·ºC) y T_0 la temperatura ambiental del fango (ºC).

2.4.2. Bloque 2 digestores.

Las Ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5 representan el balance de masa y energía térmica del Bloque 2 digestores.

Balance de masa

$$M_{ST\text{-}fm}+M_{ag\text{-}fm}=(1\text{-}RSV\cdot Por_{SV\text{-}fm})\cdot M_{ST\text{-}fm}+M_{ag\text{-}fm}+M_{bi\text{-}di}=(M_{ST\text{-}di}+M_{ag\text{-}di})+M_{bi\text{-}di} \qquad (2.3)$$

$$RSV=(M_{SV\text{-}fm}-M_{SV\text{-}di})\cdot 100/M_{SV\text{-}fm} \qquad (2.4)$$

$$Por_{SV\text{-}fm}=(M_{ST\text{-}pr}\cdot Por_{SV\text{-}pr}+M_{ST\text{-}se}\cdot Por_{SV\text{-}se})/\ (M_{ST\text{-}pr}+M_{ST\text{-}se}) \qquad (2.5)$$

$$M_{SV\text{-}fm}=Por_{SV\text{-}fm}\cdot(M_{ST\text{-}pr}+M_{ST\text{-}se}) \qquad (2.6)$$

Balance de energía térmica

$$(M_{ST\text{-}fm}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_0+M_{ag\text{-}fm}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_0)/\ 3.600+PT_{IRF}=$$
$$=(M_{ST\text{-}di}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_{di}+M_{ag\text{-}di}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_{di}+M_{bi\text{-}di}\cdot C_{p\text{-}bi}\cdot T_{di})/3.600+Perd_{tr}+Perd_{in\text{-}tu} \qquad (2.7)$$

donde RSV es la reducción de SV (%), $Por_{SV\text{-}fm}$ el porcentaje de SV en el fango mixto (%), $M_{ST\text{-}di}$ y $M_{ag\text{-}di}$ los flujos másicos de ST y agua de salida digestores (kg/h), $M_{bi\text{-}di}$ el flujo másico de biogás (kg/h), $M_{SV\text{-}fm}$ y $M_{SV\text{-}di}$ los flujos másicos de SV del fango mixto de entrada y del fango digerido de salida de los digestores (kg/h), $M_{ST\text{-}pr}$ y $M_{ST\text{-}se}$ los flujos másicos de ST primario y secundario (kg/h), $Por_{SV\text{-}pr}$ y $Por_{SV\text{-}se}$ los porcentajes de SV primario y secundario (%), $M_{ST\text{-}pr}$ y $M_{ST\text{-}se}$ los flujos másicos de ST primario y secundario, PT_{IRF} la potencia térmica del intercambiador de recirculación de fangos (kW), T_{di} la temperatura de operación de los digestores (ºC), $C_{p\text{-}bi}$ el calor específico del biogás (kJ/kg·ºC), $Perd_{tr}$ y $Perd_{in\text{-}tu}$ las pérdidas por transmisión e intercambiadores y tuberías (kW).

Las ecuaciones 2.6-2.10 permiten calcular las pérdidas en intercambiadores y tuberías y las ecuaciones 2.11-2.16 el tiempo de retención hidráulica y el coeficiente de carga volumétrico del fango en los digestores.

$$Perd_{in\text{-}tu}=Por_{in\text{-}tu}\cdot[(M_{ST\text{-}fm}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_0+M_{ag\text{-}fm}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_0)/3.600+PT_{IRF}] \quad (2.8)$$

$$Perd_{tr}=S\ U_i\cdot A_i\cdot(T_{di}-T_{ex}) \quad (2.9)$$

$$U_{cu}=(1/h_{in\text{-}cu}+e_{cu}/\lambda_{ho}+1/h_{ex\text{-}cu})^{-1} \quad (2.10)$$

$$U_{mu}=(1/h_{in\text{-}mu}+e_{mu}/\lambda_{ho}+e_{po}/\lambda_{po}+1/h_{ex\text{-}mu})^{-1} \quad (2.11)$$

$$U_{so}=(1/h_{in\text{-}so}+e_{so}/\lambda_{ho}+1/h_{ex\text{-}so})^{-1} \quad (2.12)$$

$$TRH=V_{di}/Q_{fm} \quad (2.13)$$

$$Q_{fm}=M_{fm}/\rho_{fm} \quad (2.14)$$

$$\rho_{fm}=(C_{ST\text{-}fm}\cdot\rho_{re}^{-1}+1-C_{ST\text{-}fm})^{-1}\cdot 1.000 \quad (2.15)$$

$$CCV=M_{SV\text{-}fm}/V_{di} \quad (2.16)$$

donde $Por_{in\text{-}tu}$ el porcentaje de pérdidas de potencia térmica en intercambiadores y tuberías del fango de entrada (%), U_i el coeficiente de transmisión del cerramiento (kW/m²·ºC), A_i el área del cerramiento (m²), T_{ex} la temperatura media exterior (ºC), U_{cu}, U_{mu} y U_{so} los coeficientes de transmisión de la cubierta, muros y solera (kW/m²·ºC), $1/h_{in\text{-}cu}$, $1/h_{in\text{-}mu}$ y $1/h_{in\text{-}so}$, $1/h_{ex\text{-}cu}$, $1/h_{ex\text{-}mu}$ y $1/h_{ex\text{-}so}$ los coeficientes de película interiores y exteriores de la cubierta, muros y solera (W/m·ºC), e_{cu}, e_{mu} y e_{so} los espesores de la cubierta, muros y solera (m), λ_{ho} y λ_{po} los coeficientes de conductividad del hormigón y poliuretano (W/m·ºC), TRH el tiempo de retención hidráulica (d), V_{di} el volumen de los digestores en operación (m³), Q_{fm} el caudal de fango mixto (m³/d), ρ_{fm} la densidad del fango mixto (kg/m³), ρ_{re} la densidad relativa fango-agua, $C_{ST\text{-}fm}$ la concentración del fango mixto (%) y CCV el coeficiente de carga volumétrica (kg SV/m³·d).

2.4.3. Bloque 3 deshidratación.

Las ecuaciones 2.17-2.23 constituyen el balance de masa y energía térmica del Bloque 3 deshidratación.

Balance de masa

$$M_{ST\text{-}di}+M_{ag\text{-}di}+M_{po}+M_{ad}=M_{ST\text{-}dh}+M_{ag\text{-}dh}+M_{ST\text{-}ce}+M_{ag\text{-}ce} \quad (2.17)$$

$$M_{ST\text{-}ce}=M_{ST\text{-}di}\cdot(1-\eta_{bc}) \quad (2.18)$$

$$M_{ST\text{-}dh}=M_{ST\text{-}di}\cdot\eta_{bc} \quad (2.19)$$

$$M_{ag\text{-}dh}=M_{ST\text{-}dh}\cdot 10^{-1}\cdot C_{ST\text{-}dh}^{-1}\cdot(\rho_{fa\text{-}dh}-C_{ST\text{-}dh}\cdot 10) \quad (2.20)$$

$$M_{po}=M_{ST\text{-}di}\cdot K_{po}\cdot 10^{-3} \quad (2.21)$$

$$M_{ad}=M_{po}\cdot K_{ad}\cdot 10^{-3} \quad (2.22)$$

donde M_{po} y M_{ad} son los flujos másicos de polielectrolito y agua de dilución (kg/h), $M_{ST\text{-}dh}$ y $M_{ST\text{-}ce}$ los flujos másicos de ST del fango deshidratado y de los centrados (kg/h), $M_{ag\text{-}dh}$ y $M_{ag\text{-}ce}$ los flujos másicos de agua del fango deshidratado y de los centrados (kg/h), η_{bc} rendimiento de las bombas centrífugas (%), $C_{ST\text{-}dh}$ la concentración del fango deshidratado (%), $\rho_{fa\text{-}dh}$ la densidad del fango deshidratado (kg/m³), K_{po} el consumo específico de polielectrolito (kg/t ST) y K_{ad} el consumo específico de agua de dilución (m³/kg polielectrolito).

Balance de energía térmica

$$M_{ST\text{-}di}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_{di}+M_{ag\text{-}di}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_{di}+M_{po}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_0+M_{ad}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_0=M_{ST\text{-}dh}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_{dh}+M_{ag\text{-}dh}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_{dh}+M_{ST\text{-}ce}\cdot C_{p\text{-}ST}\cdot T_{dh}+M_{ag\text{-}dh}\cdot C_{p\text{-}ag}\cdot T_{dh} \quad (2.23)$$

donde T_{dh} es la temperatura del fango deshidratado y de los centrados (ºC).

2.5. Cálculo del balance de masa y energía térmica de la línea de biogás.

Esta línea se divide en los bloques de funcionamiento, digestores y motogeneradores.

2.5.1. Bloque 1 digestores.

Las ecuaciones 2.24-2.27 muestran el cálculo del balance de masa y energía térmica del Bloque 1 digestores.

Balance de masa

$$Q_{bi\text{-}di}=M_{bi\text{-}di}/\rho_{bi\text{-}di} \quad (2.24)$$

$$\rho_{bi\text{-}di}=P_{bi}\cdot P_{m\text{-}bi}\cdot K_u^{-1}\cdot(T_{di}+273{,}15)^{-1} \quad (2.25)$$

$$P_{m\text{-}bi}=C_{CH4}\cdot P_{m\text{-}CH4}+C_{co2}\cdot P_{m\text{-}CO2} \quad (2.26)$$

donde $Q_{bi\text{-}di}$ y $\rho_{bi\text{-}di}$ son el caudal y la densidad del biogas en los digestores (m^3/h) y (kg/m^3), P_{bi}, $P_{m\text{-}bi}$ y K_u la presión del biogas, el peso molecular del biogas y la constante universal de los gases perfectos (kPa), (g/mol) y (J/kg·K), C_{CH4} y $P_{m\text{-}CH4}$ la concentración y peso molecular del CH_4 en el biogas (%) y (g/mol) y C_{CO2} y $P_{m\text{-}CO2}$ la concentración y peso molecular del CO_2 en el biogas (%) y (g/mol).

Balance de energía térmica

$$PT_{bi\text{-}di}=Q_{bi\text{-}di}\cdot PCI_{bi} \quad (2.27)$$

donde $PT_{bi\text{-}di}$ es la potencia térmica biogás digestores (kW) y PCI_{bi} el poder calorífico del biogás.

2.5.2. Bloque 2 motogeneradores

En la Tabla 2.3 se indican las todas ecuaciones necesarias para calcular el balance de masa y energía térmica del Bloque 2 motogeneradores, obtenidas todas ellas a partir de las líneas de influencia de los datos de los motogeneradores reportados por la referencia (Guascor, 2012) para los grados de carga (GC, %) 40, 60, 80 y 100%, definido éste como relación entre la potencia eléctrica generada (kW) y la nominal a plena carga (kW).

2.6. Cálculo del balance de generación de energía eléctrica.

A partir de la potencia térmica del biogás disponible para su consumo en los motogeneradores, se despeja el GC y luego se sustituye en las ecuaciones 2.28, 2.29 y 2.30 para el cálculo de la potencia eléctrica generada.

$$PE_{M638}=6{,}38\cdot GC \quad (2.28)$$

$$PE_{M597}=5{,}97\cdot GC \quad (2.29)$$

$$PE_{M480}=4{,}80\cdot GC \quad (2.30)$$

donde PE_{M638}, PE_{M638} y PE_{M638} son las potencia eléctricas producidas en cada uno de los motogeneradores (kW).

Tabla 2.3. Líneas de influencia parámetros motogeneradores.

Parámetro	M_{638}	M_{597}	M_{480}
Potencia térmica (PT) biogas (kW)	13,985·GC+363,8	13,745·GC+167,6	12,04·GC+146,6
PT circuito principal (kW)	$31,25\cdot10^{-4}\cdot GC^2$ +3,1·GC+176,95	3,63·GC+66,9	$50\cdot10^{-4}\cdot GC^2$ +2,20·GC+75,5
PT circuito auxiliar (kW)	$0,0125\cdot GC^2+1,325\cdot GC+17$	0,585·GC+40,3	0,58·GC+49,9
Flujo másico gases (M_{ge}, kg/h)	27,77·GC+687,6	30,3·GC+244	30,3·GC-328
Temperatura gases (T_{ge}, ºC)	-0,13·GC+437,1	-0,385·GC+411,2	-0,38·GC+472,1
PT gases (kW)	$M_{ge}\cdot1,16\cdot T_{ge}\cdot3.600^{-1}$	$M_{ge}\cdot(1,03\cdot T_{ge}+1,18\cdot10^{-4}\cdot T_{ge}^{2})\cdot3.600^{-1}$	$M_{ge}\cdot1,164\cdot T_{ge}\cdot3.600^{-1}$
PT pérdidas mecánicas (kW)	0,22·GC+0,10	0,19·GC+0,20	0,185·GC+1,3
PT pérdidas radiación (kW)	0,033·GC+35,69	0,17·GC+13,6	0,17·GC+1,1

2.7. Cálculo del balance económico.

La ecuación 2.31 permite calcular el valor del valor actual neto (VAN, €) del capital, suponiendo que los flujos de caja anuales (F, €) son constantes:

$$VAN=F\cdot[(1+k)^n-1]/[k\cdot(1+k)^n]-I \qquad (2.31)$$

donde k es la tasa de descuento aplicada (%), n el número de años e I el valor de la inversión inicial (€). La tasa interna de rentabilidad (TIR, %) de una inversión se define como el tipo de descuento que hace nulo el valor actual neto del capital. La ecuación 2.32 muestra cómo se calcula el TIR considerando los mismos flujos de caja anuales:

$$F\cdot[(1+TIR)^n-1]/[TIR\cdot(1+TIR)^n]-I=0 \qquad (2.32)$$

El precio unitario de la energía eléctrica adoptado es de 70 €/MWh (EDAR, 2016), el precio unitario del transporte y tratamiento del fango deshidratado asciende a 11,51 €/t (Aguas de Burgos, 2017) y el del polielectrolito a 2.300 €/t (EDAR, 2016). Se consideran unos costes de operación de 6,2%, incluyendo mantenimiento 2,6%/año (Jafarinejad, 2017) y mano de obra 3,6% (Wendland, 2005) sobre el valor de la inversión realizada y se aplica una tasa de descuento mínima del 3% (Banco de España, 2017) aunque otras referencias aplican un valor del 3,5% (Molinos-Senante et al., 2011; Jafarinejad, 2017; Rosales-Asensio, 2016). El periodo de amortización de la inversión se estima en 20 años (Molinos-Senante et al., 2011) y el periodo de vida útil de este tipo de instalaciones se establece en 25 años, valor máximo de vida útil para los motogeneradores (Lozano, 2014; Muñoz-Domínguez y Rovira-De Antonio, 2011) y todo el equipamiento de los digestores, no así para la obra civil de los digestores, cuya vida útil tiene un valor más elevado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Introducción.

En la Figura 3.1 se encuentra representado el diagrama general de funcionamiento en la EDAR de Burgos del proceso de obtención de biogás, energía eléctrica y fango deshidratado a partir del fango primario y secundario procedente de los espesadores por gravedad y flotación.

3.2. Resultados del balance de masa y energía térmica de la línea de fangos.

A continuación se van a realizar los balances de masa y energía térmica de la línea de fangos y biogás a cada uno de los tres Bloques de funcionamiento establecidos.

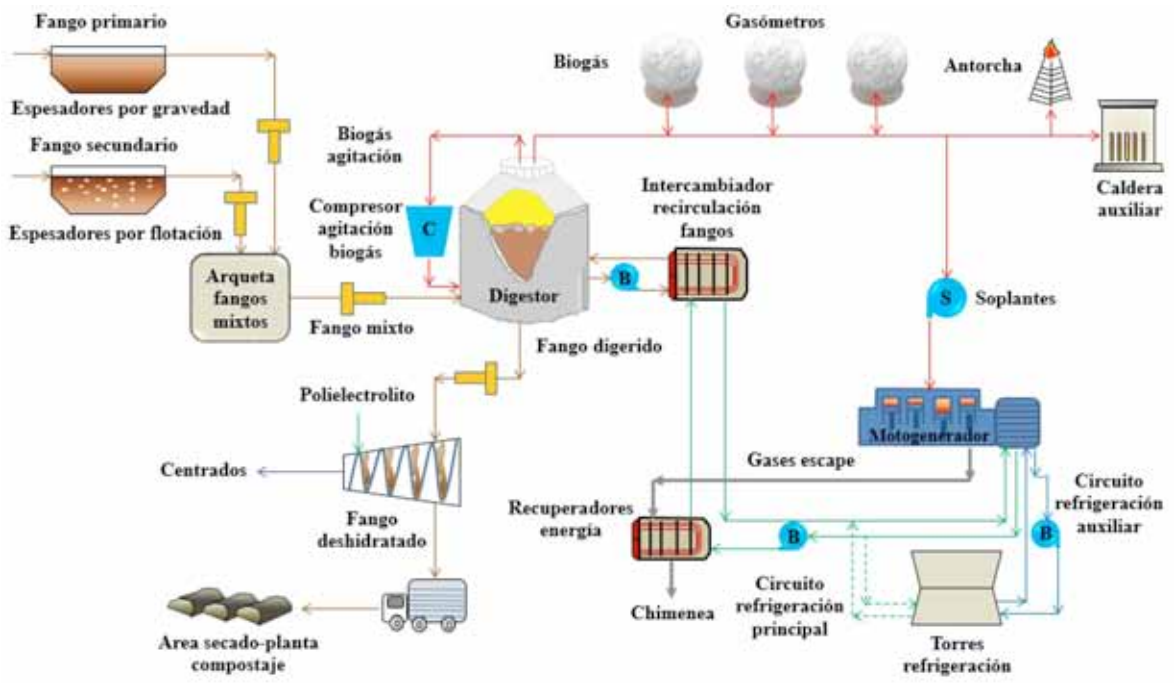


Figura 3.1. Diagrama general de proceso para obtención de biogás, energía eléctrica y fango deshidratado.

3.2.1. Bloque 1 arqueta de fangos mixtos.

La arqueta de fangos mixtos constituía un importante elemento dentro de la línea de fangos pues es donde se mezclaban convenientemente el fango primario procedente de los espesadores por gravedad y el secundario de los de flotación por medio de dos electroagitadores formando el fango mixto que era impulsado directamente a los digestores mediante las bombas de tornillo helicoidal que se encontraban instaladas en un pequeño edificio cubierto adosado a dicha arqueta.

La Figura 3.2 ilustra el balance de masa y energía térmica de los fangos del Bloque 1 arqueta de fangos mixtos, donde tras la mezcla de los fangos primario y secundario se origina el denominado fango mixto que va a tener unas propiedades intermedias entre ambos fangos.
Se realiza partiendo inicialmente de los valores obtenidos del punto de diseño del fango espesado primario y secundario que constan en la Tabla 2.2, habiéndose obtenido los valores de los parámetros medios del fango mixto a partir de la aplicación de la media aritmética simple o ponderada a todos ellos.

Se puede comprobar que la relación entre los flujos másicos de fango primario y secundario resulta ser del 63,4%/36,6% frente a unas relaciones de ST y SV entre ambos del 55%/45% y 52,3%/47,7%, relaciones muy a tener en cuenta en todo el proceso de cálculo posterior.

3.2.2. Bloque 2 digestores.

La Figura 3.3 indica el balance de masa y energía térmica del Bloque 2 digestores. En el punto de diseño de entrada de fango espesado funcionaban tres digestores conjuntamente y se ha considerado una temperatura media anual exterior en Burgos de 10,7 ºC para el cálculo de las pérdidas por transmisión de los digestores. Los digestores tenían que cubrir cuatro tipos de demandas de potencia térmica para lograr obtener y mantener su temperatura óptima de operación en 37 ºC, concretamente:

1. Potencia térmica necesaria para efectuar el calentamiento del fango mixto espesado desde la temperatura ambiental de diseño de 15 °C a su entrada hasta la de operación de 37 °C.
2. Pérdidas de potencia térmica por transmisión a través de muros, techo y solera de los digestores.

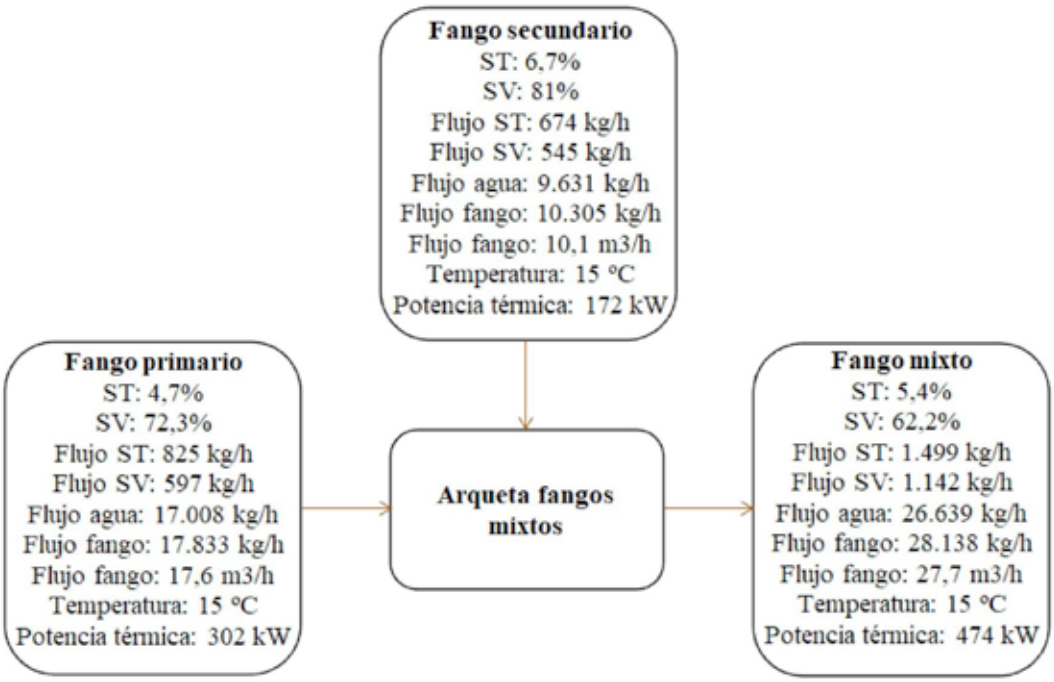


Figura 3.2. Balance de masa y energía térmica del Bloque 1 arqueta de fangos mixtos.

3. Pérdidas de potencia térmica en todas las tuberías e intercambiadores de calor presentes en los circuitos del fango en los digestores, consideradas como un 10% de la potencia total del fango de entrada incluido la del intercambiador de recirculación de fangos.

4. Pérdidas de potencia térmica debido al biogás producido y que abandonaban los digestores por la cúpula hacia su almacenamiento en los gasómetros o consumo en los motogeneradores, con una densidad a 37ºC de 1,11 kg/m^3, con un peso molecular del biogás de 24,9 g/mol y un calor específico de 1,5 kJ/kg·ºC.

Se observa una reducción en la concentración de los ST entre el fango de entrada y el de salida del 33,3% y del porcentaje de SV en un 16,4%. A su vez, la reducción en el flujo másico de ST es de un 34,5% y el de SV un 45,2%, que coincide lógicamente con el valor de la reducción de SV. Por otra parte, el flujo másico de ST a la salida de los digestores se reduce tan solo un 1,4%, motivado únicamente por el flujo másico destruido de SV que se ha convertido en biogás, siendo el flujo másico del agua de entrada el mismo que a la salida, por tratarse de materia inorgánica como tal y no sufrir ningún tipo de reacción en los digestores. La diferencia entre el flujo másico de SV a la entrada (1.142 kg/h) y a la salida (626 kg/h) se convierte en biogás (517 kg/h), que dividido por la densidad (1,11 kg/m^3) resulta un caudal de 465 m^3/h. La reducción de SV resultante es del 45,2% y la de ST un 34,5% mientras el poder calorífico del biogás considerado es de 21.240 kg/m^3, por lo que resultan 2.741 kW la potencia térmica del biogás generado en los digestores.

El biogás de agitación se comprimía desde 100,7 kPa, que era la presión media de salida por la cúpula, hasta 320 kPa (EDAR, 2016) en el compresor de agitación de biogás, presión necesaria para vencer la pérdida de carga ocasionada en el interior de los digestores de 22 m de altura. En este proceso de compresión, la temperatura del biogás se elevaba hasta 126 ºC (EDAR, 2016), por lo que esta impulsión disponía de un sistema de refrigeración intermedia mediante un intercambiador de calor enfriado con agua procedente de los servicios generales.

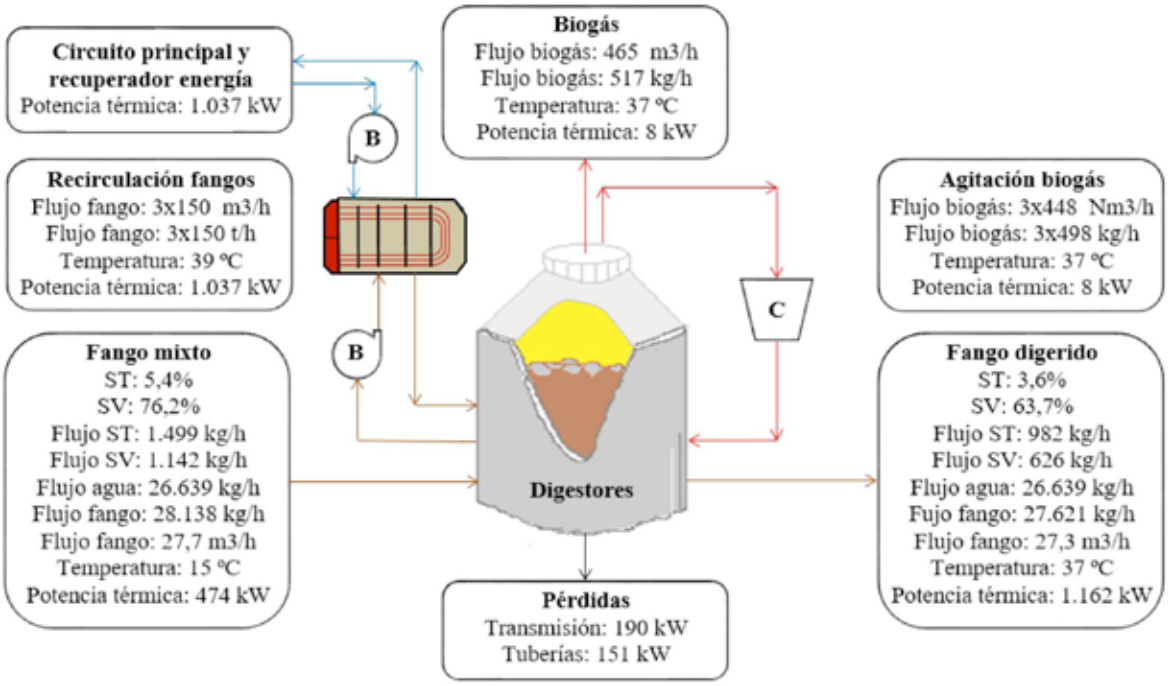


Figura 3.3. Balance de masa y energía térmica del Bloque 2 digestores.

Esta refrigeración permitía al flujo de biogás de 448 m³/h·digestor (EDAR, 2016) ser introducido por la solera de los digestores por medio de las lanzas dispuestas radialmente sobre el fondo a su temperatura de operación aproximada de 37 ºC, siendo el balance de masa y energía térmica total neto de 0 kg/h y 0 kW.

La energía térmica necesaria para los digestores la suministraban los tres circuitos de refrigeración principales de los motogeneradores con el apoyo de los dos recuperadores de energía térmica de los gases de escape de los motogeneradores M_{597} y M_{480} y lo llevaban a cabo en los intercambiadores de recirculación de fangos de que disponía cada uno de los tres digestores existentes. El M_{638} no disponía de este tipo de recuperador de energía térmica, por lo que la energía térmica de sus gases de escape no se podía aprovechar y se desperdiciaba totalmente en la atmósfera. La transferencia de energía térmica a los digestores se producía en los citados intercambiadores, constituyendo el lado caliente o primario el circuito de refrigeración principal y el lado frío o secundario el fango recirculado. El flujo másico de fango total recirculado en cada digestor de 150 m³/h (EDAR, 2016) necesitaba aumentar su temperatura desde los 37 ºC (una vez alcanzada la temperatura de equilibrio) hasta los 39 ºC para poder conseguir que la temperatura del fango en los digestores se mantuviera en la de operación y poder absorber las pérdidas resultando que la potencia térmica necesaria era de 1.037 kW.

3.2.3. Bloque 3 deshidratación de fangos.

La Figura 3.4 permite observar el balance de masa y energía térmica del proceso del Bloque 3 deshidratación de fangos. El rendimiento medio de entrada y salida de ST en las bombas centrífugas era del 90% originando una pérdida del 10% de ST a través de los centrados, los cuales alcanzaban una concentración media del 0,4%. Estos centrados se enviaban a cabecera de planta mediante conducción por gravedad, concretamente a los decantadores primarios, para volver a ser tratados nuevamente en el proceso de la EDAR.

Una planta compacta de polielectrolito dosificaba este producto con una dotación específica media de 7,5 kg polielectrolito/t ST junto con agua de dilución en la relación 0,200 m³ agua/kg polielectrolito y esta mezcla se impul-

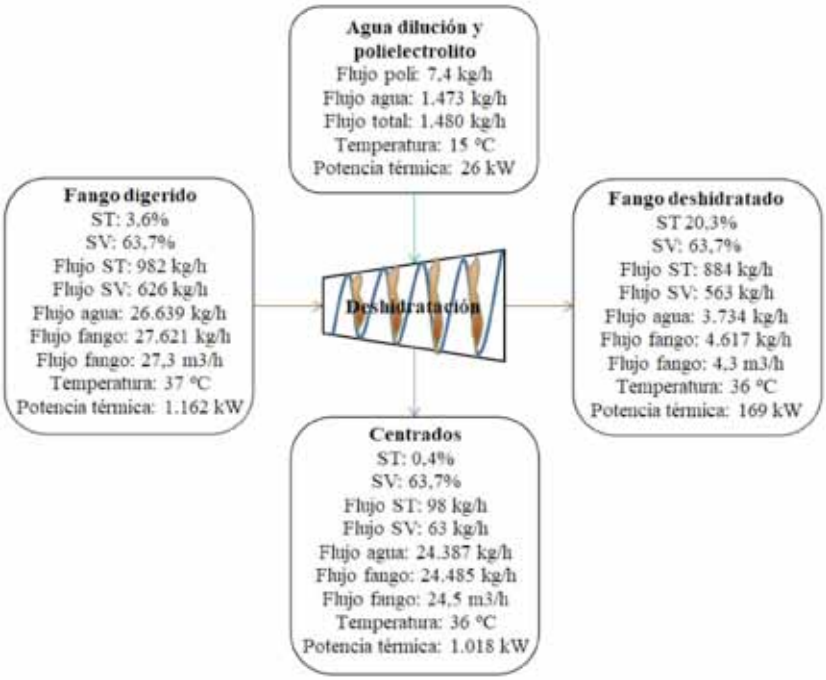


Figura 3.4. Balance de masa y energía térmica del Bloque 3 deshidratación de fangos.

saba hasta las bombas centrífugas de deshidratación con el objeto de obtener una concentración media del fango deshidratado del 20,3% (EDAR, 2016).

Se puede observar un incremento en la concentración del fango deshidratado del 463,9% y una reducción del flujo volumétrico del fango deshidratado del 84,2% con respecto al fango digerido en ambos casos. Asimismo, los centrados eliminaban una parte muy importante del agua presente en el fango, con una reducción del 86,7% del total y un 10% de los ST presentes. El fango deshidratado se almacenaba temporalmente en silos cercanos y posteriormente se procedía a su carga y transporte hasta las eras de secado-planta de compostaje que existía en las inmediaciones de la EDAR para su tratamiento.

La Tabla 3.1 muestra los valores comparativos obtenidos entre la deshidratación del fango sin y con digestión anaerobia, flujos másicos de ST, fango y consumo de polielectrolito.

Se ha considerado el mismo consumo específico de polielectrolito y la misma concentración del fango deshidratado en las opciones sin y con digestión anaerobia.

3.3. Resultados del balance de masa y energía térmica de la línea de biogás.

3.3.1. Bloque 1 digestores y línea de biogás.

La Figura 3.5 muestra los balances de masa y de energía térmica del conjunto del Bloque 1 digestores y demás componentes de la línea de biogás, gasómetros-motogeneradores-recuperadores de energía térmica de los gases de escape y biogás de agitación. El hecho de que los tres circuitos principales de refrigeración cedieran toda su energía térmica para el calentamiento del fango de los digestores originaba que las cuatro torres de refrigeración sólo tenían que enfriar el circuito de refrigeración auxiliar de los motogeneradores y no el circuito principal, con el correspondiente ahorro energético conseguido. Sin embargo, existía la posibilidad en la EDAR de refrigerar también los tres circuitos principales en caso de que aconteciera un exceso de energía térmica como podía ocurrir en los días de verano debido a las altas temperaturas del ambiente y del fango de entrada. Mediante la regulación del caudal de agua del circuito de refrigeración principal y/o del flujo másico de gases del recuperador de energía térmica

Tabla 3.1. Balance de flujo másico de ST, fango y consumo de polielectrolito Bloque 3 deshidratación.

Parámetros	Sin digestión anaerobia	Con digestión anaerobia	Incremento
ST fango espesado (kg/h)	1.499	1.499	0
ST fango espesado (t/año)	13.131	13.131	0
ST fango deshidratado (kg/h)	1.454	884	-570
ST fango deshidratado (t/año)	12.737	7.744	-4.993
Flujo másico fango deshidratado (kg/h)	7.044	4.623	-2.421
Flujo másico fango deshidratado (t/año)	61.705	40.497	-21.208
Consumo de polielectrolito (kg/h)	11,2	7,4	-3,8
Consumo de polielectrolito (t/año)	98,1	64,8	-33,3

era posible controlar la potencia térmica enviada al intercambiador de recirculación de fangos, cuya potencia térmica era función tanto del flujo másico como de la temperatura de entrada del fango mixto a los digestores y de sus pérdidas de energía térmica, disipándose el resto de la energía térmica en las torres de refrigeración si fuera necesario. Los caudales de agua de refrigeración de los circuitos principal y auxiliar que constan en la Figura 3.5 se corresponden con los valores de los caudales del lado del secundario (lado frío) de los intercambiadores de calor de los motogeneradores correspondientes a cada uno de los circuitos. Los valores del flujo másico de aire comburente se calculan aplicando un valor para el dosado (%) (relación entre la masa de combustible y la masa de aire) del 9,5% (Guascor, 2012).

El biogás producido en los digestores se consumía íntegramente en los motogeneradores o un porcentaje de él se podía almacenar temporalmente también en los gasómetros. Si en algún momento puntual, hubiera algún exceso de biogás que no se pudiera consumir en los motogeneradores o almacenar en los gasómetros, era quemado en su totalidad en la antorcha dispuesta a tal efecto en la EDAR. La caldera auxiliar era un elemento de seguridad adicional en el suministro de potencia térmica a los digestores cuando fuera estrictamente necesario, pero en el periodo de análisis establecido no se utilizó debido al consumo de biogás que tal operación conllevaba, disminuyendo la producción de energía eléctrica.

3.3.2. Bloque 2 gasómetros.

El Bloque 2 gasómetros tenía la doble función de servir de almacenamiento de biogás y de mantener la presión de éste en la red. Por lo tanto, el balance de masa y energía térmica del biogás en estado estacionario en los gasómetros se puede considerar nulo, ya que, sólo existía evolución de masa y energía térmica en ellos, si la cantidad de biogás producida en los digestores fuera diferente a la consumida en los motogeneradores, que puede ser por exceso o por defecto, hecho solamente producido en situaciones de carácter especiales. Los gasómetros de la EDAR eran de tipo de doble membrana de PVC/poliéster/PVC tanto para las membranas exterior, interior como de fondo. La membrana exterior servía para dar la forma al gasómetro mientras la interior y la de fondo servían para la acumulación del biogás. Una soplante impulsaba aire continuamente al espacio entre la membrana exterior y las otras dos, para así poder mantener la presión interior constante sin depender en absoluto de las entradas y salidas de biogás. Esta presión de aire en los espacios vacíos lograba mantener la forma de la membrana exterior y permitía mantener la presión de suministro de biogás a la red de consumo. Se encontraban instalados un total de 3

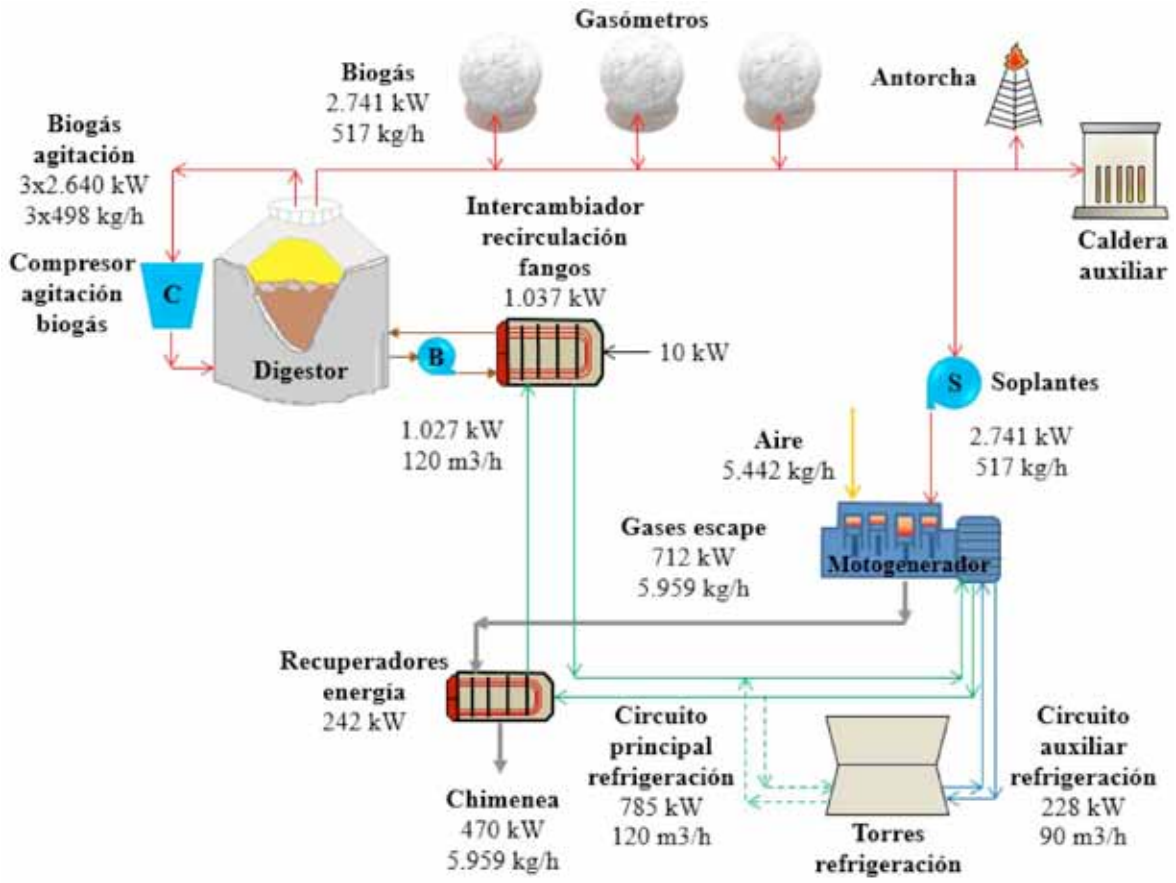


Figura 3.5. Balance de masa y energía térmica del Bloque 1 digestores y línea de biogás.

gasómetros con un volumen total de 2.262 m^3 a la temperatura de acumulación media de 30 ºC.

3.3.3. Bloque 3 motogeneradores y recuperador de energía térmica de los gases de escape.

La EDAR de Burgos disponía de tres motogeneradores marca Guascor FGLD 480 (M_{638}), SFGLD 360 (M_{597}) y FGLD 360 (M_{480}). Estaban constituidos por motores de biogás con ciclo Otto de cuatro tiempos, dotados de turbocompresor acoplado a la turbina de gases de escape, intercooler de enfriamiento de doble etapa de la mezcla carburante, con mezcla pobre (lean burn), sistema de carburación y encendido electrónico, rampa de biogás, silencioso de escape y sistema anti detonación mediante ajuste del avance de encendido (Guascor, 2012).

El alternador era la máquina eléctrica encargada de convertir la energía mecánica de los motores térmicos de combustión interna alternativos de biogás en energía eléctrica. Estaban formados un generador tipo síncrono, autoexcitado sin escobillas ni colectores y con cebado automático por medio de la tensión remanente. Las características técnicas básicas de los alternadores eran: M_{638}, potencia aparente 787 KVA, M_{597} 750 KVA y M_{480} 592 KVA, los tres con tensión nominal de 400 V, aislamiento clase H, frecuencia 50 Hz y velocidad de giro 1.500 rpm (Guascor, 2012).

Cada motogenerador disponía de tres circuitos de refrigeración (EDAR, 2016):

Circuito principal: refrigeración del bloque y culatas, temperatura de entrada del agua en el primario de 90 ºC, potencia térmica nominal 299 kW, caudal de agua del circuito primario 80 m^3/h y del secundario 40 m^3/h en cada unidad.

Circuito auxiliar: refrigeración del intercooler y enfriador de aceite, temperatura de entrada del agua en el primario 55 ºC, potencia térmica nominal 99 kW, caudal de agua del circuito primario 25 m^3/h y del secundario 30 m^3/h en cada unidad.

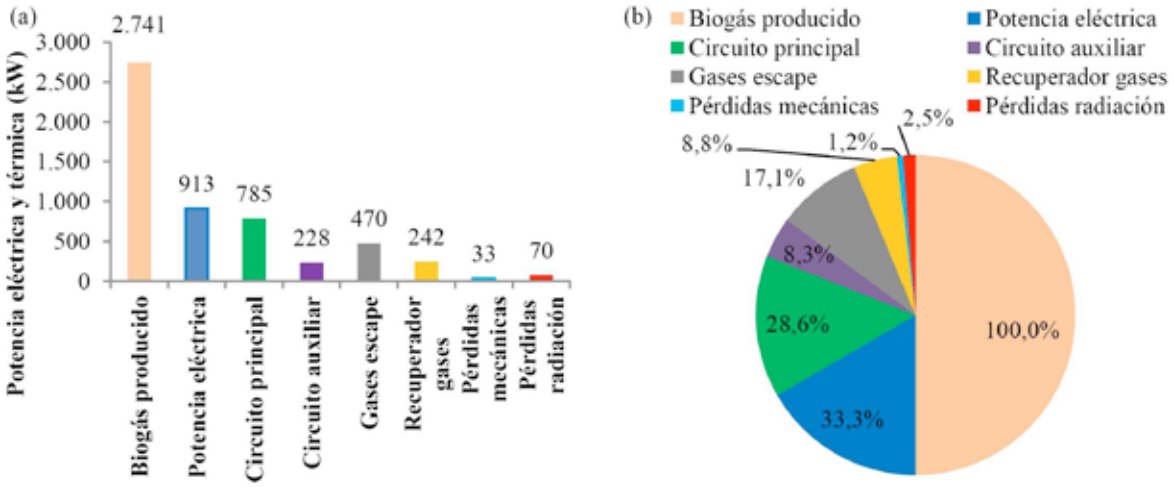


Figura 3.6. Balance energético del Bloque 3 motogeneradores.
a) En valores absolutos. b) En valores porcentuales.

Circuito de emergencia: para ayudar a la refrigeración del bloque y culatas en caso de que el circuito principal era insuficiente. La temperatura de entrada del agua en el primario era variable, potencia térmica nominal 110 kW, caudal de agua del circuito primario 25 m^3/h y del secundario 30 m^3/h en cada unidad.

La EDAR disponía de un total de tres torres de refrigeración con una potencia térmica unitaria de 274 kW/ud, lo que supone un total de 1.096 kW de capacidad de refrigeración instalada (EDAR, 2016). Las condiciones de referencia de todos los parámetros de operación de los motogeneradores son las ISO 3046/1: altitud 100 m, presión ambiente 100 kPa, temperatura ambiente 25 ºC y humedad relativa 30%. Las potencias eléctricas anteriormente indicadas ya se encuentran corregidas para la altitud de 830 m sobre el nivel del mar a la que se encuentra Burgos. Además de estas cuatro condiciones ISO, los motogeneradores tienen que cumplir con la condición de no sobrepasar una contrapresión máxima en los gases de escape de 450 mm cda (Guascor, 2012). Los recuperadores de energía térmica de los gases de escape consistían en un elemento cilíndrico con dos conductos concéntricos, circulando los gases por el del interior y el agua del circuito principal por la corona circular externa, haciéndolo ambos a contracorriente.

El conjunto de motogeneradores y digestores de la planta de Burgos constituía un sistema de cogeneración, entendiendo ésta última como la producción conjunta, en proceso secuencial, de energía eléctrica o mecánica y de energía térmica útil, a partir de la misma fuente de energía primaria, en este caso biogás. Esta cogeneración consistía en un ciclo de cabecera (Lozano, 2014), pues la energía eléctrica se generaba en el primer escalón de aprovechamiento de la energía térmica liberada por el biogás (motogeneradores), siendo aprovechada después en un segundo escalón la energía térmica residual del sistema de refrigeración principal y de los gases de escape en los digestores. Muchas empresas fabricantes de este tipo de motores de combustión interna alternativos de biogás coinciden todas en afirmar que si funcionan ligeramente reducidos en su grado de carga, a un 90-95% del nominal, tendrán una vida mucho más larga y cómoda que los que funcionan al 100% de su potencia nominal (García-Garrido, 2010). Según indicaciones de la EDAR de Burgos, el grado de carga máximo al que operaban los tres motogeneradores de biogás durante los años que abarca el análisis de este artículo estaba entre el 80-90% del de plena carga, para así garantizar de esta forma un funcionamiento continuo y estable y evitar

Tabla 3.2. Rendimientos y relación trabajo-calor de los motogeneradores y rendimientos del proceso completo.

Parámetro	Motogeneradores	Proceso
Rendimiento eléctrico (%)	33,3	33,3
Rendimiento térmico (%)	45,8	37,5
Rendimiento energético (%)	79,1	70,8
Relación trabajo-calor	0,73	…

en gran medida el deterioro acontecido sobre todo en las bujías. Para la realización del balance energético de los motogeneradores, se ha considerado integrado el recuperador de energía térmica de los gases de escape en los motogeneradores. La Figura 3.6a representa el balance energético desglosado de los motogeneradores y recuperadores mientras la Figura 3.6b ilustra el mismo balance, pero ahora en términos energéticos porcentuales.

Los recuperadores de energía térmica de los gases de escape tenían la misión de suministrar energía térmica adicional al agua del circuito de refrigeración principal para elevar su potencia térmica de 785 kW en un total de 242 kW (un 30,8%) hasta alcanzar los 1.027 kW gracias a la aportación energética de los gases de escape que disminuían de 712 a 470 kW su energía térmica a su paso por el recuperador de energía. Los motogeneradores producían tres tipos de potencia térmica residual que podía ser aprovechada, dos de las cuales se aprovechaban y una tercera era completamente desperdiciada. De estas tres energías térmicas, se aprovechaba la totalidad de la potencia térmica del circuito principal compuesto por agua a 90 ºC como fluido energético para calentar el fango recirculado de los digestores en el intercambiador de recirculación fangos, sin embargo, el agua del circuito auxiliar a 55 ºC se disipaba totalmente hacia la atmósfera en las torres de refrigeración. La potencia térmica de los gases de escape que abandonaban los motogeneradores M_{597} y M_{480} con un flujo másico de 1.786 y 1.593 kg/h a una temperatura de 392 y 448 ºC se aprovechaba en los dos recuperadores de energía térmica instalados, expulsando los gases a la atmósfera a 142 ºC, mientras la energía térmica de los gases de escape del M_{638} con un flujo másico de 2.012 kg/h a 432 ºC se desperdiciaba totalmente en la atmósfera, pues carecía de recuperador de energía térmica.

La Tabla 3.2 muestra los resultados obtenidos para los rendimientos térmico, energético y relación trabajo-calor de los motogeneradores y rendimientos del proceso completo.

El rendimiento térmico se calcula en función de la energía térmica que es aprovechable entre la del biogás consumido. En los motogeneradores considerados aisladamente, la potencia térmica aprovechable corresponde a la del circuito principal, auxiliar y gases de escape considerando una temperatura de salida de 142 ºC. Considerar para la temperatura de salida de los gases este valor de 142 ºC supone unas pérdidas de energía térmica del 33,8% respecto a la total de que disponen los gases. Sin embargo, en el proceso completo no se considera la energía del circuito auxiliar y de los gases de escape se tiene en cuenta solo la aprovechada en los dos recuperadores de energía existentes, constituyendo ambas consideraciones la diferencia acontecida entre los dos valores del rendimiento térmico y energético de los motogeneradores y proceso completo. Por otro lado, el hecho de no disponer de recuperador de energía el M_{638} también penaliza los rendimientos térmico y energético del proceso completo. Considerando una potencia térmica aprovechable de 1.256 kW, correspondiente al 100% del circuito principal y el 66,2% de la de los gases de escape, la relación trabajo-calor para los motogeneradores resulta ser de 0,73, valor que se encuentra dentro del rango de valores admisible de 0,5-2 reportado por la referencia (Lozano, 2014).

Tabla 3.3. Balance de energía eléctrica.

Parámetros	Valores obtenidos	Parámetros	Valores obtenidos
Potencia eléctrica generada (kW)	913	Rendimiento M_{597} (%)	35,1
Potencia eléctrica generada M_{638} (kW)	304,3	Rendimiento M_{480} (%)	33,5
Potencia eléctrica generada M_{597} (kW)	304,3	Rendimiento conjunto (%)	33,3
Potencia eléctrica generada M_{480} (kW)	304,3	Potencia eléctrica nominal M_{638} (kW)	638
Energía eléctrica generada diaria (MWh)	21,9	Potencia eléctrica nominal M_{597} (kW)	597
Energía eléctrica generada anual (MWh)	7.997,9	Potencia eléctrica nominal M_{480} (kW)	480
Grado carga M_{638} (%)	47,7	Potencia eléctrica total instalada (kW)	1.715
Grado carga M_{597} (%)	51	Factor utilización capacidad instalada (%)	53,2
Grado carga M_{480} (%)	63,4	Potencia eléctrica consumida planta (kW)	1.282
Rendimiento M_{638} (%)	29,5	Grado autoconsumo (%)	71,2

3.4. Resultados del balance de generación de energía eléctrica.

En este balance, para el cálculo de la potencia eléctrica generada se considera la opción de cálculo en base al funcionamiento de los motogeneradores, M_{638}, M_{597} y M_{480} con la hipótesis de igualdad de potencia eléctrica generada en cada unidad (EDAR, 2016), máximo grado de carga del 90% (EDAR, 2016) y mínimo del 40% (Guascor, 2012). En la Tabla 3.3 se encuentran representados los valores obtenidos para este balance.

El factor de utilización de la capacidad instalada (potencia eléctrica generada (kW)/potencia eléctrica consumida (kW)) anterior de valor 53,2% es mayor del 50%, siendo éste el valor reportado por la referencia (Lozano, 2014) como comienzo del valor óptimo a considerar para la realización de un buen dimensionamiento del número de motogeneradores instalados y potencia necesaria desde el punto de vista económico. El grado de autoconsumo, definido como la relación entre la energía eléctrica autogenerada en la propia planta (kWh) y la energía total consumida (kWh), ha obtenido un valor del 71,2%, un buen valor alcanzado que demuestra lo que esta tecnología es capaz de conseguir.

3.5. Resultados del balance económico.

Si se considera que en todas las EDAR de cierta entidad la presencia tanto de los espesadores como la deshidratación es imprescindible para el tratamiento correcto de los fangos, los elementos de nueva instalación necesarios para la generación de biogás y energía eléctrica estarían constituidos principalmente por los digestores, gasómetros y motogeneradores, por lo que a continuación se indican los costes unitarios de estos elementos adicionales reportados por la referencia (MAAMA, 2013) con el objeto de obtener la inversión inicial necesaria para la implementación de todo el equipamiento necesario.

1. **Digestor anaerobio (3 uds)**: constituido por un depósito cilíndrico con solera de 60 cm y cubierta de 30 cm de espesor ambas de hormigón sin aislar y paredes de 60 cm de hormigón aisladas mediante poliuretano de 5 cm de espesor, un compresor de biogás de agitación de paletas de 448 m^3/h y lanzas de biogás, un intercambiador de recirculación de fangos espiral de 322 kW, 3 bombas de recirculación de fangos de 75 m^3/h y una caldera auxiliar de 344 kW a 1.000.000 €/ud de digestor.

2. **Gasómetros (3 uds)**: formados por gasómetros de doble membrana de PVC de 780 m^3 de capacidad, incluso soplante y válvula de seguridad a 32.500 €/ud de gasómetro.

3. **Motogeneradores (3 uds)**: edificio motogeneración, motogenerador Guascor M_{638}, M_{597} o M_{480}, cuadros eléctricos, una soplante de 300 m^3/h, un intercambiador principal 299 kW/ud, uno auxiliar 99 kW/ud y uno de emergencia 110 kW/ud y 4 torres de refrigeración de 274 kW/ud a 400.000 €/ud de motogenerador.

4. **Inversión inicial total**: 4.297.500 €.

La generación de potencia eléctrica bruta asciende a 913 kW, a la que será necesario deducir los autoconsumos de energía eléctrica acontecidos en digestores y motogeneradores y que ascienden a 132 kW, resultando una potencia eléctrica neta de 781 kW, un descenso del 14,5%. El precio de compra de la energía eléctrica de uso industrial tarifa ATR-6.2 de alta tensión (36 kV < tensión ≤ 72,5 kV) con seis periodos diarios diferentes de facturación en función del mes y hora del año, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 y P_6, se puede considerar con un valor medio de 70 €/MWh para los 6 periodos más IVA. A este valor también hay que añadir un 5,11269632% en concepto del abono del impuesto especial sobre la electricidad según la Ley 28/2014, de 27 de noviembre (BOE num. 28, 2014) tanto para la importación como para el propio autoconsumo. Asimismo, el coste del término de potencia no se considera, pues la EDAR debe disponer de toda la potencia contratada necesaria en caso de que los motogeneradores no estuvieran operativos y que asciende a 1.300 kW para un consumo medio total de 1.282 kW (EDAR, 2016), pudiendo sobrepasar la potencia contratada en momentos puntuales, controlado por un maxímetro y procediendo su abono a unos precios diferentes más elevados.

Indicar a título informativo que, mediante el Real Decreto-ley 15/2018 de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores ha quedado derogada la Ley 15/2012 del 27 de Diciembre, anulándose por un lado el impuesto sobre el valor de la producción de la energía eléctrica del 7% y por otro el abono del impuesto especial sobre la electricidad del 5,11269632% vigente según la Ley 28/2014, de 27 de noviembre (BOE num. 28, 2014) para consumidores de energía eléctrica autogenerada en la propia planta cuando ésta es de origen renovable, como es el caso del biogás. Pero debido a que el periodo de análisis de este Ar-

tículo transcurre entre los años 2011-2015, se adopta la normativa vigente en la Ley 28/2012 del 27 de Diciembre y la Ley 28/2014, de 27 de noviembre, donde la energía generada autoconsumida también debe estar gravada con el impuesto especial sobre la electricidad, independientemente de su origen. Por tanto, ante la necesidad de abonar este impuesto tanto para la hipótesis de consumo como para autoconsumo según la Ley 15/2012, el precio final de la energía eléctrica a considerar en este balance ha sido finalmente de 70 €/MWh.

Considerando una energía eléctrica bruta generada de 7.997,9 MWh/año y aplicando este último precio resulta un beneficio de 559.853 €/año y si se consideran 6.841,6 MWh/año de energía eléctrica neta, se obtiene un beneficio de 478.912 €/año. Se debe tener en cuenta también en el balance económico, el hecho de que mediante digestión anaerobia se optmiza el transporte y tratamiento del fango deshidratado hacia la planta de secado-compostaje cercana a la EDAR un total de 21.208 t/año, que a un precio unitario de 11,51 €/t, resulta un ahorro de 244.104 €/año. Por otro lado, la dosificación de polielectrolito para deshidratar el fango sin digerir y digerido es de 7,5 kg poli/t ST para una concentración del 20,3% en deshidratación, resultando una optimización de 33,3 t polielectrolito/año con respecto al fango sin digerir, que al precio unitario de 2.300 €/t genera un ahorro de 76.590

€/año. Asimismo, se consideran unos costes de operación (sin energía eléctrica y reactivos) de 6,2%/año sobre el valor de la inversión realizada, resultando un coste total por este concepto de 266.445 €/año.

El beneficio total anual se obtiene tras la suma de los cuatro conceptos anteriores, beneficios o ahorros por generación de energía eléctrica, transporte y tratamiento del fango deshidratado y consumo de polielectrolito además de los costes de operación, ascendiendo a 614.102 € brutos y 533.161 € netos, lo que representa unos beneficios específicos anuales de 46,8 €/t ST y 40,6 €/t ST de fango de entrada a los digestores, de 15,2 y 13,2 €/t fango deshidratado mediante digestión anaerobia y de 10 y 8,6 €/t fango deshidratado sin digestión anaerobia

El periodo de amortización de la inversión planteado originalmente es de 20 años y el periodo de vida útil 25 años. Por tanto, aplicando los dos flujos de caja anteriores, una tasa de descuento mínima del 3% y la Ecuación 2.31 del VAN, resulta un periodo de amortización bruto de 8 años y neto de 9 años, un TIR bruto de 13% y neto de 10,8% y un beneficio bruto de 11.055.050 € y neto de 9.031.525 € a los 25 años de vida útil de la instalación, valores todos ellos para la opción con digestión anaerobia.

4. CONCLUSIONES.

Como se ha podido observar en el balance económico resultante, la ejecución de este tipo de instalaciones de digestión anaerobia y cogeneración tiene unos importantes beneficios para la sociedad, pues mejora su calidad de vida en cuanto a la optimización de determinados aspectos fundamentalmente económicos y medioambientales como son el autoconsumo de toda la energía eléctrica producida en la propia planta (generación distribuida), eliminando las pérdidas de energía en las líneas de transporte, la menor cantidad de fango deshidratado que es necesario eliminar, la disminución del efecto invernadero por la combustión íntegra del metano, pues de otra forma, una parte la importante de él se dirigiría a la atmósfera, menor riesgo de eutrofización ecológica y de contaminación de las aguas subterráneas, conservación de nutrientes y huella energética, disminución de los olores de los fangos digeridos y deshidratados, un menor contenido de patógenos en el fango, por lo que los beneficiarios finales del proceso en cuestión serían los habitantes circundantes de la zona, pues son ellos los que sufragan con sus propios recursos los costes necesarios para depurar las aguas residuales recogidas antes de volver a ser vertidas al río.

Algunas de las grandes preocupaciones que tiene la sociedad actual, tales como el continuo aumento de los precios de la energía, el grado de dependencia tan importante del petróleo y el continuo aumento del cambio climático, una parte importante de ellas es posible solucionarlas

dotando a las depuradoras de aguas residuales de un sistema de energía total, generando toda la energía eléctrica y térmica necesaria para el consumo en la propia planta e intentar en la medida de lo posible prescindir de los suministros de la red logrando su independencia total energética del exterior. Este sistema de energía total no se ha logrado alcanzar totalmente, solamente un 71%, valor éste bastante aceptable y que en principio se puede mejorar bastante con la instalación de motogeneradores de biogás de mayor rendimiento tales como los ya existentes hoy día en el mercado.

Por lo tanto, es necesario transmitir a toda la sociedad que los sólidos secos presentes en las aguas residuales, más que ser considerados simples residuos como tal, por un lado son una importante fuente de energía de origen renovable y por otro destacar las múltiples ventajas que proporciona la digestión anaerobia de los mismos, no sólo desde el punto de vista únicamente económico sino también medioambiental. ■

BIBLIOGRAFÍA

Abbasi T, Tauseef S, Abbasi S. (2012). Biogas energy. Springer New York Dordrecht Heidelberg London. https://epdf.tips/biogas-energy-springerbriefs-in-environmental-science.html, acceso julio 2018.

Aguas de Burgos. (2017). Concurso para contratar el servicio de retirada y tratamiento de lodos procedentes y/o recogidos en la EDAR y en la ETAP de Burgos. Número de Expediente 2/2015. Fecha de Publicación en el D.O.U.E, 2 de mayo de 2015. https://www.aguasdeburgos.com/Teinformamos/Perfildelcontratante.aspx?id=318, acceso julio 2018.

Aroca-Lastra S, Varela-Díez F. (2014). Instalaciones térmicas en la edificación: calefacción y agua caliente sanitaria. Departamento de Ingeniería Energética Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Banco de España. (2017). Tabla de tipos de interés. http://www.bde.es/ clientebanca/es/areas/Tipos_de_Interes/Tipos_de_interes/Otros_tipos_de_i/otros-tipos /Tabla_tipos_de_ interes_legal.html, acceso noviembre 2018.

Biomassa. (2018). Portal das energías renováveis. http://energiasrenovaveis.com/ DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=65&ID_area=2&ID_sub_area=2, acceso diciembre 2018

Bishnoi P. (2012). Effects of thermal hydrolysis pre-treatment on anaerobic digestion of sludge. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. https://pdfs.semanticscholar.org/db90/7d76c30fdcd6f7206f51924ab59d5a3879a9.pdf, acceso mayo 2018.

Cabanes J. (1989). Digestión anaerobia de lodos de depuradora, etapas controlantes y cinética del proceso. Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/ 10045/5109/1/Lopez-Cabanes-Jose-Maria-t-I.pdf, acceso julio 2019.

Cano R. (2014). Pretreatment technologies to enhance solid wastes anaerobic digestion. https://core.ac.uk/download/pdf/61514371.pdf, acceso enero 2018.

Cano R, Pérez-Elvira S, Fernández-Polanco F. (2015). Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review. Applied Energy, 149, 176-185.

EDAR. (2016). Estación depuradora de aguas residuales de Burgos.

Guascor. (2012). Gas engines & Gensets, Guascor Power. http://zaguan.unizar.es/record/6948/files/TAZ-PFC-2012-104_ ANE.pdf, acceso junio 2018.

García-Garrido S. (2010).Averías habituales en plantas de cogeneración. Averías en motores alternativos de gas. Editorial RENOVETEC S.A.

IDAE. (2007). Biomasa. Digestores anaerobios. Instituto Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. http://www.idae.es/uploads/ documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf, acceso mayo 2018.

IDAE. (2010). Guía técnica: condiciones climáticas exteriores de proyecto. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_12_Guia_tecnica_condiciones_climaticas_ exteriores_de_proyecto_e4e5b769.pdf, acceso noviembre 2018.

Jafarinejad S. (2017). Cost estimation and economical evaluation of three configurations of activated sludge process for a wastewater treatment plant (WWTP) using simulation. Applied Water Science 7, 2513–2521.

Liao Z, Panter K, Peot C, Lancaster R, Mills N, Kleiven M. (2015). Thermal hydrolysis pre-treatment for advanced anaerobic digestion for sludge treatment and disposal in large scale projects. https://www.dsd.gov.hk/rdforum/2014/abstract/Paper%20(B6-1).pdf, acceso julio 2018.

Lozano M. (2014). Cogeneración. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza. http://publicationslist.org/data/miguel.a.lozano/ref183/Cogeneracion %201998 %20 (Rev%202014) .pdf., acceso noviembre 2018.

MAAMA. (2013). Proyecto de Ampliación de la Depuradora de Burgos, código 62.01/11.P2. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente.

Metcalf E. (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. McGraw Hill.

Molinos-Senante M, Hernández-Sancho F, Sala-Garrido R. (2011). Cost–benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes: A case study for Spanish wastewater treatment plants. Journal of Environmental Management 92, 3091-3097.

Moreno-Gutiérrez R. (2016). Bioprocesses for wastewater treatment: integration of bioelectrochemical systems and other technologies. Instituto de medio ambiente, recursos naturales y biodiversidad. Grupo de ingeniería química, ambiental y bioprocesos. Universidad de león.

Muñoz-Domínguez M y Rovira-De Antonio A, 2011). Máquinas térmicas. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Rosales-Asensio E. (2016). Aplicabilidad del calor residual de centrales térmicas sitas en la UE–28 en redes de calefacción urbana. Tesis doctoral presentada en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Educación a Distancia. e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:IngInd.../ROSALES_ASENSIO_ Enrique_Tesis.pdf, acceso agosto 2018.

Silvestre G, Fernández B, Bonmatí A. (2015). Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. Energy Conversion and Management, 101, 255-262.

Wendland A. (2005). Operation Costs of wastewater Treatment Plants. https://cgi.tu-harburg.de/~awwweb/wbt/emwater/ documents/ lesson_c2 .pdf, acceso julio 2018.

Intercambiadores de calor subterráneos

en sondeos geotérmicos superficiales

The use of underground heat-exchangers in shallow geothermal drillings

José Carlos Losilla Rayo. Ingeniero Técnico de Minas. Máster Oficial Universitario en Prevención de Riesgos Laborales. Perito Judicial en Investigación de Accidentes Laborales.

RESUMEN

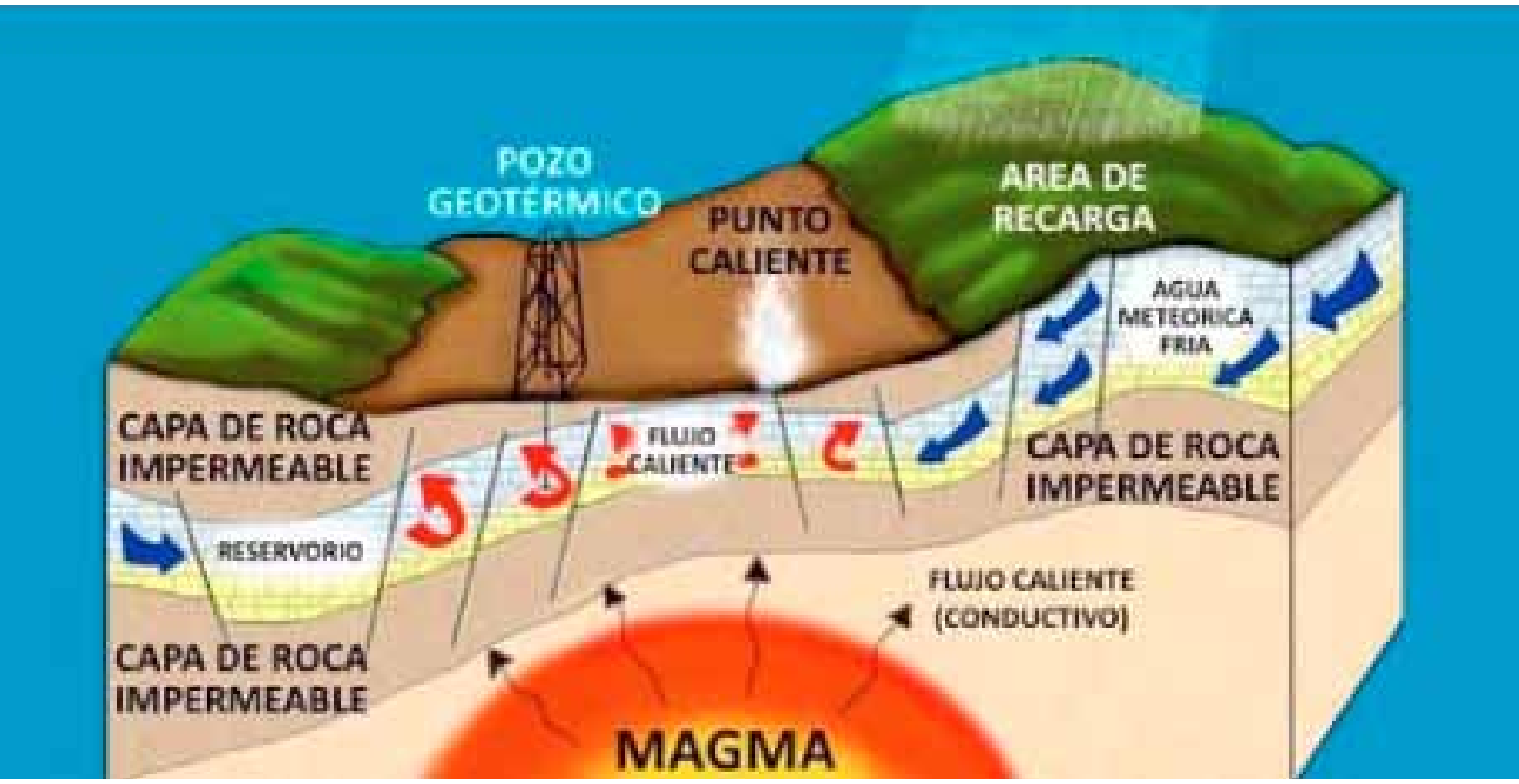
La energía geotérmica es un recurso energético en alza. La calefacción y refrigeración de edificios mediante bombas de calor geotérmicas exigen, en muchos casos, la instalación de los intercambiadores de energía dentro de los sondeos o taladros ejecutados en el subsuelo. La función de un intercambiador de calor subterráneo es servir de vía de conexión entre el terreno, que es la fuente o el pozo de calor (en modo calefacción o en modo refrigeración), y el intercambiador de la bomba de calor geotérmica, donde se produce el intercambio de calor con el refrigerante de la misma. La elección del tipo de intercambiador y su dimensionamiento están supeditados a una serie de decisiones previas que son responsabilidad de la empresa contratista responsable de la climatización del edificio.

ABSTRACT

Geothermal energy is a renewable energy source on the raise. There is also considerable potential for development in the use of geothermal heat-pumps to tap geothermal energy close to the surface for the purposes of heating and cooling buildings. Underground heat-exchangers are required for connecting the ground to a geothermal heat-pump. The choice of using an underground heat-exchanger depends on the individual installation parameters.

PALABARAS CLAVE: Energía geotérmica, sistema geotérmico, sondeos geotérmicos superficiales, bomba de calor geotérmica, intercambiadores de calor subterráneos, intercambiadores de calor horizontales, intercambiadores de calor verticales, intercambiadores de calor de agua subterránea, sonda geotérmica vertical.

KEYWORDS: Geothermal energy, geothermal system, shallow geothermal drillings, geothermal heat-pump, underground heat-exchangers, horizontal shell-and-tube heat-exchangers, vertical heat-exchangers, ground water heat-exchangers, vertical geothermal probe.



Energía geotérmica (Fuente: infoguia.com).

INTRODUCCIÓN

Una de las características más importantes de una bomba de calor del tipo que sea, es que su rendimiento, y la energía necesaria para hacerla funcionar, están directamente relacionadas con el rango de temperaturas entre las que funcione, concretamente, con la diferencia entre la temperatura de la fuente de calor y la de pozo al que el calor es evacuado (salto de temperatura). Cuanto más pequeño es este salto de temperatura, más elevado es el rendimiento de la termo-bomba.

Idealmente, la fuente de calor debería ser tan caliente y estable como fuera posible durante la estación de calefacción, y el pozo de calor tan fresco como fuese posible en la estación de refrigeración.

CONCEPCIÓN DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO

Antes de proceder a la elección del tipo de intercambiador subterráneo y a su dimensionamiento, se debe proceder a concebir el sistema geotérmico completo, pues las especificaciones y dimensiones del conjunto dependen de una serie de decisiones previas, como son: la elección de los sistemas de distribución de la calefacción y de la refrigeración, y de los de producción de agua caliente sanitaria del edificio, los rendimientos de la bombas de calor, de si el bucle subterráneo deberá responder a todas las exigencias térmicas o solo a parte y, de ser así, a cuáles, etc.

La evaluación de las cargas de calefacción y de refrigeración del edificio constituye la etapa inicial y es una de las más importantes

de un proyecto geotérmico de muy baja temperatura, habida cuenta del coste inicial más elevado de estos sistemas. El sobredimensionamiento de las bombas de calor o del intercambiador subterráneo puede reducir mucho su interés económico.

Sistema geotérmico: intercambiador calor subterráneo, bomba de calor y sistema de distribución (Fuente: geotermikoa.com).

DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR SUBTERRÁNEO

Para unas condiciones del terreno dadas, la carga del edificio (calefacción y/o refrigeración), es el factor principal que influye en el tamaño (capacidad), del intercambiador subterráneo, pero las temperaturas de salida y de retorno del fluido caloportador al subsuelo son fijadas por el proyectista del sistema geotérmico.

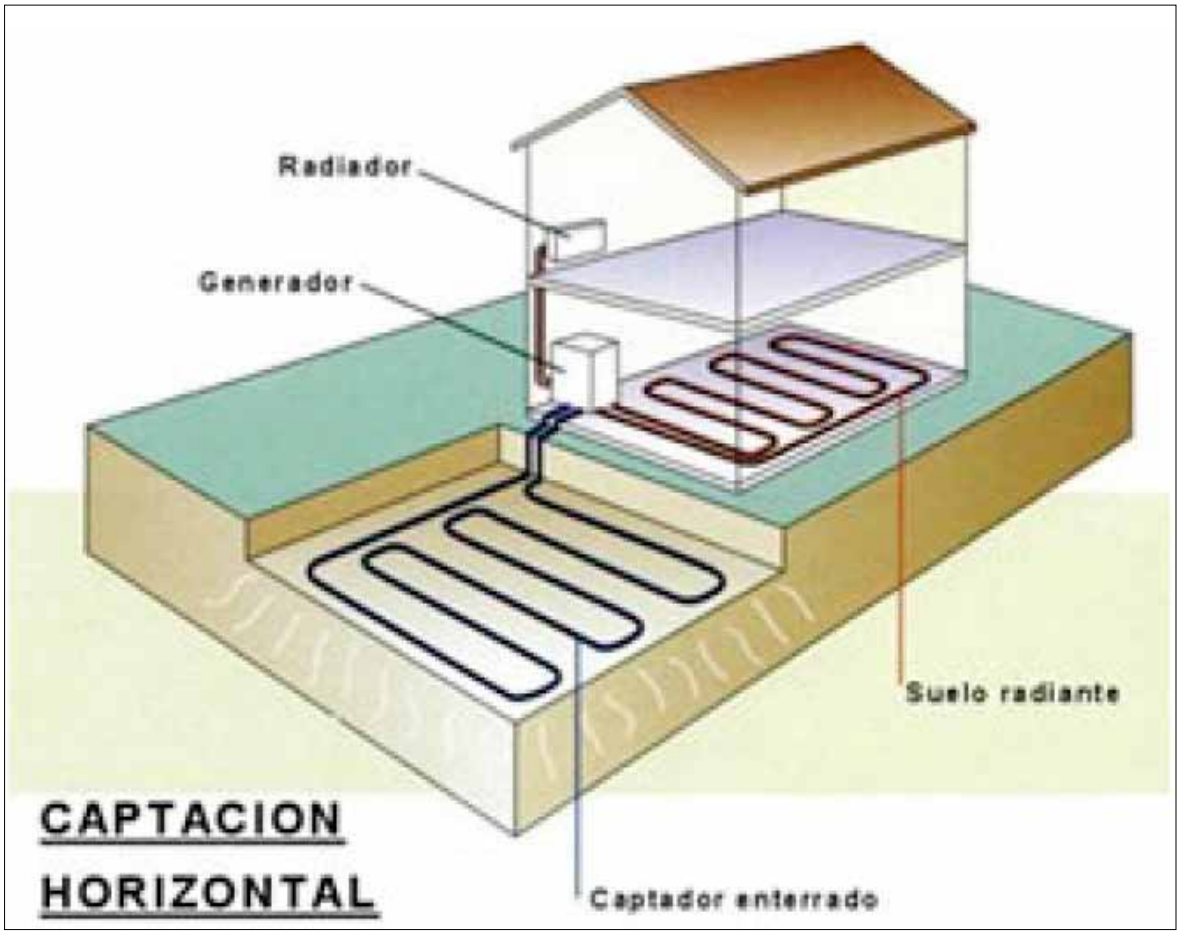
Otros factores que influyen en la longitud de un intercambiador de calor son:

- Tipo y propiedades del fluido portador de calor.
- Disposición del bucle subterráneo (distancia entre sondeos, entre colectores horizontales y entre zanjas).
- Profundidad de los sondeos y de las zanjas.
- Configuración del intercambiador (número de tubos por zanja, por sondeo, y conexión en serie o en paralelo).
- Temperatura media del terreno.
- Propiedades del terreno y de los morteros para relleno de sondeos.
- Condiciones hidrogeológicas locales (velocidad de desplazamiento del agua subterránea).
- Diámetro del tubo (o caudal) para conocer la turbulencia y las temperaturas de funcionamiento extremas.
- Rendimientos de las bombas de calor y consumo de energía necesaria para el bombeo del líquido portador de calor.

En los países que cuentan con varias décadas de experiencia en la utilización de bombas de calor acopladas al terreno, como Suiza, Suecia, Austria, Alemania, Canadá y Estados Unidos, existen reglas simplificadas basadas en la utilización de fórmulas empíricas o ábacos obtenidos de simulaciones realizadas por ordenador, que pueden utilizarse para obtener estimaciones preliminares de longitudes de intercambiadores de calor subterráneo

INTERCAMBIADORES DE CALOR HORIZONTALES

Para casos simples de operaciones de calefacción con bombas de calor geotérmicas, como pueden ser los de residencias unifamiliares separadas, con tiempos de utilización anual de 1.800 a 2.400 horas, la Norma VDI 4640-Parte 2 “Aprovechamiento térmico del terreno” (Verein Deutscher Ingenieure –Alemania–), indica que el



Intercambiadores de calor horizontales (Fuente: ecohabitar.org).

diseño de un intercambiador de calor horizontal puede hacerse utilizando valores de extracción de calor específicos, en W/m^2 de intercambiador, y recomienda unos valores dependiendo del tipo de suelo y de las horas anuales de funcionamiento.

Los tubos individuales pueden ubicarse en zanjas entre 1,2 y 1,5 metros de profundidad, entre capas de arena, debidamente compactadas.

La distancia entre tubos dependerá de su diámetro y estará comprendida entre 0,3 y 0,8 metros.

Al objeto de poder extraer suficiente calor también durante largos períodos fríos, la extracción específica anual no debe exceder de 50-70 kWh/(m^2*a).

La diferencia entre la temperatura de retorno del fluido portador de calor al intercambiador subterráneo y la temperatura del suelo no puede exceder de +/– 12 K en baja temperatura y de +/– 18 K en condiciones de carga máxima.

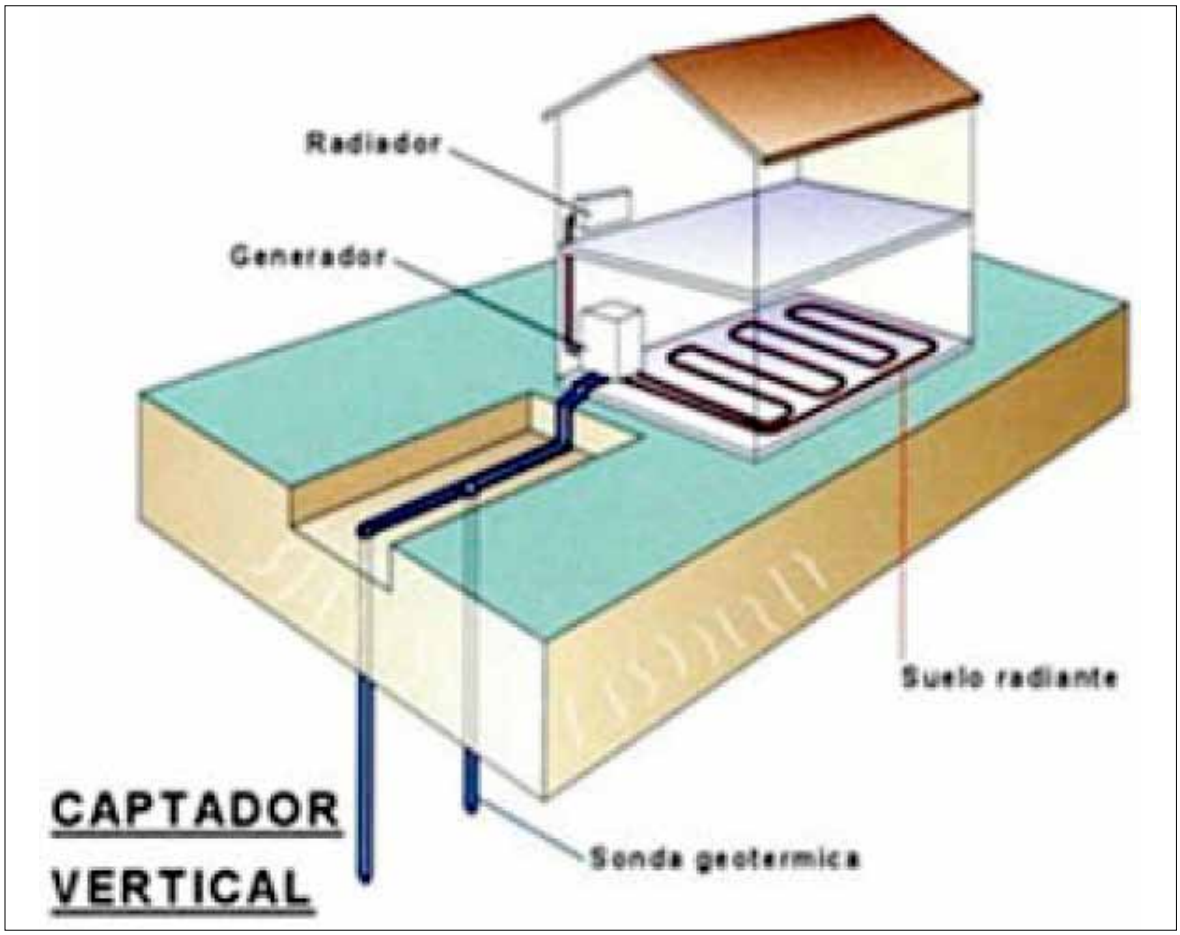
La SIA-Dokumentation D0136 (Suiza, 1996) facilita un nomograma para calcular las dimensiones de un intercambiador horizontal enterrado que, además de la superficie que ocuparía, proporciona la longitud total de los tubos del mismo.

INTERCAMBIADORES DE CALOR VERTICALES

El diseño de un intercambiador de calor vertical depende, generalmente, de las propiedades térmicas del terreno en el que se ubique.

Los factores del terreno con mayor influencia en la longitud del sondeo que ha de alojar las sondas geotérmicas son la conductividad térmica del terreno y la humedad, especialmente la velocidad de flujo de agua subterránea que pueda haber en el subsuelo.

Las propiedades térmicas del subsuelo se pueden calcular con un Ensayo de Respuesta Térmica del Terreno (ERT), que se realiza una vez perforado el terreno.



Intercambiador de calor vertical (Fuente: grupovisiona.com).

La norma alemana VDI 4640-Parte 2 (Verein Deutscher Ingenieure), establece una diferenciación entre sistemas geotérmicos con intercambiadores de calor verticales para operaciones de calefacción de hasta 30 kW de potencia calorífica y otros sistemas más grandes. Para las primeras, de menos de 30 kW, puede utilizarse para calcular la longitud del sondeo, una tabla con valores de extracción de calor específico, en W/m, y un nomograma, mientras que para operaciones mayores, remite a la realización previa de simulaciones con ordenador.

Para utilizar la tabla con los valores de extracción de calor específico, la longitud del intercambiador de calor vertical, individual, debe estar comprendida entre 40 y 100 metros (se refiere a la profundidad del sondeo), la distancia mínima entre dos sondeos debe ser, al menos, de 5 metros para sondeos de 40 a 50 metros de longitud y, al menos, de 6 metros para sondeos de 50 a 100 metros de longitud. Además, los tubos intercambiadores de calor deben tener forma de doble U con DN 20, 25 o 32, o tubos coaxiales con un diámetro mínimo de 60 mm.

La diferencia de temperatura entre el fluido del intercambiador y el terreno sin alterar no debe exceder de +/– 10K en condiciones de baja carga y de +/– 15K en carga máxima.

En España, CIATESA y el Departamento de Termodinámica Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia han desarrollado un programa de simulación simplificado, GEO CIATESA, basado en el método de la 'International Ground Source Heat Pump Association' (Universidad de Oklahoma, EE.UU.) para la resolución del problema de conducción de calor alrededor de una tubería de gran longitud y pequeño diámetro con una temperatura uniforme, enterrada en un terreno también uniforme.

INTERCAMBIADORES DE CALOR DE AGUA SUBTERRÁNEA

La mayoría de los sistemas geotérmicos de agua subterránea emplean un intercambiador de calor intermedio para separar el circuito cerrado de distribución en el edificio del agua subterránea. Se necesita cuando el líquido del bucle del edificio no es agua y se recomienda para prevenir daños en el intercambiador de calor de la termo-bomba.

Se puede realizar una evaluación preliminar considerando una diferencia de temperatura de 3ºC entre el agua subterránea y el líquido del circuito cerrado del edificio a la salida del intercambiador de calor intermedio, antes de que la primera sea restituida al acuífero por un pozo de inyección.

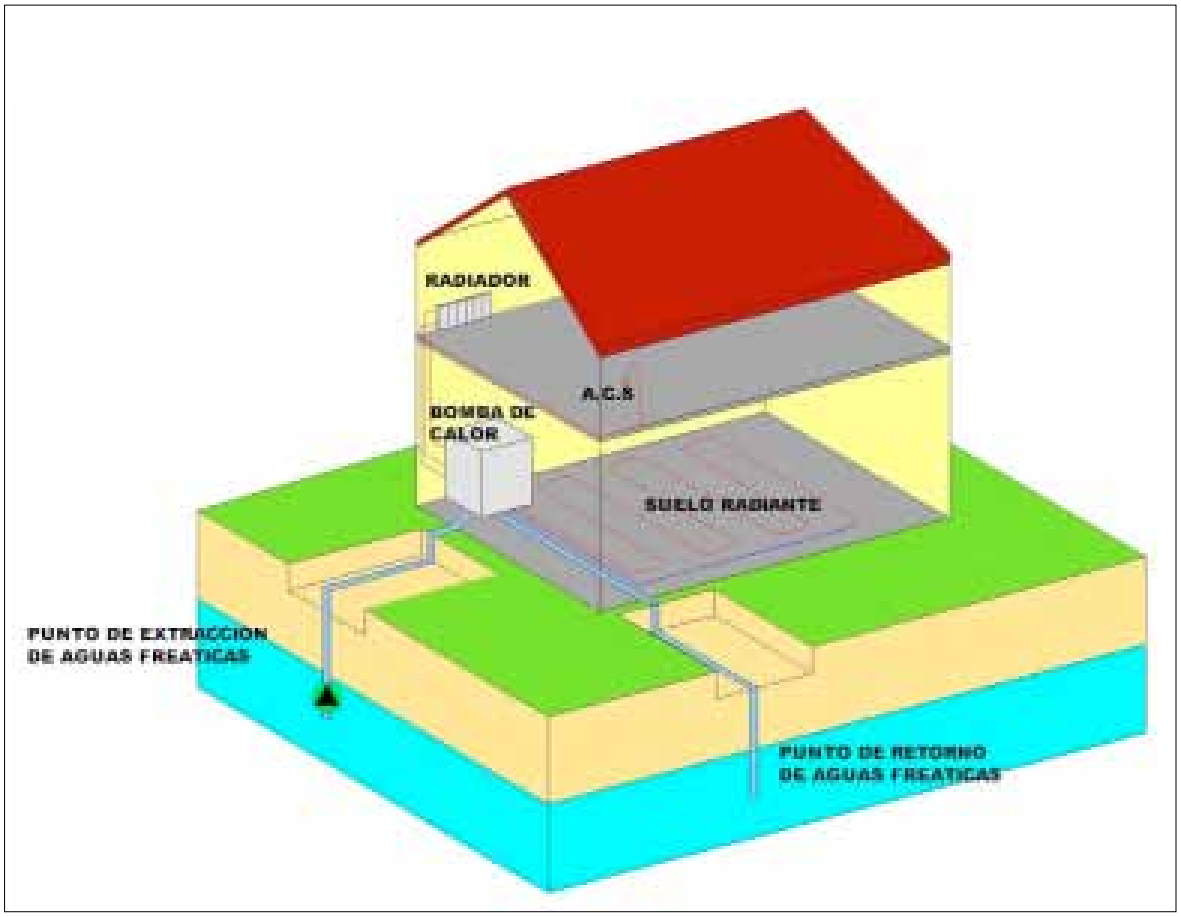
La publicación "Les systèmes gèothermiques comerciaux: guide de l'acheteur". Ressources Naturelles Canadá (2002), propone como regla aproximada para el diseño de un intercambiador de calor de agua subterránea considerar el valor más elevado resultante de unas expresiones que calculan el caudal de calefacción y el caudal de refrigeración. No obstante, se pueden estimar esos valores considerando un caudal tipo en el circuito cerrado del edificio de 0,04 l/s por kW de potencia, que es el valor que recomiendan algunos fabricantes de bombas de calor de agua subterránea.

Además, se considera:

– Para calefacción: Tsalida calefacción = Tagua subterránea –5º C

– Para refrigeración: Tsalida refrigeración = Tmáxima entrada en verano +2º C

En la última expresión, la temperatura máxima de entrada en verano representa la temperatura máxima del bucle del edificio a la entrada en las bombas de calor.



Intercambiador calor aguas subterráneas (Fuente: hispano-3000.com).

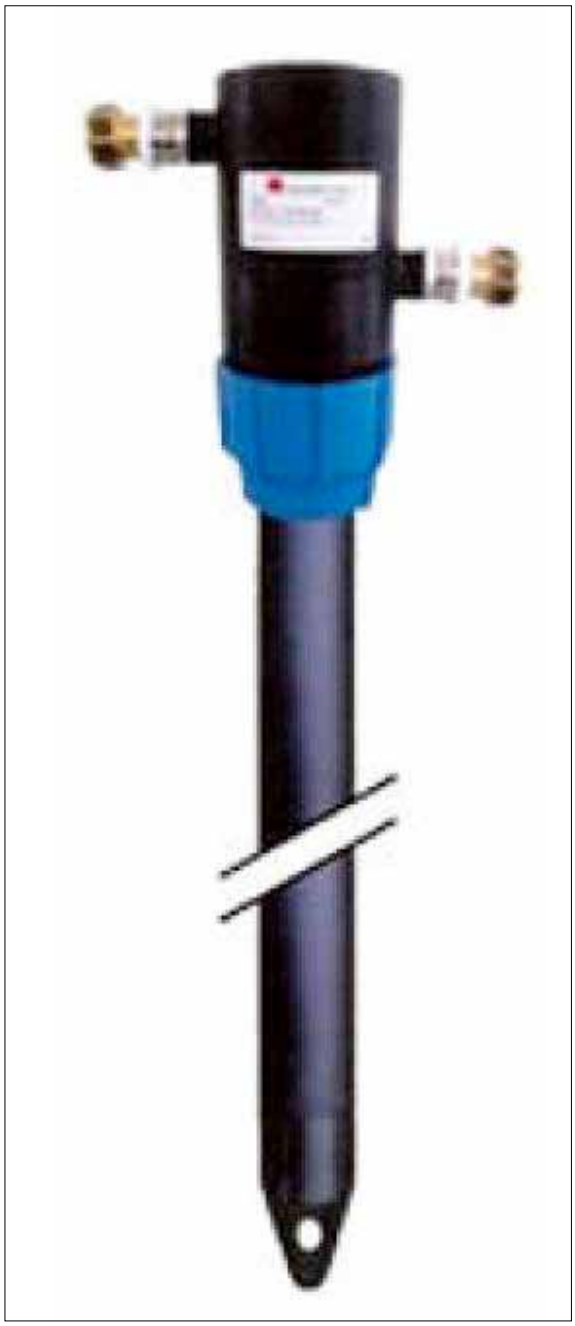
Las sondas geotérmicas son la parte más cara de un sistema geotérmico. Tienen una vida útil de 50 años y, una vez introducidas en el terreno y cementadas, no admiten posibilidad de efectuar sobre ellas ningún mantenimiento preventivo o correctivo, de ahí la importancia de que estén adecuadamente dimensionadas y correctamente instaladas

Los caudales de agua subterránea son, habitualmente, de 0,05 l/s por kW o inferiores

SONDAS GEOTÉRMICAS VERTICALES

Una sonda geotérmica vertical está formada, esencialmente, por los tubos verticales, el pie y el material que rellena el espacio anular entre los tubos y las paredes del sondeo.

Las sondas geotérmicas más utilizadas constan de dos tubos (simple U) o de cuatro tubos (doble U) unidos por su extremo inferior por una o dos piezas del mismo material, que constituyen el pie de la sonda. Otros componentes accesorios de las sondas son: un peso o lastre que se cuelga del pie para facilitar la introducción en el sondeo, un tubo para inyectar material de cementación, piezas en forma de Y que se sitúan en la cabeza de la sonda para juntar dos entradas y dos salidas de las tuberías en U, manguitos para conectar estas últimas piezas a los colectores horizontales, y la tapa de la sonda. Con excepción del lastre, el resto de los componentes están fabricados, generalmente, con polietileno.



Sonda geotérmica (Fuente: archiexpo.es).

Las sondas geotérmicas son la parte más cara de un sistema geotérmico. Tienen una vida útil de 50 años y, una vez introducidas en el terreno y cementadas, no admiten posibilidad de efectuar sobre ellas ningún mantenimiento preventivo o correctivo, de ahí la importancia de que estén adecuadamente dimensionadas y correctamente instaladas.

La vida útil de una sonda geotérmica es varias veces mayor que la de una bomba de calor

y la de todos los componentes que constituyen el sistema geotérmico. En ese tiempo, se conectarán a las sondas varias generaciones de bombas de calor y se tendrán que sustituir algunos componentes (tuberías y grifería) del circuito del fluido caloportador, que tienen una vida útil de unos 20 años.

Aunque las sondas son ensayadas a presión, con aire, en fábrica antes de su expedición, es aconsejable someterlas a una prueba de estanqueidad, con aire o agua, al hacer la recepción de las mismas y antes de su montaje.

OTROS SISTEMAS

Otros subsistemas para intercambio de calor con el terreno o para captar calor de aguas subterráneas o superficiales son: cimientos geotérmicos, sistemas de aguas de minas y túneles, sistemas de aguas residuales urbanas, sistemas de aguas superficiales y pozos canadienses o provenzales.

En general, se trata de aprovechamientos complementarios de otros proyectos cuyo objetivo principal no es la explotación de la energía geotérmica superficial.

COSTES DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR O SONDAS GEOTÉRMICAS Y MATERIAL AUXILIAR

Los precios de los intercambiadores de calor o sondas geotérmicas, así como del material auxiliar dependerán del tipo elegido y del fabricante, siendo habituales los siguientes:

- Intercambiadores de calor o sondas geotérmicas: 1.014 a 1.465 €/100 m
- Interconexionado: 4,50 a 7,90 €/m
- Material relleno con propiedades termoconductivas: 3,90 a 5,60 €/m
- Fluido caloportador (concentración anticongelante 25%): 5,60 a 7,90 €/m
- Retirada de residuos o lodos: 112,70 a 225,40 €/m^3 ■

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEME (2006): "Les pompes a chaleur". Agence de l'Ennvironnement et de la Maîtrise de l'Energie. Angers. Francia.
- CONNECTICUP DEP. OF PUBLIC HEALTH (2007): "Recomendations for regulation of geothermal Wells". Hartford. CT. EE.UU.
- GARCÍA LÓPEZ, A. (2004): "Ahorro de energía, aprovechamiento de la energía geotérmica en las instalaciones de climatización". CIATESA. Montilla. Córdoba. España.
- IGSHPA (1988): "Close-Loop / Ground-Source Heat Pump Systems. Installation Guide". Oklahoma State University. Stillwater. EE.UU.
- MCCRAY, K. (1999): "Guidelines for the construction of vertical boreholes for closed loop heat pump systems". National Ground Water Association. Westerville. Ohio. EE.UU.
- REUSS, M. y SANNER, B. (2000): "Design of closed loop heat exchangers". International Summer School on Direct Aplication of Geothermal Energy. IGA.
- RNCAN (2002): "Les systèmes gèothermiques commerciaux: Guide de l'acheteur". Centre de la technologie de l'energie de CANNET-Varennes. Resources Naturelles Canada. Ottawa. Ontario. Canadá.
- VDI (2001): "VDI 4640, Part 1, Part 2. Termal use of the underground". Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf. Alemania.
- LLOPIS TRILLO, G., LÓPEZ JIMENO, C. y FRANQUEZA PALACIOS, J. (2009): "Guía Técnica de Sondeos Geotérmicos Superficiales". FENERCOM. Madrid. España.
- ZAMORA, M. (2008): "Diseño de intercambiadores de calor enterrados. Modelo de cálculo y análisis de sensibilidad a los parámetros de mayor relevancia". CIATESA. Montilla. Córdoba. España.

LA GESTIÓN DEL AGUA EN DISTINTAS CIVILIZACIONES: DE GRECIA A LA ACTUALIDAD

THE WATER MANAGEMENT IN DIFFERENT CIVILIZATIONS: FROM GREECE TO ACTUALITY

Juan José Argudo García. Ingeniero de Recursos Energéticos. Máster Universitario en Ingeniería de Materiales y Construcción Sostenible. Ingeniero Técnico Minas.

RESUMEN

El agua es de vital importancia para el desarrollo de la vida, hasta el punto que los antiguos filósofos la consideraban como un elemento básico que representaba todas las sustancias líquidas. Los primeros asentamientos urbanos fueron sobre el año 3500 a.C. en Uruk – Babilonia (actual Irak), ya contaban con suministro de agua, y desde los griegos, como Eupalinos o Tales de Mileto, hasta los romanos, construyendo espectaculares acueductos o la Cloaca Máxima, o sus famosos baños públicos, donde se trataban los asuntos de la ciudad, pasando por los árabes y sus normas hídricas en Al-Ándalus, aterrizamos en el Renacimiento, donde después de décadas de oscuridad, Italia devolvió la Luz al mundo, aportó espectáculo, innovación y técnica, donde las nuevas ideas de las mentes más brillantes de la Historia, como Filippo Brunelleschi, que era puro ingenio, y fue un momento donde se crearon las obras artísticas y arquitectónicas, y de ingeniería más importantes, y donde la clave de dicho resurgimiento de las Ciudades-Estado italianas estaba en el Agua, como elemento fundamental del crecimiento demográfico y del aumento de la población. Viajaremos por las distintas culturas hasta el momento presente para conocer de primera mano la importancia de uno de los cuatro elementos de la antigüedad.

PALABARAS CLAVE: agua, abastecimiento, desarrollo, ingeniería, cultura.
KEY WORDS: water, supply, development, engineering, culture.

ABSTRACT
Water is the extreme importance for the advance of the life, in the moment that the old philosophes considered like a basic element that represents all liquid substances. The first human seeting were about the year 3500 aC and they have water supply and from the Greeks, like Eupalinos or Tales of Mileto, until the romans, building spectacular aqueducts or the Great Sewer, or their famous public baths, where it treats issues of the city, passing by the Arabians with their hydric rules of Al – Ándalus, we arrived in the Renaissance, where after the decades of darkness, Italy returned the Light to the world, added show, innovation and technic, where the new ideas of the more brilliant minds of the History, like Filippo Brunelleschi, that he was pure genius, and one moment where it did the artistic and architectonical buildings, and engineering more important, and the key of the this resurgence of the Italians Cities-State was in the WATER, like principal element of the demographic development and the increment of the population. We travel for the different cultures until the present moment for knowing of the first hand, the importance of the one of the four elements of the ancient times.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se encuentra en proceso de difusión e implantación a nivel estatal tras su amplia experiencia adquirida en otros países donde ya lleva décadas expandiéndose.

La gestión de un bien tan esencial como el agua ha constituido un apasionante desafío desde casi el comienzo de los tiempos. Desde que comenzaron los primeros asentamientos urbanos en la ciudad de Uruk, en Babilonia (actual Irak) en el año 3500 a.C., el objetivo era cómo abastecer a dichos ciudadanos de un bien tan esencial. Como queremos poner de relieve en este artículo, se propone un apasionante viaje por distintas culturas, que han aportado su visión, su técnica, su tecnología, su conocimiento en definitiva, para mejorar la vida de sus conciudadanos y por ende, de la humanidad. En el más amplio sentido de la palabra. Y si no fíjense, en la Atenas de la antigüedad o en la Roma imperial, y cómo la ingeniería minoica proporcionó bienestar a toda una región y cómo gracias a la colosal obra de ingeniería sanitaria que constituyó la Cloaca Máxima, se evitaron muchas enfermedades.

Los árabes apreciaron que el agua es el principio más importante del Universo, pues el trono de Dios está en el agua en el momento de la creación, según el Corán, pero siendo importante obtener agua, no menos era el agua que acababa en las cloacas. Y prueba de ello fue la terrible plaga de peste negra que diezmó la población europea en plena Edad Media, debido a que se comenzaron a construir depósitos para almacenar el agua, y ésta no limpiaba las alcantarillas.

No obstante, la Luz llegó con el Renacimiento y su manera de afrontar el resurgir de la sociedad, mediante la cultura, la arquitectura, las artes y la sociedad volcada en unos nuevos dirigentes surgidos de comerciantes, banqueros, etc. como los Médicis en Florencia, ciudad estado italiana donde ese renacimiento se dejó notar con más importancia, al igual que Siena, su rival histórica del sur y cómo el abastecimiento de agua a estas ciudades supuso un reto técnico y capital, para provocar el aumento de la población y por ende de la capacidad de prosperidad.

Y como desde el renacimiento, la revolución industrial surgida en el siglo XIX en Inglaterra, y más concretamente en su capital, Londres, trajo mejoras y avances sanitarios, como la

Imagen 1. Uruk–Babilonia (actual Irak), primeros asentamientos urbanos (3500 a.C.).
Fuente: https://www.caracteristicas.co/sumerios

filtración del agua, hecho que afirman muchos expertos, como el mayor avance sanitario del segundo milenio, y cómo un ingeniero victoriano provocó la erradicación del cólera al proyectar una de las mayores, si no la mayor, obra de ingeniería del siglo XIX, diseñando la renovación de la red de alcantarillado de la capital con más de 2.100 km de redes de saneamiento.

Y de la misma manera que en el siglo XIX, el saneamiento era una prioridad para los políticos valientes de la Cámara de los Comunes sentados en sus asientos verdes, en pleno siglo XXI tenemos un reto que resolver pues aún hoy existen, según la ONU, 2.100 millones de personas en el mundo sin acceso a un saneamiento. Hecho éste que provoca que grandes fundaciones filantrópicas, como la Melissa & Bill Gates Foundation, pongan su granito de arena en conseguir inodoros que no requieran ni conexión a la red de saneamiento, y ni siquiera disponer de agua corriente, como se puso de manifiesto a finales del año pasado en una exposición en China.

En definitiva, comencemos nuestro viaje por un mar que Homero consideraba "tenía un color de vino y que era mecido por las ramas de un olivo", el árbol de Atenea, mientras que Poseidón se quedó con la abundancia del agua, símbolo de prosperidad y calidad de vida. Iniciemos un viaje apasionante mecidos por las olas del mar y por los mejores avances de la cultura occidental, oriental, romana o persa. ¿Me acompañan?

GRECIA O EL ORIGEN DE LA INGENIERÍA

El país heleno, con el conjunto formado por el continente, las más de 2000 islas y el mar forman una relación intricada y perdurable por el paso de los siglos, donde desde cualquier punto del continente tiene el mar a menos de 80 km de distancia. Un mar que era acunado por las ramas de olivo, el árbol de Atenea, diosa de Ática, la más importante y famosa región de La Hélade.

El agua helena

Siglos antes, los ingenieros minoicos fueron expertos en el dominio de las técnicas hidráulicas, y se conocen explotaciones de recursos de agua como regadíos de las regiones de Cnosos y Zakro, con manantiales, acueductos, cisternas y pozos, donde recolectaban el agua de la lluvia del palacio de Festos y mantenían y conservaban sus cisternas.

En cuanto a la capital, Atenas, siempre tuvo un problema, y era un régimen irregular de lluvias, y por dicho motivo, tuvo que crear sistemas de recogida de agua de lluvia en abundancia, para usarla en momentos de escasez. Para ello usaron muchas cisternas y depósitos, como la Hybla (en Sicilia), que tenía 1300 m de perímetro y 9 de profundidad, que conducía el agua de lluvia hasta el mar. Tenía un triple uso: como piscina, estanque de peces y depósito de agua para el riego o la cisterna subterránea del Teatro de Delos (del siglo II a.C.)

Por ello, la legislación ateniense en el uso de los recursos hídricos era muy estricta, y la primera regulación fue debida a Solón, elegido arconte en el 594 a.C., una especie de magistrado con funciones de gobierno de las ciudades antiguas, fundamentalmente Atenas. Estas leyes de Solón fueron relatadas por Plutarco, con regulaciones antipolución, para mantener limpias las aguas públicas.

La legislación ateniense en el uso de los recursos hídricos era muy estricta, y la primera regulación fue debida a Solón, elegido arconte en el 594 a.C., una especie de magistrado con funciones de gobierno de las ciudades antiguas, fundamentalmente Atenas.

Fotografía 1. El Partenón en plena restauración. Mayo del 2013. Fotografía del autor.

Pero si hacemos un repaso por los primeros ingenieros, veremos qué importancia tuvo esta cultura en el resto de la sociedad, y sólo citaremos algunos de los más importantes.

- **Crates**, que fue nombrado por Estrabón, el geógrafo e historiador conocido por su obra "Geografía", en el siglo IV a.C., realizó el desagüe del lago Copais, en Locris, cuando el agua embalsada en éste amenazaba con procurar una inundación de la localidad de Copae, mediante una galería subterránea de 6 kilómetros de longitud.

- **Eupalinos**, ingeniero que trabajó en el siglo VI a.C. para el tirano Policrates de Samos, hizo un túnel de 1,75 m de ancho y 1,75 m de alto durante unos 1000 metros de longitud, para el abastecimiento de la isla de Samos, a través del monte Ambelos, con modernas técnicas de topografía. Primera obra bien documentada, que Paul Valéry, escritor, ensayista y filósofo francés mostró a Eupalinos como la personificación del ingeniero griego en su diálogo socrático Eupalinos ou l'arquitecte.

- **Tales de Mileto**, fundador de la filosofía griega, considerado "uno de los siete sabios de Grecia" tenía un lema que decía "en la confianza está el peligro". Aportó la teoría del ARJÉ, donde el principio original de todas las cosas era el AGUA, más los trabajos de ingeniería. Antes de Tales de Mileto, todas las explicaciones del universo eran mitológicas (como hemos comentado anteriormente, uno de los orígenes del agua). Después de Tales de Mileto, que fue famoso por sus conocimientos de astronomía al predecir el eclipse de Sol del 28 de mayo del año 585 a.C., la geometría era quién dirigiría los designios, que fue introducida por él en Grecia.

- **Herón de Alejandría**, matemático, ingeniero e inventor griego del siglo I a.C. que trabajó como zapatero y luego diseñó mecanismos hidráulicos, máquinas simples, automatizaciones, fue conocido por su famosa fuente o por sus puertas hidráulicas de apertura automática. Su invento decisivo fue la AEOLIPILA, precursor de la máquina de vapor, sin avance alguno o

mejora hasta la Máquina de Papin, en el año 1681. Fue el director de la Escuela de Alejandría, quizás la primera Universidad Politécnica del mundo.

- Y para finalizar, **Arquímedes de Siracusa**, matemático, astrónomo, filósofo, físico e ingeniero que murió a manos de un soldado romano cuando al tomar Marcelo la ciudad, el sabio estaba sumido en sus reflexiones. Repasemos brevemente su C.V.:
  - Conoció a Eratóstenes y Dositeo, sucesores de Euclides.
  - Hizo descubrimientos sobre geometría, catóptica, hidráulica, mecánica, construcción y máquinas de asedio.
  - Inventor de poleas y de un cañón que lanzaba proyectiles impulsados por el agua.
  - Su famoso Tornillo de Arquímedes.
  - Su aún más famoso Principio de Arquímedes.

ROMA, EL URBANISMO Y EL AGUA

Los romanos mejoraron los inventos y perfeccionaron los sistemas de gestión y uso del agua desde el primer momento. De hecho, los romanos fueron la primera civilización "urbana" que se preocupó de la calidad de vida del ciudadano. Por ello, la urbis romana fue un modelo de eficiencia. ¿Por qué? O mejor dicho… ¿Cómo?

Porque el Estado invertía en infraestructuras, que dotaban a la ciudad romana de ciertos beneficios, y avances que ahora parece que son muy normales: el agua llegaba en abundancia por los acueductos, a los que luego nos referiremos, las calles se empedraban y tenían aceras, había pasos de peatones, en cuanto a la higiene, había sistema de alcantarillado y baños públicos, termas y abastecimiento de productos a los mercados.

Fotografía 2. Imagen del Teatro de Dioniso, el mayor teatro de la antigua Grecia, que data del siglo VI a.C., y en homenaje al dios Dionisos, dios de las viñas y del teatro, en la vertiente sur de la Acrópolis de Atenas.
© Fotografía del autor.

El agua romana

Pero para que este entorno urbano sea digno para vivir, existía un elemento fundamental que era totalmente necesario: el agua. Y esta se conseguía a través de los acueductos y mediante la acumulación en grandes cisternas. En los siglos I-II d.C. los acueductos se extendieron por todo el imperio, construyendo depósitos y albercas por todo el trayecto. El aqueductus (conducto de agua) fue una de las construcciones más importantes para los núcleos urbanos y rurales.

Tanto condicionaba el agua, que antes de construir la ciudad, debía de estar garantizado el abastecimiento de agua, y éste condicionaba la posición exacta de la ciudad. Así Plinio el Viejo indicaba en su Historia Natural, XXXI, 4, que "Es el agua la que hace la ciudad".

Aún otro dato más era que el abastecimiento de agua de boca y en condiciones de salubridad, era una cuestión política. Se planificaban las obras hídricas antes que otras obras públi-

cas necesarias también para la ciudad. Por lo que Vitrubio, manifestó en Los diez libros de arquitectura, "Tenemos la necesidad de encontrar agua en cantidad y calidad suficientes para facilitar el desarrollo de la ciudad, conducirla y distribuirla" (libro VIII).

Las primeras necesidades a abastecer fueron las termas y las fuentes, y luego casas privadas que pagaban por disponer de agua corriente. Ejemplos los encontramos en Pompeii y en Caesarea, donde disponían de suministro hídrico de forma continuada, y se construyeron bajo las casas, cisternas públicas y privadas excavadas en la roca. El suministro a los puntos de la ciudad donde se usaba el agua, era el objetivo al construir la red de abastecimiento, como: termas, ninfeos, fuentes, pozos y juegos de agua. Desde el castellum aquae terminal (depósito) y por gravedad se distribuía el líquido elemento hasta los distintos usos.

Fotografía 3. Fontana di Trevi. Roma. Mayo del 2014.
Fotografía del autor.

Acueductos

Si nos detenemos en los acueductos hispanos, antes de regresar a la Roma imperial, sabemos que los acueductos de Segovia, Mérida y Tarragona abastecían a estas ciudades desde manantiales que se encontraban a más de 50 kilómetros de distancia. En concreto el acueducto de los Milagros, en Emerita Augusta (del siglo I d.C.), capital de Lusitania, tenía su "caput aquae" (captación de agua) en el Embalse de Proserpina, con una longitud de más de 15 kilómetros.

Si regresamos al país transalpino, el emperador Claudio mandó construir el Aqua claudia, el mayor acueducto de Roma (a mediados del siglo I d.C.) que llevaba el agua a los 14 distritos romanos, aunque el más antiguo data del año 312 a.C., denominado Aqua appia, mandado construir por el emperador Appio Claudio Cieco de 1,6 kilómetros de distancia desde el punto de toma. Otros de fecha similar son el Aqua anio vetus, el Aqua marcia o el Aqua tepula, del siglo III a.C.

El impulso definitivo lo estableció el emperador Augusto y su yerno, Marco Agripa, el cual construyó el aqua virgo, como según dice una leyenda, porque una doncella le indicó al militar

FImagen 1. Restos de los acueductos Aqua Claudia y Aqua Anio Novus, integrados como restos de la muralla Aureliana en el año 271 d.C.
Fuente: www.antareshistoria.com

donde se encontraba el agua más pura. Actualmente abastece a algunas fuentes ornamentales más bellas de Roma, entre ellas, la Fon-

Imagen 2. El acueducto Aqua Virgo debajo de la Fontana de Trevi.
Fuente: www.antareshistoria.com

tana de Trevi. En la construcción empleó sus propios recursos mineros que gestionaba para realizar las tuberías de plomo. Desde Augusto, los emperadores eran donantes y mecenas en la financiación de infraestructuras hidráulicas, entre otras.

Otros acueductos son el debido al emperador Trajano, de unos 60 kilómetros de distancia (Aqua Traiana) o el último acueducto denominado, aqua alejandrina, de 22 kilómetros en el año 226 d.C. y debido a Alejandro Severo.

La construcción de los acueductos era una labor muy costosa y era una obligación de las ciudades del imperio romano. Suponen el primer ejemplo de financiación o Participación Público-PrivadA (PPP) de la historia hace más de 2.000 años, en la gestión de un recurso básico para la población. Era una tarea de los gobiernos municipales y los ejecutaban los magistrados con dinero público y privado.

Cloacas romanas

Antes de introducirnos en la Edad Media, nos detendremos en este capítulo, no menos interesante, de la ingeniería romana. Y es que como hemos comentado, los romanos se preocuparon, de hecho fueron los primeros, por la calidad de vida de sus ciudadanos, y de la higiene (de ahí la existencia de baños públicos con agua fría y caliente, en muchos de ellos), por lo que consideraron esencial hacer una gestión de las aguas utilizadas o residuales en sus urbes. Y para ello, debían evacuar las aguas negras mediante una compleja red de cloacas (generalmente instaladas bajo las calzadas romanas) bajo el tejido urbano, considerada como una de las grandes obras de Ingeniería civil urbanas. En el libro "SPQR, una historia de la roma antigua", Mary Beard, catedrática en la Universidad de Cambridge, nos indica que los escritores posteriores alabaron los logros romanos en la construcción de un desagüe tan importante como la Cloaca Máxima o Gran Cloaca, sin que se conozca lo que se conserva de esta famosa estructura del siglo VI a.C., aunque las secciones que se pueden explorar, nos indican que hay indicios que los primeros intentos de construir el sistema de drenaje sean anteriores, concretamente al siglo VII a.C.

A pesar de todo ello, fue tanto el beneficio para la población finalmente construida, que Plinio el Viejo, no dudó en considerarla en el primer lugar de las Maravillas de Roma, al ser nombrada, la primera obra pública, por lo que la construcción de cloacas se exportó a tocas las ciudades del imperio romano de tamaño medio/grande.

Volviendo a los acueductos, para finalizar este apartado, hay que decir que las grandes arquerías y de costes gigantescos, como Segovia, Tarragona o Pont du Gard (en Nîmes, Francia) no resistirían un estudio económico de construcción y mantenimiento, comparado con las soluciones mediante tuberías.

AL-ÁNDALUS Y EL AGUA ISLÁMICA

Según el artículo de Cherif Abderrahman Jah, sobre el agua en el Al – Ándalus, nos relata que Ibn Jaldun, famoso sociólogo tunecino de origen andaluz del siglo XIV, en su obra Al-Muqqadimah, para que la vida de en una ciudad sea grata, hay que atender, al fundarla, a varias condiciones, siendo la primera: La existencia en su solar de un río o fuente de agua pura y abundante, pues el agua es cosa de capital importancia, "un don de Allah".

Imagen 3. Cloaca Máxima de Roma. Fuente: Soprintendenza Archeologica del Comune di Roma.

Y es que cuando cae el imperio romano, y llegan los árabes a la península ibérica, deben de fundar nuevas ciudades, debido al deterioro y a la destrucción de las grandes ciudades romanas como: Córdoba, Sevilla, Mérida, Zaragoza, Toledo y muchas otras, por lo que podemos encontrar restos de la cultura romana, árabe, judía y cristiana conviviendo con toda naturalidad, en nuestra excelsa y variada cultura y geografía hispana. La ciudad hispanomusulmana contaba con: casas, palacios, fuentes públicas, Hammams o baños, depósitos y canalizaciones urbanas.

El agua en el islam

La gestión y distribución del agua en Al–Ándalus no era ajena a las normas islámicas debido a su pertenencia al conjunto de DAR al-ISLAM, por lo que las normas le afectaban a la manera de organizar el bien más preciado de la naturaleza para los musulmanes. Ya en el Corán se indica que es el principio más importante del universo, puesto que el trono de Dios está en el agua en el momento de la creación: "Él es quien ha creado los cielos y la tierra en 6 días, teniendo su trono en el agua" [Corán, XI, 7] y continua el libro Sagrado de los islámicos, "¿Es que no han visto los infieles que los cielos y la tierra formaban un todo homogéneo y los separamos? ¿Y sacamos del agua a todo ser viviente? ¿Y no creerán?" [Corán, XXI, 30]

Normas hídricas

Las normas que regían el mundo musulmán indican que la propiedad y gestión del agua siguen un criterio islámico, además de costumbres y normas locales. Es en los siglos VIII y IX cuando aparece el derecho codificado en sus líneas principales y en las diferentes escuelas coránicas, aunque en Al – Ándalus y en el resto del Occidente islámico, el rito mãlikí es el principalmente aplicado en la interpretación de la Ley.

Los aspectos más importantes eran: el caudal y quién hacía el trabajo para la captación y/o conducción del agua. Así se dividían los usos y usuarios, en función del tipo de captación:

- Grandes ríos ➡ todos
- Pequeños ríos ➡ existían limitaciones
- Ríos sin presa ➡ prioridad de los ribereños y terceros (sin procurar perjuicios)

- Ríos con presa ➡ tiene derecho el asentamiento más antiguo, y si son coetáneos, riega primero el más cercano al nacimiento del río.

En cuanto a los sistemas hidráulicos, hay que decir que las obras de captación, qanat/s, pozos, minas, fuentes, puede haber propiedad particular, limitada por el derecho de ŠAFA, es decir, el derecho de dar de beber a los hombres y animales que lo necesiten, mientras que el sobrante iba para los regantes, y hay que apuntar, que no hay acuerdo entre las escuelas coránicas si en ese caso era aceptada la VENTA.

Y es que existen dos preceptos fundamentales que guían los derechos al agua en la Shari`ah, según el sistema de derecho islámico, que son:

- Shafa ➡ derecho al sediento. Derecho universal del ser humano a saciar su sed y la de sus animales

- Shirb ➡ Derecho al riego. Derecho para regar sus cosechas

"Nadie puede negar el agua que sobra sin pecar contra Allah y contra el hombre".

Sistemas hidráulicos urbanos

La crisis del mundo romano supuso una vuelta al mundo rural y abandono de la ciudad, de gran alcance en el occidente altomedieval. Por este motivo los árabes reactivaron la vida urbana y fundaron ciudades nuevas, y debido a que los antiguos sistemas de abastecimiento fueron destruidos, tuvieron que crear nuevos sistemas de abastecimiento.

El agua era distribuida a los aljibes públicos, mezquitas, baños, y actividades económicas como las alfarerías, tenerías,…y algunas casas andalusíes disponían de abastecimiento de agua y evacuación de aguas negras. Las aguas de lluvia discurrían por la calle y se recogían en aljibes, las aguas residuales no iban por la calle y menos aún las fecales. Las aguas residuales se evacuaban desde el patio de las viviendas andalusíes por canalizaciones subterráneas o superficiales, y las aguas fecales iban a las "letrinas", con una conducción independiente. Al final las residuales y las fecales iban a pozos negros existentes en el borde de la calle, aunque en las ciudades más avanzadas, existía un sistema de canales subterráneos, que conducía el agua sucia al exterior del núcleo urbano.

Los primeros almacenamientos como tales, en forma de depósitos de acumulación de agua, para cuando se necesitara su uso, se dieron en la Edad Media, y dicho depósito de agua evitó la limpieza regular del sistema de alcantarillado.

Tecnología islámica

Las tecnologías viajaron desde Oriente a Occidente, y los elementos provenían de China, India y Persia, cristalizando en Oriente Medio. Para el historiador Joseph Needham, el proceso fue lento y evolutivo, mientras que para el arabista Juan Vernet, fue un proceso rápido y en un momento crucial en el Imperio Islámico del siglo X. Por ejemplo, de los romanos heredan sus conocimientos de sus contactos del ámbito griego, la Escuela de Alejandría y el Próximo Oriente.

EDAD MEDIA, AGUA Y MUERTE

Los primeros almacenamientos como tales, en forma de depósitos de acumulación de agua, para cuando se necesitara su uso, se dieron en la Edad Media, y dicho depósito de agua evitó la

Imagen 4. La Basílica–Cisterna.
Fuente: www.laguiadeviaje.com

limpieza regular del sistema de alcantarillado. Por lo tanto, condujo a la primera gran epidemia de peste bubónica.

Un ejemplo muy curioso lo encontramos en Constantinopla, la actual Estambul, con la cisterna de Yerabatan. Construida con los escombros de los formidables templos paganos condenados por el cristianismo. Hoy en día, se la conoce como Basílica – Cisterna, Cisterna de la Medusa o Palacio Sumergido. Se construyó en la época de Justiniano I, que fue emperador bizantino. Era la mayor de las 60 cisternas de Bizancio/Constantinopla/Estambul, en el año 532 d.C. Tiene una capacidad entre 80.000 y 100.000 m^3, mediante un bosque de 336 columnas de mármol de 9m de altura, dispuestas en 12 filas de 28 columnas, separadas entre sí unos 4,8 m. Esta cisterna fue construida con un nivel científico-técnico decadente, como el resto de la ciencia y estilo de vida de la Roma Aeterna. La gran epidemia de Peste Negra en Constantinopla fue contemporánea a la construcción y uso de estos depósitos. Podríamos decir que fue el nacimiento de la miseria técnica medieval, es decir, el momento en que la ingeniería romana murió, para no ser superada hasta la actualidad. El problema fue que al almacenar el agua, que no era habitual en la Edad Media, se dejó al enorme sistema de alcantarillado de Estambul en una pésima condición sanitaria, y fue un nido de ratas y excelente caldo de cultivo para la propagación de la bacteria Yersinia pestis. Las ratas y sus pulgas infectaron a los seres humanos con la terrible enfermedad que diezmó a la población europea durante siglos.

RENACIMIENTO, AGUA Y VIDA

Después de décadas de oscuridad, Italia devolvió la Luz al mundo, un mundo que emergió de la peste negra, y que aportó espectá-

Imagen 5. Columna de la Medusa en la Basílica Cisterna de Estambul. Fuente: www.trt.net.tr

culo, innovación y técnica, con el aporte de nuevas ideas de las mentes más brillantes de la Historia. Obras artísticas, arquitectónicas y de ingeniería más importantes nacieron en un momento irrepetible de la historia, denominado Renacimiento.

Cuando cae el imperio romano en el año 476 d.C., desaparece la dominación de los emperadores, y Europa es dominada durante siglos por reyes alemanes del nombrado Sacro Imperio Romano Germánico. Así en el siglo XII, las repúblicas italianas tratan de recuperar su gloria mediante la revitalización de Europa, y dibujarán los planos del mundo occidental moderno. Así nos lo cuenta Peter Weller, en el documental "La era de los arquitectos. Constructores de un imperio", con un Máster en la Universidad de Siracusa en Arte del Renacimiento Italiano, tan abrumador como bello, en la época de más impacto del segundo Milenio, a través de los inventos, con Leonardo da Vinci, Galileo, Gutenberg y su imprenta, Copérnico, …donde vivimos en una época de culto a la personalidad donde el artesano es el artista desconocido y el constructor sin nombre se convierte en el arquitecto.

Del siglo XII al siglo XVI surgen en las ciudades estado italianas unos nuevos líderes como son los Mercaderes, que no son nobles y no pertenecen a la aristocracia, pero su poder económico los hace ser imprescindibles en el nuevo resurgir italiano. Entre ellos los Médicis en Florencia, que pasan de dirigir bancos o negocios a gobernar ciudades, alcanzar el poder y adquirir arte y arquitectura. En estos siglos la ciudad es la base del Renacimiento y entre ellas, encontramos a Siena, donde acudió mucha gente, y tal y como pasaba en Roma, Pompeya, Cartago, los persas o los mayas, la clave estaba en el agua.

El abastecimiento a Siena, fue realizado mediante una red de acueductos desde fuera de la ciudad, denominados "bottini", que disponían de pozos de registro para el mantenimiento y conservación y de ventilación y para la entrada de luz al interior.

A pesar de ello, la ingeniería hidráulica no evitó una de las mayores catástrofes del mundo en 1347, la peste negra, que ya hemos comentado. Así Giovanni Bocaccio, escribió que "podías comer con tus amigos y cenar con tus ancestros en el cielo", debido a que fue testigo presencial de la peste. Siena perdió el 60% de su población en unos meses, y ya no recuperaría la posición que tuvo en la Italia moderna. Siena perdió su lugar por la peste, y ahí devino el surgimiento de Florencia.

En la Italia renacentista del siglo XV comienza una nueva actitud humanista del conocimiento científico de los molinos y su mejora para prestar servicio a los hombres. Los primeros son los ingenieros militares instruidos como Taccola, Francesco di Giorgio Martini y el propio Leonardo da Vinci se interesan por los molinos y los describen y los dibujan, así como realizan innovaciones. Jerónimo Cardano (1501-1576) en su obra De rerum varietate indica que en su época los molinos de viento eran conocidos en el norte de Italia, el Milanesado y otras regiones italianas. Aunque un conocimiento más profundo sobre los molinos lo encontramos en el español Jerónimo Grava, matemático de Carlos V, ingeniero hidráulico escribió un tratado "Declaración del uso y fábrica de instrumentos de agua, molinos y otras cosas", un humanista español que se ocupó de los molinos.

Otro ingeniero español nacido en Monzón (Huesca) que se dedicó a estudiar y diseñar artefactos hidráulicos fue Pedro Juan de Lastanosa, que escribió la obra "Veintiún libros de los Ingenios y las Máquinas" publicado sobre el 1589, atribuido erróneamente mucho tiempo a Juanelo Turriano. Lastanosa también se estudió cómo resolver el problema del abastecimiento de aguas a la ciudad de Nápoles, que recogió en un documento titulado "Discurso de las Aguas del Selino". Fue inspector del Canal Imperial de Aragón, en el momento en que los maestros constructores del agua gozaron de la mayor consideración social en las coronas de Aragón y Castilla. Dijo que "el agua es uno de los cuatro elementos que Dios ha creado para beneficio de los hombres y sin ésto no se puede sustentar nada" e insiste en las capacidades

Fotografía 4. Palazzo Vecchio. Florencia. Mayo del 2014. Fotografía del autor.

energéticas del agua como "combustible" que mueve las industrias harineras tan básicas para las ciudades. Y con las aguas perdidas serían un singular aparejo para el ejercicio de hacer paños, cueros y tinturas, que no pocas riquezas acarrean a las ciudades.

Y para finalizar solo hacer mención a que el Renacimiento también supo encuadrar el agua en programas estéticos públicos y privados. En las plazas se situaban las fuentes como centro rector. Como ejemplo podemos citar la Fuente en Sesa de los Tres Caños, la del Vivero en Barbastro o el Pilar de Carlos V en la Alhambra de

Imagen 6. Fuente de Santa María en Baeza. 1564. Ginés Martínez. Fuente: www.baezaturismo.com

Granada. La Fuente de Santa María en Baeza sirve para ilustrar el efecto perseguido por Ginés Martínez en 1564, al situarla en la plaza del mismo nombre entre el seminario y la Catedral.

REVOLUCIÓN INDUSTRIAL, ENFERMEDAD Y MEDICINA

La revolución industrial ocupa casi una centuria desde mediados del siglo XVIII a mediados del siglo XIX, y es en Inglaterra donde surge, y más concretamente en la ciudad de Londres. Justo en el final de dicho período de transformación económica, social y tecnológica, hemos de decir que en 1858, los londinenses vivían en una ciudad denominada por muchos como "asquerosa". ¿Por qué?

Mapa 1. Mapa de ubicación del problema de saneamiento de Londres en el siglo XIX. Fuente: www.crossness.org

Por el olor tan penetrante y nauseabundo que provenía del río Támesis. Un olor que fue denominado como "great stink" (el gran hedor), que llegó a paralizar las sesiones del Parlamento de Westminster, agravado por el verano tan caluroso de 1858.

En el siglo XIX, Londres era la ciudad más grande del mundo y a su vez, capital del imperio británico. En 1800 vivían un millón de almas y en unos 100 años, en 1900, llegó a alojar a unos 6,7 millones de personas. Fue la capital mundial de la política, de las finanzas y del comercio, sin apenas rivales, pues París o Nueva York comenzaron su dominio a finales del siglo XIX. Se convirtió en una ciudad de riqueza y en una ciudad de pobreza, pues miles de personas se hacinaban y unían de forma insalubre, de tal manera que el mismísimo Charles Dickens la inmortalizó en su obra magnífica "Oliver Twist". En 1855 se crea la Junta Metropolitana de Obras Públicas, para proporcionar una infraestructura adecuada para hacer frente a su crecimiento. La primera tarea: hacer frente a los problemas de saneamiento.

Apoyado por su colega, Isambard Kingdom Brunel, uno de los ingenieros más influyentes del siglo XIX, Joseph Bazalgette es nombrado Ingeniero Principal de la Junta Metropolitana de Obras Públicas de Londres en 1856. Y así, el Parlamento británico dio permiso para el colosal proyecto de renovación del sistema de alcantarillado de Londres, previsto por Bazalgette.

¿Cuál fue su solución?

Construir 83 millas (134 kilómetros) de alcantarillas principales subterráneas de ladrillo para interceptar las salidas de las aguas residuales y otras 1100 millas (1800 kilómetros) de alcantarillado de la calle principal para interceptar las aguas residuales crudas que fluían libremente por las calles y carreteras de Londres, hecho éste que provocó que las muertes se redujeran y las epidemias de cólera aminoraran.

El hecho transcendente hasta nuestros días, fue la visión del ingeniero Joseph Bazalgette, en el momento del diseño del proyecto, inaugurado por el Príncipe de Gales en 1865, aunque el proyecto no fuera completado hasta 1875, debido a que consideró el diámetro de las alcantarillas, estudió el momento donde la población era más densa y a cada persona le dio una concesión generosa de generación de aguas residuales por lo que las condiciones eran las más desfavorables, y duplicó el diámetro de servicio. Si no lo hubiera realizado así, el sistema habría colapsado en 1960, y en cambio, hoy día se sigue usando, 154 años después de su inauguración. Por ello Bazalgette fue nombrado Sir en 1875 por la Reina Victoria y elegido presidente de la Institución de Ingenieros Civiles en 1883. Hoy en día una placa luce en su honor en el 17 Hamilton Terrace St. John Woods y hay un monumento formal sobre la orilla del terraplén Victoria en el centro de Londres, que conmemora la genialidad de este apasionado de la construcción de puentes, como el Battersea y el Albert en Londres.

Imagen 7. Interior de la Estación de Bombeo de Aguas Residuales de Crossness, diseñada por Joseph Bazalgette. Fuente: www.crossness.org

Imagen 8. Exterior de la Estación de Bombeo de Aguas Residuales de Crossness, edificio que está incluido en el la Lista Grado 1 de Edificios más espectaculares, por ser uno de los mejores edificios victorianos de hierro fundido en el mundo. Fuente: www.crossness.org

TIEMPO ACTUAL. SANEAMIENTO COMO PRIORIDAD

La cumbre de las Naciones Unidas celebrada en Nueva York del 25 al 27 de septiembre del año 2015, sobre Desarrollo Sostenible, nos dejó algunas conclusiones interesantes, como por ejemplo la Agenda de Desarrollo Sostenible, donde se aprobaron los 17 Objeti-

vos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre 193 líderes mundiales, con 3 metas muy definidas para el período 2015 – 2030, como eran y siguen siendo:

- Fin de la pobreza extrema
- Lucha contra la desigualdad e injusticia
- Combatir el cambio climático.

En un mundo donde, según el informe de Un water del año 2015, es urgente y prioritario realizar inversiones en infraestructuras hídricas para un crecimiento económico de aquellos países que lo necesitan para su desarrollo, con una eficiencia hídrica y sostenibilidad, que garantice los beneficios del desarrollo económico y social.

Asimismo en su apartado sobre agua, saneamiento e higiene, WHO y UNICEF los datos nos ponen en una encrucijada social, medioambiental y sanitaria, pues establecen que a día de hoy 748 millones de personas en el mundo no tienen una buena fuente de agua potable para suministro, que 2400 millones viven sin instalaciones adecuadas de saneamiento, que en pleno siglo XXI, 1000 millones de personas hacen sus necesidades al aire libre y que 1800 millones usan una fuente de agua contaminada con bacterias.

Imagen 9. Imagen del inodoro en estudio de la Fundación Melinda & Bill Gates. Fuente: Cinco Días.

¿A qué esperamos para actuar?

Pues si hay alguien que no para de moverse y de buscar soluciones donde no las haya, es Bill Gates, ex presidente de Microsoft, y uno de las personas con más poder económico del mundo, además de uno de los primeros influencers a nivel mundial. Así, la Melinda & Bill Gates Foundation participó el año pasado, concretamente el día 8 de noviembre, en la exposición "REINVENTAR EL INODORO", que se celebró en Pekín. Según Reuters Pekín, Bill Gates se presentó con un tarro de heces, para presentar su propuesta, un proyecto en estudio durante años, de un WATER CLOSED (W.C.) sin necesidad de agua y sin estar conectado al sistema de alcantarillado municipal, con una dotación económica de 200 millones de $, para investigación, tecnología de inodoros, durante los últimos 7 años.

Con motivo de lo promovido por la OMS acerca de la falta de acceso a sanitarios, según los datos aportados en el apartado anterior, con el consiguiente riesgo para la salud de miles de millones de personas en el mundo, el proyecto de la fundación establece que los desechos humanos se conviertan en fertilizante, con la correspondiente adición de productos químicos. Comenzando por los edificios públicos y educativos, la idea es que se extendiera el uso a todos los hogares, porque una inversión de tal calibre, puede evitar que se sigan vertiendo las aguas residuales al medio ambiente, porque como dijo Gates, la tecnología presentada son los avances más significativos en saneamiento de los últimos 200 años.

CONCLUSIONES

En nuestro artículo hemos podido comprobar cómo aunque pasen los siglos, las preocupaciones de gente distinta y de distintas culturas y creencias, son las mismas: cómo conseguir agua limpia y de calidad, cómo mejorar la evacuación de las aguas una vez que han sido usadas, cómo evitar la enfermedad aunque queramos almacenar el agua, cómo gestionamos el acceso a los recursos y cómo afrontamos los retos que en cada momento se van presentando, pues hay que tener la osadía del tirano Dionisio, para construir la Cloaca Máxima a pesar de los suicidios, una obra que marcó el final del período monárquico o la reacción del emperador Vespasiano, contrario a la difusión de la energía hidráulica porque habría producido desempleo, como nos cuenta Paul Johnson. O bien en la zona más oriental de Sierra Morena, donde el distrito minero de Linares – La Carolina tuvo en jaque a los mineros, que han mantenido duros combates para dominar el agua de las minas hasta la aparición de las bombas de balancín accionadas por vapor y luego más tarde, las eléctricas, porque incluso en el siglo XIX, en dicho distrito minero el problema del desagüe era sin ninguna duda, el más grave de la explotación minera, una tierra minera donde Linares llegó a ser la primera potencia mundial en la producción de plomo en el año 1892.

O el desafío más importante para la humanidad, dotar de sistemas de alcantarillado novedosos y económicos, que puedan extenderse a miles de personas para evitar las enfermedades y conseguir una mejora sustancial de la calidad de vida de las personas, y en ello, el agradecimiento a fundaciones, empresas, ONG, investigadores, ingenieros, etc. ha de destilarse con el filtro del generoso reconocimiento, por su esfuerzo, su dedicación y su valentía para afrontar los problemas en pleno siglo XXI, análogos a los que se producían en la Roma Imperial, a las enfermedades de la Edad Media, o la peste renacentista. Un canto al humanismo aportando cada parte del puzle su excelencia para el bien de la sociedad. ■

BIBLIOGRAFÍA

- METCALF & EDDY, INC. Tchobanoglous, G. (1985). Ingeniería Sanitaria. Redes de alcantarillado y bombeo de aguas residuales. Editorial Labor, S.A. 440 pp.
- https://www.caracteristicas.co/sumerios/
- López García, R. (2006). Molinos hidráulicos. Apuntes de historia y tecnología. Editorial Alcalá. 237 pp.
- Beard, M. (2015). SPQR. Una historia de la Antigua Roma. Ed. Crítica. 647 pp.
- www.antareshistoria.com
- Soprintendenza Archeologica del Comune di Roma
- Johnson, P. (2000). El Renacimiento. Ed. Best Seller. 267 pp.
- Weller, P (2011). La era de los arquitectos. Constructores de un imperio. Ed. Historia National Geographic. Documental. DVD.
- www.baezaturismo.com
- Trillo San José, C. (2006). El Agua en Al-Ándalus: Teoría y Aplicación según la cultura islámica. Revista Tecnología del Agua. 9 pp.
- Moreno Gallo, I. (2014). Abastecimientos de agua romanos. Nuevas perspectivas. Presentación en Antalya en noviembre 2014.
- Vázquez Hoys, A. M. (2006). Grecia, un universo de agua. Revista Tecnología del Agua. 11 pp.
- VV.AA. (2009). En febrero…una de romanos. SPQR. Edita Biblioteca Pública de Cuenca. Junta de Comunidades de Castilla - La Mancha.
- VV.AA. (2015). Agua para un mundo sostenible. UN WATER. Informe de Naciones Unidas sobre el Agua.
- Gutiérrez Guzmán, Francisco. (2007). Minería en Sierra Morena. Ed: Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Linares, Granada, Málaga.
- https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/11/06
- www.murallologo.blogspot.com.es
- www.cervantesvirtual.com/obra-visor/los-molinos-y-los-cientificos-españoles-del-renacimiento

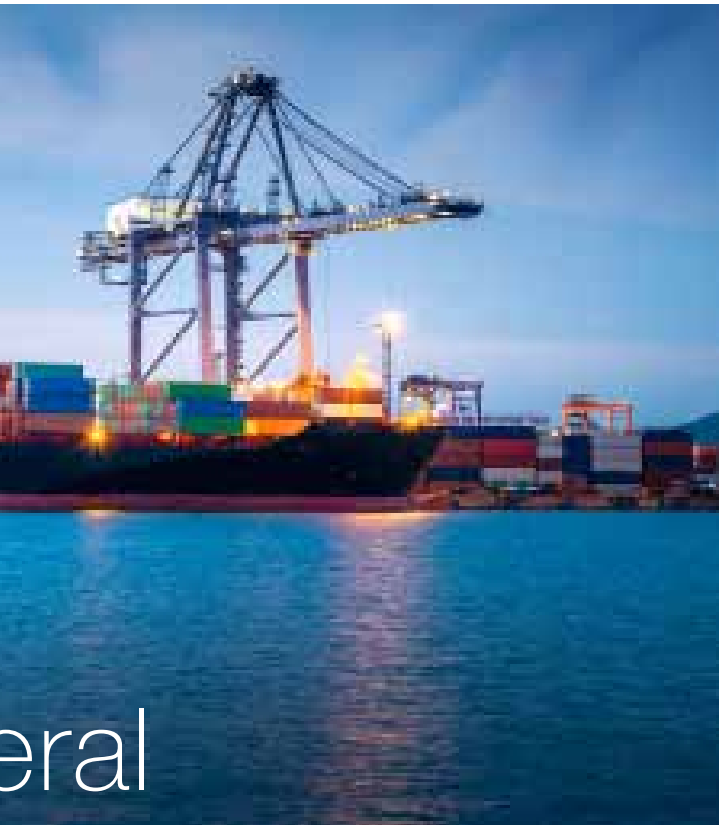
Visión descriptiva de los planes de contingencia en los puertos de interés gene

José Luis Díez Basora. Licenciado en Derecho por la Universidad de Barcelona, Master en Derecho y Negocio Marítimo y Gestión Portuaria por la Universidad Politécnica de Cataluña; y Postgraduado en Dirección de Operaciones Portuarias por la Universidad Politécnica de Cataluña.

Jesús A. Teva Córdoba. Ingeniero Técnico de Minas por la Universidad de Jaén; Licenciado en Investigación y Técnicas de Mercado (UOC); MBA (Universidad Camilo José Cela); Máster en Dirección de Operaciones Logísticas (URV); Máster en Protección Civil y Gestión de Emergencias (Universidad de Valencia); y Máster Universitario en Prevención de Riesgos Laborales (Universidad Camilo José Cela).

En el ámbito de la gestión portuaria, los aspectos relacionados con la seguridad y más concretamente la coordinación y actuación eficiente sobre las emergencias, no están exentos de la elevada complejidad y especialización que es propia de los entornos portuarios. El amplio espectro de normativa relacionada con los planes de contingencia y la falta de una legislación unificadora en este sentido, añaden dificultad adicional a una situación de emergencia que, por sus propias características, ya es complicada de gestionar. En el presente artículo, pretendemos describir los distintos tipos de planes y sus principales características para ayudar a comprender los diferentes ámbitos de aplicación de cada uno de ellos y su influencia en una política de seguridad coherente en los puertos de interés general.

Palabras clave: seguridad, puertos, autoprotección, protección, infraestructuras críticas



EL SISTEMA PORTUARIO ESTATAL

Los puertos de interés general, dependientes del Ministerio de Fomento, se regulan en nuestro ordenamiento jurídico, por el Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante, en adelante TRFLPMM. Son considerados de interés general por la relevancia de su función en el conjunto del sistema portuario español, en aplicación de lo que establece el artículo 4 de la referida Ley.

El sistema portuario se coordina a través del organismo público Puertos del Estado, al que la Ley atribuye una serie de competencias y funciones, y bajo cuyo paraguas actúan 28 Autoridades Portuarias que gestionan 46 puertos de interés general. Las Autoridades Portuarias tienen personalidad jurídica propia, autonomía de gestión y en su funcionamiento se someten al ordenamiento jurídico privado, salvo cuando ejercen funciones de poder público.

En los 8.000 km de costa con los que cuenta España, los puertos de interés general constituyen verdaderas plataformas logísticas marítimo–terrestres, por las que se mueven casi 550 millones de toneladas de mercancías, que suponen casi el 60% de las exportaciones y el 85% de las importaciones, y que, de manera agregada, suman el 53% del comercio exterior español con la Unión Europea y el 96% con terceros países. La actividad del sistema portuario estatal aporta el 20% del PIB del sector del transporte y se traduce en el 1,1% del PIB total del Estado.

En este contexto, las Autoridades Portuarias gestionan los espacios terrestres en el dominio público portuario en los que las empresas ejercen su actividad, a través de títulos concesionales o autorizaciones, y la prestación de servicios portuarios y comerciales a través de las correspondientes licencias o autorizaciones; todo lo anterior, sin perjuicio de las obligaciones derivadas de otras normativas o autorizaciones concurrentes, que añaden complejidad al entorno portuario y a su funcionamiento.

LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD EN EL ENTORNO PORTUARIO

En relación con lo anterior, la gestión de la seguridad no está exenta de este nivel de complejidad. En primer lugar, por la amplitud del concepto de seguridad y por la transversalidad y afectaciones que se derivan, desde la seguridad operativa, laboral, industrial, de la información, medioambiental, policial, ferroviaria, etc., hasta la propia gestión de las contingencias que se dan como consecuencia de la “falta de seguridad” (aunque recordemos que el riesgo cero tiene coste infinito). En segundo, por el amplio abanico de normativa general y sectorial por la que se ve afectada y que añade dificultad al correcto tratamiento de aspectos asociados a la misma.

Poniendo el foco en el ámbito de interés del presente artículo, los planes de contingencia,

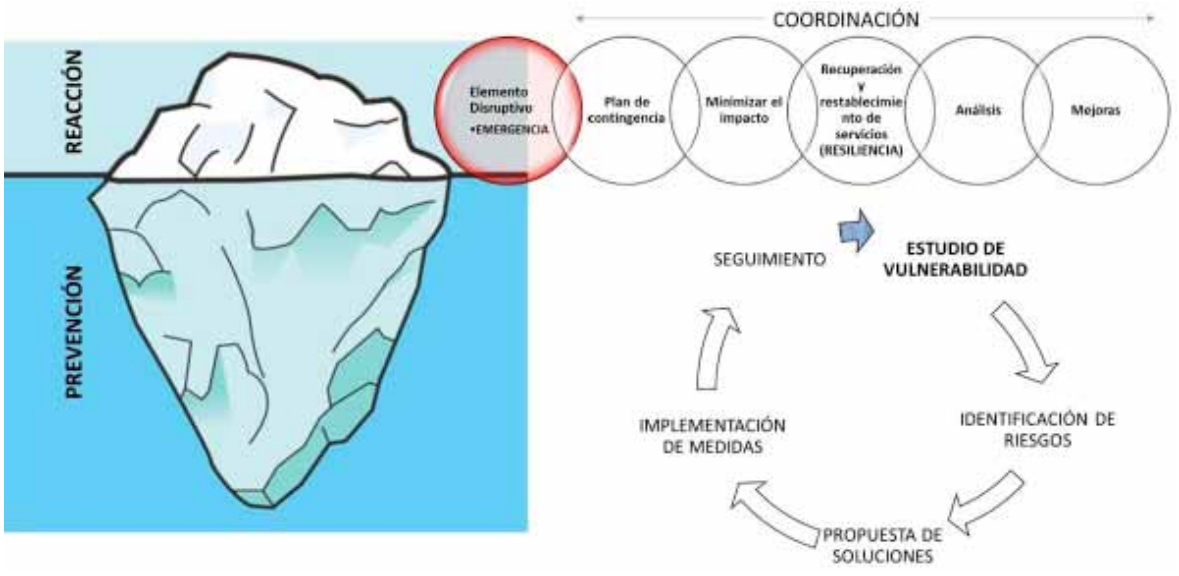


Figura 1. Relación entre las actividades preventivas y reactivas en el ámbito de la seguridad.

como parte concreta y propia de la gestión de emergencias, suponen un elemento adicional a añadir a la compleja ecuación que tratamos.

La Ley de Puertos recoge, a través de diferentes puntos de su articulado, la obligatoriedad por parte de las Autoridades Portuarias de controlar el cumplimiento de la normativa que afecte a los sistemas de seguridad y de protección ante acciones terroristas y antisociales, contra incendios y de prevención y control de las emergencias, en los términos establecidos por la normativa sobre protección civil, y lucha contra la contaminación marina, sin perjuicio de las competencias que correspondan a otros órganos de las Administraciones Públicas (…) y de las responsabilidades que en esta materia correspondan a los usuarios y concesionarios del puerto.

En este sentido, las Autoridades Portuarias cuentan con tres planes de contingencias para coordinar y gestionar las actuaciones frente a emergencias; que se aplicarán dependiendo de la naturaleza del origen de la emergencia, y que se pueden agrupar en aquellos que afectan a la seguridad entendida como protección ante riesgos deliberados (*security)*, y aquellos que afectan a la seguridad entendida como protección frente a emergencias asociadas a la propia actividad industrial que se desarrolla dentro del entorno portuario (*safety*).

En el primer grupo (*security*) incluiremos:

- La aplicación del código PBIP (protección de buques e instalaciones portuarias), trasladado a la legislación española mediante el Real Decreto 1617/2007, de 7 de diciembre, por el que se establecen medidas para la mejora de la protección de los puertos y del transporte marítimo.
- La legislación correspondiente a la protección de infraestructuras críticas, mediante la Ley 8/2011, de 28 de abril, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas, y el Real Decreto 740/2011, de 20 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de protección de las infraestructuras críticas.

En el segundo grupo (*safety)* tienen cabida:

- La legislación correspondiente a planes de autoprotección, que a nivel nacional se recoge, entre otras, en el Real Decreto 393/2007, e 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia, y que tiene su traslación y desarrollo en la normativa autonómica cuando así se encuentra traspasada dicha competencia.
- La legislación asociada a la lucha contra la contaminación marina, Real Decreto

1695/2012, de 21 de diciembre, por el que se aprueba el Sistema Nacional de Respuesta ante la contaminación marina.

Cabe señalar que la diferente naturaleza de la normativa a aplicar a cada uno de estos planes conlleva generar planes que no están armonizados entre sí y que están sometidos a procedimientos de tramitación y homologación administrativa diferentes en cada caso, con estructuras de dirección de emergencia distintas y ámbitos de actuaciones también distintos, lo que se traduce en añadir complejidad de gestión a una situación de contingencia que por sí misma, presenta numerosas complicaciones.

Conviene indicar que cualquier plan de contingencia, *grosso modo*, e independientemente de la normativa que le sea de aplicación, identificará la instalación, sus riesgos, los medios materiales y humanos con los que cuenta para hacer frente a emergencias, las herramientas de coordinación entre los diferentes equipos de intervención y organismos gestores de la emergencia a través, comunicaciones internas y externas, procedimientos y protocolos de actuación y finalmente medidas de implantación y actualización de los propios planes, así como planificación de formaciones específicas, ejercicios, prácticas y simulacros que mejoren la capacidad de respuesta frente a una contingencia.

De manera algo más detallada, sin perder la perspectiva de la descripción general que pretendemos ofrecer, los diferentes planes de contingencia o actuación en caso de emergencia tratan aspectos relacionados con:

- Identificación de la instalación y de los riesgos existentes en la instalación y el entorno que determinan la tipología de emergencias o incidentes que pueden originarse.
- Medios materiales y humanos con los que cuenta la instalación para hacer frente a un posible incidente o emergencia.
- Manual de actuación, en el que se establecen los criterios de coordinación entre las diferentes administraciones con competencias sobre la emergencia, así como el nivel de respuesta de los equipos de intervención en función del nivel de la emergencia definido, protocolos de comunicación y avisos y funciones para cada uno de los puestos definidos en el organigrama de gestión y dirección de la emergencia y la organización del conjunto de medios humanos y materiales disponibles, así como los procedimientos de actuación previstos, e identificación de los diferentes niveles de categorización de la emergencia o del nivel de protección, según sea el caso.
- Planes de formación e implementación, orientados a plasmar de forma práctica, el conocimiento y actuaciones a realizar durante períodos normalmente cuatrienales, y dirigidos a dar a conocer entre la comunidad afectada y grupos de interés, los riesgos existentes y las actuaciones a llevar a cabo para minimizarlos, así como formaciones específicas para los grupos de actuación, encaminadas a mejorar la capacidad de respuesta de los mismos frene a contingencias, realización y programación de simulacros, o la adquisición de nuevos materiales para mejorar las actuaciones en condiciones de garantía y seguridad de los intervinientes.

Conviene indicar que cualquier plan de contingencia, *grosso modo*, e independientemente de la normativa que le sea de aplicación, identificará la instalación, sus riesgos, los medios materiales y humanos con los que cuenta para hacer frente a emergencias.

En los siguientes párrafos ofrecemos una explicación de cada uno de ellos al objeto de ofrecer una visión más clarificadora de los diferentes ámbitos de aplicación y sus principales características.

El plan de protección del puerto y los planes de protección de sus instalaciones portuarias (sobre la base de la conocida interface entre el buque y la instalación portuaria) articulan los procedimientos de respuesta frente a sucesos que

Figura 2. Esquema de los distintos planes de contingencia en los puertos de interés general.

afectan a la protección portuaria y que tienen su origen en actos ilícitos o antisociales, concretando la organización, los métodos y los procedimientos necesarios para asegurar la protección y salvaguarda de los pasajeros, tripulaciones, personal de tierra, buques e instalaciones portuarias, preservando la eficiencia del tráfico marítimo que se desarrolla en los puertos.

En cuanto a las infraestructuras críticas, entendiendo como tales, aquellas instalaciones, redes, servicios y equipos físicos y de tecnología de la información cuya interrupción o destrucción tendría un impacto mayor en la salud, la seguridad o bienestar económico de los ciudadanos o en el eficaz funcionamiento de las instituciones del Estado y de las Administraciones Públicas; el plan de seguridad del operador no es un plan de contingencia como tal, sino que recoge las estrategias y las estructuras adecuadas para dirigir y coordinar las actuaciones de los distintos órganos de las Administraciones Públicas en esta materia; siendo que el Plan de Protección Especifico y el Plan de Apoyo Operativo se ocupan más propiamente de la contingencia. La norma determina la identificación de ciertas infraestructuras y designación de las mismas, para mejorar la prevención, preparación y respuesta frente a atentados terroristas u otras amenazas que afecten a infraestructuras críticas y recoge la política de seguridad integral de la organización al objeto de desarrollar una cultura de seguridad organizativa que permita mejorar la continuidad de servicio y la resiliencia frente a una emergencia en este tipo de instalaciones.

El plan de autoprotección, tratado en diferentes normativas de ámbito nacional y autonómico, prevé, para una determinada actividad, instalación, centro, establecimiento o dependencia, las emergencias que se pueden producir como consecuencia de su propia actividad y las medidas de respuesta ante situaciones de riesgo, de catástrofes y de calamidades públicas que los pueden afectar. Los planes de autoprotección se tienen que fundamentar en un análisis de riesgo y lo tienen que incluir. Además, tienen que establecer, junto con los riesgos generados por la misma actividad, la relación de coordinación con los planes territoriales, especiales y específicos que los afecten.

El plan interior marítimo, da respuesta a las emergencias que tienen como consecuencia episodios de contaminación marítima bien por hidrocarburos o por sustancias nocivas potencialmente peligrosas y articula igualmente, la respuesta organizada frente a este tipo de episodios. Del mismo modo, identifican riesgos y zonas especialmente vulnerables a la contaminación, actualización del plan y programa de implementación del mismo. En este caso, la normativa de aplicación, diferencia los sucesos de contaminación y los divide en dos subsistemas, el costero y el marítimo.

A modo de ejemplo, imaginemos una situación en la que un sabotaje por parte de un trabajador de una terminal de almacenamiento de productos químicos dentro del recinto portuario genera un vertido de líquido inflamable y posterior incendio de los vapores, afectando de manera importante al conjunto de la terminal y afectando negativamente el desarrollo normal de la actividad habitual de parte del recinto portuario, así como contaminación de la lámina de agua por el mismo derrame de productos.

En este caso, como consecuencia del origen de la emergencia en un acto ilícito, se activaría el plan de protección de la Autoridad Portuaria, para activar los protocolos y actuaciones enca-

minados a actuar sobre el origen de la contingencia desde la perspectiva de la protección portuaria, así como el Plan de Protección Específico y en su caso el Plan de Apoyo Operativo, para el caso de considerarse ese Puerto concreto como Infraestructura Critica. Del mismo modo, se activaría el plan de autoprotección del puerto, para dar respuesta a la emergencia ocasionada por el incendio, sobre la terminal y su incidencia sobre el conjunto de la actividad portuaria, e igualmente el plan interior marítimo, para dar respuesta a la contaminación marítima provocada por las sustancias químicas.

Recordemos, que se trata de actuar coordinadamente, teniendo presente la aplicación de tres planes de contingencia diferentes, con normativas, protocolos de actuación y estructuras de dirección de emergencia que no necesariamente van a ser las mismas.

Ámbito normativo que afecta a los diferentes planes.

A modo de resumen no exhaustivo, las principales normativas que afectan a los planes descritos con anterioridad son:

En el esquema de la página siguiente (Figura 3), se muestra la relación de normativa que afecta a la interacción entre los planes relacionados con la seguridad –"safety"– que afectan a las Autoridades Portuarias.

En todos los casos, el esfuerzo de los planes de contingencia tiene el doble propósito de prevenir accidentes, así como abordarlos de manera eficiente y segura, minimizando el impacto en el entorno (personas, bienes y medio ambiente), en caso de que aquéllos se produzcan.

Política de seguridad integral. Norma UNE ISO 22320

Ante el amplio abanico de normativa de aplicación vigente a los planes de contingencia en el ámbito portuario, es necesario el desarrollo e implementación de una política de seguridad integral en las autoridades portuarias, que con la implicación de la alta dirección, con responsabilidad directa sobre la consecución de los objetivos definidos en este sentido, permitan una integración transversal y una línea de coherencia en el conjunto, que doten a la organiza-

Normativa de aplicación vigente a los planes de contingencia "SAFETY", en los puertos de interés general	
Plan de Autoprotección (PAU)	Real Decreto 145/1989, de 20 de enero, por el que se aprueba el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías Peligrosas en los Puertos.
	Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección en los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
	Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas – SEVESO III.
	Decreto 30/2015, de 3 de marzo, por el que se aprueba el catálogo de actividades y centros obligados a adoptar medidas de autoprotección y se fija el contenido de las mismas. De aplicación en la Comunidad Autónoma de Cataluña.
	Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.
	Ley 4/1997 de Protección Civil de Catalunya (artículos 19 y 20).
	Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil (artículo 7).
Plan Interior Marítimo (PIM)	Sistema Nacional de Respuesta, regulado en virtud del Real Decreto 1695/2012, de 21 de diciembre.

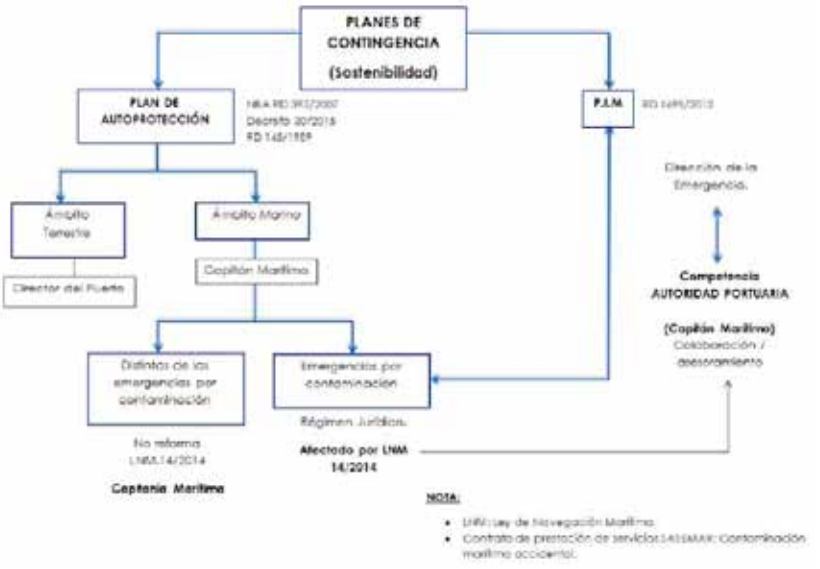


Figura 3. Esquema de relaciones entre el Plan Interior Marítimo y el Plan de Autoprotección en los puertos de interés general.

ción de una perspectiva integral, garantizando la continuidad de negocio y la capacidad de resiliencia en infraestructuras de la importancia de los puertos de interés general.

Con el objetivo de profundizar en la coordinación entre planes, la implantación de la norma UNE/ISO 22320 de gestión de emergencias, permite trabajar en sistemas de respuesta eficaces a las emergencias, minimizando el impacto de las consecuencias generadas tras las mismas, así como mejorar la capacidad de respuesta apropiada y eficaz a las necesidades de los diferentes colectivos internos y externos, y los diferentes grupos de interés, recogiendo las mejores prácticas para establecer el orden y control organizacional de las estructuras y procedimientos, toma de decisiones, trazabilidad y gestión de la información.

En consonancia con lo anterior, en aras de garantizar una mejor gestión de la comunicación interna en situaciones de crisis asociadas a emergencias que afecten o puedan afectar a los puertos de interés general, la implementación de un comité de gestión interna de incidentes, emergencias y crisis, que no teniendo responsabilidad alguna en la dirección de la emergencia, algo que en cada caso corresponde tal y como se define en la normativa de

Normativa de aplicación vigente a los planes de contingencia "SESCURITY", en los puertos de interés general	
Plan de Protección Portuaria (PPP)	Código Internacional de la OMI para la protección de los buques y de las instalaciones portuarias (Código PBIP), adoptadas el 12 de diciembre de 2002 mediante Resolución 2 de la Conferencia de Gobiernos contratantes del Convenio Internacional pata la Seguridad de la Vida Humana en el Mar de 1974. Reglamento (CE) 725/2004, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 31 de marzo de 2004, relativo a la mejora de la protección de los buques y de las instalaciones portuarias. Real Decreto 1617/2007, de 7 de diciembre, por el que se establecen medidas para la mejora de la protección de los puertos y del transporte marítimo.
Plan de Infraestructuras Críticas (PIC)	Ley 8/2011, de 28 de abril, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas.
	Real Decreto 704/2011, de 20 de mayo, que aprueba el Reglamento de protección de las infraestructuras críticas.
	Resolución de 8 de septiembre de 2015, de la Secretaría de Estado de Seguridad, por la que se aprueban los nuevos contenidos mínimos de los planes de seguridad del operador (PSO) y de los planes de protección específicos (PSE).

aplicación vigente; sí que tendría capacidad y responsabilidad sobre la gestión de la información que internamente se transmite dentro de la organización, así como entre direcciones que indirectamente puedan ver afectada su actividad por la situación, buscando actuaciones que garanticen la continuidad de negocio y del servicio prestado, así como una correcta interacción con los grupos de interés afectados.

No hemos de dejar de lado la integración que en determinadas emergencias se habrá de realizar con planes de ámbito superior, que en cada caso sean de aplicación, lo que supondrá un reto más en las actuaciones de coordinación y gestión de la emergencia desde una perspectiva global e integral (Figura 4).

Como conclusión, en los entornos portuarios y en general, en cualquier entorno industrial y organizacional con cierto nivel de complejidad, la existencia de una normativa integradora desde el punto de vista de la seguridad –a modo de Código de Seguridad Marítimo-Portuaria–, facilitaría la aplicación efectiva de la diversidad de planes que actualmente existen en el marco de la gestión de emergencias, en línea con las actuaciones que en otros países de nuestro entorno, se están llevando a cabo en este sentido. Pensamos que un esfuerzo por parte del legislador en esta línea ayudaría a una mejora de la eficiencia de la seguridad y de los planes de actuación frente a las distintas tipologías de contingencias. ■

NORMA UNE ISO 22320	Estructura de mando y control	Personas
		Recursos
		Niveles de mando
		Niveles de respuesta
	Información operacional	Planificación
		Recopilación
		Procesamiento y explotación
		Análisis
		Difusión
	Coordinación y cooperación	Identificación "interfaces"
		Niveles de cooperación
		Niveles de coordinación

Figura 4.- Visión esquemática del alcance de la norma UNE ISO 22320, de gestión de emergencias

Como conclusión, en los entornos portuarios y en general, en cualquier entorno industrial y organizacional con cierto nivel de complejidad, la existencia de una normativa integradora desde el punto de vista de la seguridad -a modo de Código de Seguridad Marítimo-Portuaria-, facilitaría la aplicación efectiva de la diversidad de planes que actualmente existen en el marco de la gestión de emergencias, en línea con las actuaciones que en otros países de nuestro entorno, se están llevando a cabo en este sentido. Pensamos que un esfuerzo por parte del legislador en esta línea ayudaría a una mejora de la eficiencia de la seguridad y de los planes de actuación frente a las distintas tipologías de contingencias.

Figura 4. Visión esquemática del alcance de la norma UNE ISO 22320 de gestión de emergencias.

PRINCIPALES REFERENCIAS NORMATIVAS

- Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.
- Real Decreto 145/1989, de 20 de enero, por el que se aprueba el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías Peligrosas en los Puertos.
- Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección en los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
- Sistema Nacional de Respuesta, regulado en virtud del Real Decreto 1695/2012, de 21 de diciembre.
- Real Decreto 1617/2007, de 7 de diciembre, por el que se establecen medidas para la mejora de la protección de los puertos y del transporte marítimo.
- Ley 8/2011, de 28 de abril, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas.
- Real Decreto 704/2011, de 20 de mayo, que aprueba el Reglamento de protección de las infraestructuras críticas.
- Resolución de 8 de septiembre de 2015, de la Secretaría de Estado de Seguridad, por la que se aprueban los nuevos contenidos mínimos de los planes de seguridad del operador (PSO) y de los planes de protección específicos (PSE).

BIBLIOGRAFÍA

- Piniella, F. "Gestión Portuaria y Logística". 1ª ed Sevilla, Universidad Internacional de Andalucía, 2009, 192p, ISBN 978-84-7993-078-3
- Richard Mari "Seguridad en los puertos". Barcelona, Marge Books, 2012, 288p, ISBN 978-84-1534-048-5.

La piel de las rocas

Antonio Daza Sánchez. Dr. Ingeniero Geotécnico. Profesor Titular Universidad.

Jesús Gutiérrez–Ravé Caballero. Dr. Ciencias Geológicas. Profesor Sustituto.

Grupo RNM244-Seminario Antonio Carbonell. Universidad de Córdoba. EPSB de Belmez.

La piel de las rocas evita el proceso de alteración y se caracteriza por la salida a la superficie rocosa de elementos contenidos en la misma, también en macizos rocosos puede desarrollarse que los hidróxidos metálicos migren al exterior de la matriz rocosa hacia sus discontinuidades, originando la pátina y a partir de la formación de esta piel el proceso de alteración interna disminuye. Las discontinuidades del macizo rocoso también presentan una costra de alteración que tiene que ver con el desplazamiento de fracturas o con la presencia de fluidos y minerales desde su entorno exterior.

PALABARAS CLAVE: pátina, costra, discontinuidad, alteración, piel de la roca.
KEY WORDS: patina, crust, discontinuity, alteration, rock skin.

INTRODUCCIÓN

La pátina de las rocas son acreciones que disminuyen la alteración mediante un proceso de migración hacia la superficie de la roca de los constituyentes tales como Al, Fe y Mn. Ante el desequilibrio producido en una superficie de discontinuidad por un cambio debido a la menor impedancia en el exterior de la propia roca, debido al proceso de interacción de la roca y el medio que le rodea.

Aunque ya existe modelización genética de nódulos y concreciones (Torrijo *et al.* 2004), en el presente artículo no se ha pretendido la ordenación de las pátinas o piel de las rocas y tampoco de las costras de alteración, ambas pueden estar presentes en las discontinuidades del macizo rocoso como un rasgo distintivo básico. Nuestro objetivo es enlazar algunas reflexiones esenciales a manera de sugerencias basadas en el ámbito de su formación, ya con un ambiente oxidante o bien anaeróbico, que permita un reconocimiento coherente, no una ordenación sistemática, y aportar distinciones entre pátinas y costras.

Las discontinuidades del macizo rocoso pueden presentar una costra de alteración o un relleno (Bieniawski, 1976 y González de Vallejo *et al.* 1999) que tiene que ver con el desplazamiento de fracturas o bien con la presencia de fluidos y minerales.

Tito de la Cuenca del Guadiato.

El depósito está condicionado por la rugosidad y porosidad, y se forma desde un entorno exterior de la roca hacia el interior, es decir en la superficie de la roca hacia dentro, cubriendo la rugosidad y así las asperezas se suavizan por el precipitado de sales. También se puede completar el relleno con costras dispuestas de forma paralela y simétrica, que se adaptan y alteran los labios o bordes de la discontinuidad (figura 1).

Las rocas y los útiles prehistóricos enterrados pueden desarrollar hidrólisis de los feldespatos a arcillas –que absorben cationes–, debido a alta humedad del terreno, pero también los hidróxidos metálicos migran hacia el exterior de la roca originando la pátina (figura 2) y a partir de la formación de esta piel de la roca el proceso de alteración interna disminuye por la impermeabilización de la pátina, y ello además no disminuye o aplana la rugosidad externa.

Se trata de un sistema de equilibrio y cuando una roca vuelve a unas condiciones aeróbicas podrían tener lugar los procesos de alteración, sobre todo con la costra o relleno de las discontinuidades debido a los periodos cíclicos de humedad-sequedad (figura 3) que contribuyen al envejecimiento de las rocas. Así es importante la degradación de las rocas de edificios en ambientes urbanos (Grossi *et al.* 1998).

Figura 1. Costra que se adapta a la discontinuidad de forma paralela.

METODOLOGÍA

En el terreno la existencia de acidez y la presencia de sales tan sólo precisan una humedad higroscópica para que el terreno se convierta en un electrolito de oxidación, también es conocida la electroósmosis o consolidación inducida donde el frente acido H+ drena la humedad hacia la superficie por adsorción al aumentar la tensión efectiva con una presión de poro nula o negativa. Ello puede aprovechar un previo desplazamiento osmótico del terreno por condiciones saturadas con presión de poro positiva y así disminuye la tensión efectiva con pre-roturas laterales que desarrollan manchas de óxidos metálicos o pátinas.

La piel de la roca o pátina que impregna la roca se forma generalmente en un ambiente de reducción anaeróbica y donde un cierto contenido en óxidos migra desde dentro de la roca hacia el exterior, fuera de la discontinuidad y no altera sus labios o bordes, así como una difusión en baja permeabilidad sin zonación interna, a manera de transpiración que da protección, las pátinas van a manchar las paredes de las discontinuidades con tonalidades pardas, rojizas o negras (figura 4), también la superficie exterior o el caso de ciertas discontinuidades cerradas que no han llegado a moverse presentan escalones de pre-rotura que configura su rugosidad en el macizo rocoso, pequeñas pre-roturas llamadas "pelos" son debidas a la liberación de tensiones en el arranque de la roca. La piel de la roca o pátina es la finísima mancha superficial de óxido de hierro y manganeso, sin nitrógeno, al existir humedad en condiciones anaeróbicas y que llega a proteger la roca, no altera sus labios y es característica de la discontinuidad.

La costra de alteración o relleno puede formarse por corrosión y reacción o por minerales depositados (figura 5), generalmente en ambiente oxidante, y desde fuera hacia el interior de la roca alterando los labios de la discontinuidad, teniendo que ver con los fluidos en contacto con la discontinuidad o superficie externa.

La oxidación supone una progresiva reacción de la roca con el ambiente y se adhiere una capa entre los labios alterados que es la

Figura 2. Pátina o piel de la roca, en útiles prehistóricos enterrados.

Figura 3. Condiciones aeróbicas que alteran la costra o relleno.

costra de alteración o corrosión ambiental y tiene un espesor de relleno que disminuye la rugosidad. Suele ser caolinización sin sulfato, precipitado duro y amorfo silíceo o salino, descamación superficial por alteración, y características de un proceso de alteración de fuera hacia dentro que altera los labios de la discontinuidad o los bordes de la roca.

La costra de alteración libera elementos débilmente unidos a las estructuras cristalinas como son: Na, Ca, K y Mg. También existen in-

Figura 4. La pátina manchando la pared de discontinuidades.

Figura 5. Costra o relleno formado por los minerales depositados.

Las rocas y los útiles prehistóricos enterrados pueden desarrollar hidrólisis de los feldespatos a arcillas –que absorben cationes–, debido a alta humedad del terreno, pero también los hidróxidos metálicos migran hacia el exterior de la roca originando la pátina.

tercambios o reemplazamiento de iones de minerales de la roca por otros o por grupos (OH–).

En algunas costras de las margas y arcillas de la provincia de Murcia no se han detectado reflexiones propias de fases de hierro o manganeso, pero en pátinas ferruginosas de espesor milimétrico adheridas a las rocas junto a goethita y hematites –baja cristalinidad– aparecen delgadas láminas cristalizadas de calcita y en los intersticios existen prismas de aragonito (Arana y Rodríguez, 2000).

La meteorización provoca una decoloración de la matriz de la roca favoreciendo su descomposición (Hoek *et al.* 1980,1981) y podría abrir las discontinuidades, también la humedad desarrolla meteorización esferoidal en rocas que liberan tensiones, además la dilatación del agua es mayor que la de la roca.

Los metales al pasar a iones liberan electrones, y el oxigeno disuelto reacciona con los electrones migrando, así se genera el ion hidróxido que se une a iones metálicos y se forma hidróxidos metálicos, el hierro y el manganeso son los elementos que conforman una mayor protección en la piel de las rocas (figura 6).

$$Fe(OH)2+O2+H2O > Fe2O3+2H2O$$

En terrenos ácidos: $O2+4H++4e- > 2H2O$

$$Fe+2H2O > Fe(OH)2+2H++2e-$$

Figura 6. Piel de la roca con presencia de óxidos de hierro.

Figura 7. Pátina constituida por elementos del interior de la roca matriz.

Figura 8. Pátina y costra, conjuntamente en la discontinuidad con escalones pre-rotura.

Figura 9. Zona de cizalla con relleno de serpentinitas y estrías de fricción.

Análisis realizados por el grupo Seminario Antonio Carbonell (Daza, 2001) con microscopía electrónica de barrido EDAX y otros sobre pátinas y en labios de roca intacta-sana de bloques de Arenisca Calcárea (Mioceno Superior) muy reactiva al agua y al depósito de SO2 con la velocidad de oxidación –las sales pueden migrar al interior–, las muestras se han encontrado a pequeña profundidad encima del nivel freático y han registrado unas pátinas formadas por elementos químicos procedentes del interior de la roca (figura 7), posee también elementos mínimos procedentes del exterior por lixiviación de minerales metálicos. La pátina es de óxidos de Fe, Mn y Al, con sulfatos complejos de Pb y Sr de reacción lenta. Los elementos químicos que presentan porcentajes en la pátina del doble valor que en labios de roca intacta son: C, Si, Fe, Na, Ta. Otros elementos no varían en la pátina y en labios de roca intacta son: O, Al, S, Mg, K, P, Ti, Mn. También en las pátinas se registran elementos mínimos de influencia del entorno: Pb, Sr, Ni, Cu, Co y La.

OBSERVACIONES

No es fácil reflexionar sobre el proceso de interacción de las rocas para diferenciar la pátina de la costra, ya suelen darse conjuntamente en las discontinuidades (figura 8), así un argumento razonable para descartar la existencia de una pátina o piel de la roca y que sea reconocida como una costra por oxidación o bien de relleno por desplazamiento de falla (figura 9) es que se presenten modificaciones cromáticas de los labios de la discontinuidad o de los bordes de la superficie exterior de la roca. Entonces además el perfil de rugosidad que presentaba originalmente asperezas puede estar suavizado –aplanado– al existir un relleno en esta costra. Pero también puede darse la existencia de la rubefacción que podría confundirse con las manchas oscuras de óxidos metálicos correspondientes a la fina pátina o piel de la roca.

Las rocas en condiciones aeróbicas se meteorizan en un mayor o menor grado, ello conlleva la formación de una costra de alteración y no se formaría una pátina.

Desde dentro de la roca y hacia el exterior, por migrado, se conforman las pátinas que hemos llamado "la piel de las rocas", que no presenta cambio de color en los labios de discontinuidades o superficie externa, y que supone la protección de la alteración en unas condiciones de reducción anaeróbica. ■

La meteorización provoca una decoloración de la matriz de la roca favoreciendo su descomposición (Hoek *et al.* 1980,1981) y podría abrir las discontinuidades, también la humedad desarrolla meteorización esferoidal en rocas que liberan tensiones.

REFERENCIAS

• Arana Castillo R. y Rodríguez Estrella T. (2000). Termalismo y Mineralogenésis en el sondeo del Saladillo (Mazarrón, Murcia). 1º Simposio Ibérico sobre Geología y Termalismo de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (Ed. Josep Mata–Perelló). ISBN: 84–88894–31–7. p. 121–126. D'Arenis de Mar.

• Bieniawski Z.T. (1976). Rock Mass Classification in Rock Engineering. Exploration for Rock Enginnering Proc. Of the Symp. (ed. Z.T. Bieniawski). Vol. 1, p. 97–106. Cape Town, Balkoma.

• Daza Sánchez A. Investigación de la pátina de las esculturas de la antigüedad, Casa–Museo "Posada del Moro" Torrecampo (Córdoba). Obra Cultural del grupo de empresas PRASA. Córdoba. 2001, agosto, Boletín nº4, El museo. p. 15–17. DL: CO 5911998.

• González de Vallejo L., Ferrer Gijón M., Ayala Carcedo F., Capote del Villar R., Beltrán de Heredia F., Encinas Sánchez I. y Sada Allo C.: Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 1999, 109 p. ISBN: 84–7840–387–6.

• Grossi C.M., Estebert R.M. y Díaz–Pache F.: Degradación y durabilidad de materiales rocosos de edificación en ambientes urbanos. Materiales de Construcción, 1998, Oct–Dic., Vol. 48, nº 252. Instituto Eduardo Torroja. CSIC. Madrid.

• Hoek E. and Bray J.W.. Rock Slope Engineering. 3rd Ed., London, Institution Mining and Metallurgy, 1981, 358 p. ISBN: 0 900488 573.

• Hoek E. and Brow E.T. Underground Excavations in Rock. London, Inst. Min. Metall., 1980, 527 p. ISBN: 0 900488 54 9.

• Torrijo Echarri F.J., Mandado Collado J. y Bona Artazos M.E. (2004). Modelización genética de nódulos y concreciones, propuesta de clasificación. Estudios Geológicos. Vol. 60 (3–6). p. 95-110. Museo Nacional de Ciencias Naturales. Madrid.

NORMAS PARA LA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS EN LA REVISTA

1. Los artículos enviados para su publicación deberán ser inéditos. No obstante si hubieran sido publicados en algún encuentro científico o profesional deberá indicarse tal circunstancia, a fin de que el comité editorial valore la idoneidad de su publicación.

2. El presentación del artículo será en formato digital en dos tipos de archivo: uno en formato .pdf donde el autor habrá maquetado a su gusto el artículo con la posición de las fotografías, tablas e ilustraciones que lo acompañan; y otro donde irá el texto en formato Word editable. Las fotografías, tablas o ilustraciones, irán en formato .jpg.

3. El título del artículo no sobrepasara los 60 caracteres, contando los espacios. Se podrá hacer un subtítulo de igual extensión. Se valorará positivamente que se adjunte la traducción al inglés del título y el subtítulo.

4. Tras el titulo deberá adjuntarse el nombre y apellidos del autor/autores, con la titulación, empresa o entidad donde trabaja y datos de contacto: teléfono y e-mail. Los datos de contacto no serán publicados en la revista y únicamente son por si el comité editorial debe ponerse en contacto con el/ los autor/es.

5. El artículo irá precedido de un resumen de entre 50 y 150 palabras con una relación de palabras clave. Se valorará positivamente que se adjunte la traducción al inglés.

6. La extensión del texto del artículo no será superior, sin fotografías ni tablas, o ilustraciones, a los seis páginas DIN A4, con tipo de letra Arial 12 y márgenes: superior 2,5 cm; inferior 2,5 cm; derecho 3 cm.; izquierdo 3 cm. El espaciado será 1,5.

7. Si el artículos va dividido en apartados, éstos tendrán un titulo apropiado al contenido, serán concisos, menos de 60 caracteres contando los espacios, y se harán en Arial 14 negrita.

8. Las referencias bibliográficas en el texto se harán con los apellidos del autor y año de publicación. En caso de varios autores se indicará solo el nombre del primero seguido de “et al”.

9. La bibliografía se presentará al final en orden alfabético, indicando apellido e inicial del nombre de cada autor, año, título del trabajo, publicación, número de volúmenes: primera-última página.

10. Los trabajos se acompañarán de, al menos, tantos documentos gráficos (fotografías, tablas, ilustraciones,…), como páginas tenga el artículo. Los pies de fotos, tablas e ilustraciones, estarán perfectamente identificados. En el caso de las tablas, las unidades y símbolos serán los del Sistema Internacional.

11. Los documentos gráficos tendrán la calidad suficiente para su publicación, y no deberán requerir una reducción mayor del 50% del tamaño que se acompañe.

12. Los artículos se presentarán vía Colegio Territorial al que pertenezca el/los autor/es. En caso de pertenecer a más de un colegio, bastará con la presentación en uno de ellos.

13. Los artículos publicados quedarán en propiedad del Consejo. Los no publicados se devolver al colegio de procedencia.

14. Los autores, con la presentación del artículo para su publicación, aceptan las correcciones de textos y revisión de estilo que decida el comité editorial, así como lo dispuesto en las presentes normas.

CONSEJO GENERAL DE COLEGIOS OFICIALES DE INGENIEROS TÉCNICOS DE MINAS Y GRADOS EN MINAS Y ENERGÍA

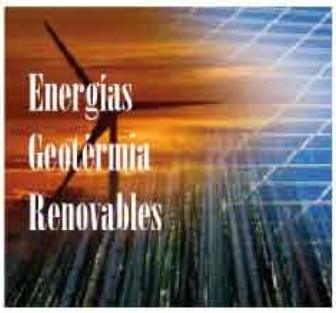
www.consejominas.org

VISADO PROFESIONAL

- Seguridad para la sociedad
- Garantía de calidad
- Cobertura RC
- Contra el intrusismo

¿Aún no sabes qué vas a estudiar?

GRADO DE MINAS Y ENERGÍA



Medio Ambiente, Demoliciones Aguas subterráneas, Administraciones Públicas, Prevención de Riesgos, Geotécnia, Industria petrolera, Seguridad

¿Te atreves?

¿Te interesa?

ESCANÉAME

¡UNA PROFESIÓN QUE MIRA AL FUTURO!

Con muy baja tasa de desempleo

Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Técnicos de Minas y Grados en Minas y Energía

Visita nuestro video explicativo
https://youtu.be/Uz21-ARfDFE