

Aprovechamiento de las aguas de mina en la Cuenca Central Asturiana como recurso energético. Aplicación al embalse minero Barredo-Figaredo

Tesis Doctoral

Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo, 2010

Autor: D. José Santiago Jardón Palacio

Directores: D. Jorge Loredo Pérez, D^a. Almudena Ordóñez Alonso y D. Fernando Pendás Fernández

RESUMEN

En la Cuenca Central Asturiana, como resultado de la minería del carbón, se ha formado un nuevo “acuífero” con una triple porosidad similar a la de los acuíferos carbonatados kársticos, creándose, en sus antiguas labores, un “embalse subterráneo”. En este estudio se determina su aprovechamiento hídrico y energético, eligiendo como modelo el embalse minero subterráneo formado por los antiguos pozos Barredo y Figaredo, una vez llevado a cabo el proceso de inundación de los mismos. Tras un estudio climático, y estimada la recarga anual del embalse, se muestra la relación entre dicha recarga y la lluvia útil, definiendo el modelo hidrogeológico conceptual que permite, a partir del ajuste de volumen de huecos estimados a partir de la producción histórica de las minas y el volumen de agua infiltrada durante la inundación, calcular la capacidad del embalse. La caracterización físico-química de las aguas del embalse permite definir las como aptas para su aprovechamiento hídrico tras un tratamiento tipo A3 y su cercanía a la red de abastecimiento de agua del valle del Caudal facilita la conexión de su desagüe con el sistema de abastecimiento de la zona central de Asturias, al que puede llegar a aportar 4,1 Hm³/año o incluso 8,4 Hm³/año, ampliando su recarga durante seis meses del año con un caudal de agua del río Aller de 130 l/s.

El aprovechamiento energético de estas aguas mediante la utilización de bombas de calor agua-agua es óptimo, porque la alta capacidad de bombeo (que permite unos elevados gastos máxicos del agua que circula por el evaporador de las bombas de calor), unida a los altos COP obtenidos por su temperatura media de 20°C, derivan en una gran capacidad térmica del embalse. Este aprovechamiento energético se plantea mediante dos redes de calor, una de baja temperatura, a 35°C, para suministro de calefacción y otra de muy baja temperatura, a 20°C, para aprovechamiento directo de diversos usuarios que precisan sólo calefacción o calefacción y refrigeración simultáneas. Se estudia la rentabilidad de su uso y de la renovación de los antiguos sistemas de emisores térmicos por otros más eficientes energéticamente, al mismo tiempo que se muestra la gran reducción de las emisiones de CO₂. Asimismo, la devolución al embalse minero de parte de estas aguas permite su aprovechamiento para generación eléctrica mediante microturbinas, consiguiendo un interesante resultado final como central de bombeo que logra mejorar, substancialmente, los resultados económicos del aprovechamiento energético y la disminución de las emisiones de CO₂.

Finalmente, el traslado de los resultados de esta Tesis al resto de los futuros embalses mineros de HUNOSA, en función de la razón de su semejanza, supone un potencial hídrico de 40 Hm³/año y una capacidad de suministro energético a la zona central de Asturias cercana a 260 GWh/año.

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

Teniendo en cuenta los caudales desaguados históricamente de las labores del Grupo HUNOSA, se puede establecer que éste dispone de un caudal mínimo anual de agua, en la zona central asturiana, de 36,8 Hm³, el cual, sumado al correspondiente a pozos no contemplados en esta estadística, como Olloniego o Lieres, puede alcanzar los 40 Hm³/año (Jardón *et al.*, 2007), cifra que supera a la capacidad conjunta de los embalses de Tanes y Rioseco (Consortio de aguas, 2010a).

Por otra parte, la temperatura media de estas aguas, en torno a 20°C, las define como un recurso geotérmico de muy baja temperatura (< 30°C). Junto con su aprovechamiento hídrico, el agua de mina podría ser empleada como fuente de energía térmica, ya que, como consecuencia de la elevación de los costes de la calefacción y refrigeración convencional, comienza a verse viable el aprovechamiento de este agua como recurso energético, suministrando calor mediante el uso bombas de calor a pie de mina y redes calóricas de distribución de baja temperatura, o bien mediante redes térmicamente aisladas de conducción del agua de mina cerca de los centros de consumo, donde se instalarán las bombas de calor que la aprovecharán.

Este estudio se ceñirá al embalse subterráneo formado por las labores mineras de los pozos Figaredo y Barredo, ambos conectados y en los que ha cesado la producción, aunque se podría aplicar esta metodología a los distintos embalses mineros del conjunto de pozos abandonados en las cuencas del Caudal y el Nalón, dada su proximidad a los núcleos de población de la cuenca (figura 1).

Los pozos Figaredo y Barredo se encuentran situados en el sector central de Asturias, en la cuenca del río Caudal y sus afluentes los ríos Aller y Turón, próximos a la localidad de Mieres como principal núcleo urbano, y en una zona eminentemente industrial, donde la minería de carbón destacó como principal actividad durante la mayor parte del siglo pasado hasta estos últimos años, siendo, por tanto, representativos del conjunto de pozos de HUNOSA. Además, la localización del pozo Barredo

en el centro de un núcleo residencial, del Campus de Mieres (con sus edificios de investigación, docencia, de servicios y deportivos) y en la proximidad de un polígono industrial y del futuro Hospital Comarcal de Mieres, así como la futura ubicación de un Parque Tecnológico en el entorno del pozo Figaredo, motiva su elección como focalización de un estudio generalizable y trasladable homotéticamente a cualquier otro tipo de embalse minero de los pozos de la Cuenca Central Asturiana.

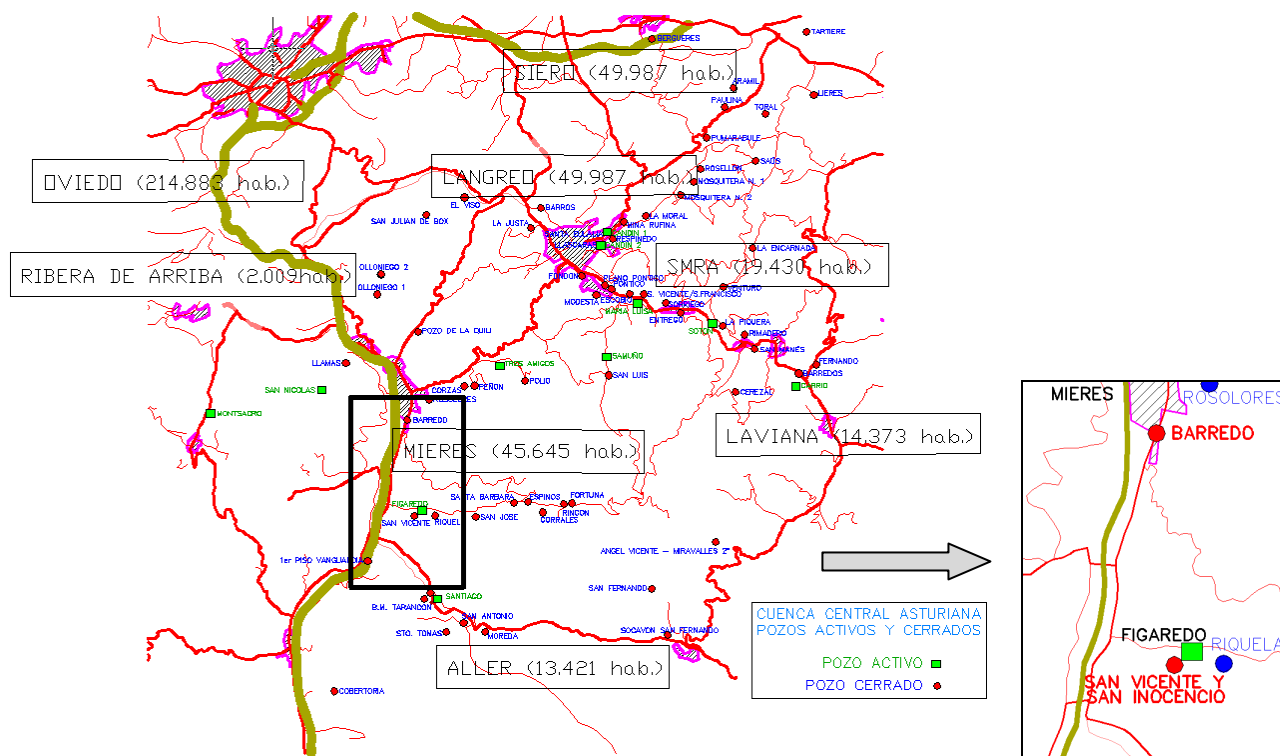


Figura 1. Situación de los pozos de HUNOSA en relación a los principales núcleos de población de la Cuenca Central Asturiana. Detalle de situación de los pozos Barredo y Figaredo

El objetivo final de esta Tesis es determinar la factibilidad técnica de aprovechar las aguas almacenadas en este embalse minero, alimentado anualmente con una infiltración cercana a los 4 Hm³, definiendo el modelo hidrogeológico, su potencial hídrico y térmico y soluciones prácticas y viables de desarrollar estos potenciales.

II. LAS LABORES MINERAS DE LA CUENCA CENTRAL ASTURIANA COMO EMBALSES SUBTERRÁNEOS.

La Cuenca Carbonífera Central Asturiana (en adelante CCC), con explotaciones mineras desde hace más de 200 años, es una de las zonas mineras más importantes de España (el mayor afloramiento carbonífero de la península), habiendo llegado, en los años 90 del pasado siglo, a contribuir con el 70% del total de la producción de carbón del país. Con una extensión aproximada de 1400 km², se encuentra ubicada en la zona centro-meridional del Principado de Asturias.

La principal incidencia, por su irreversibilidad, de los trabajos mineros, ha sido la distorsión del flujo natural del agua y la formación de un nuevo acuífero en el entorno de influencia de las explotaciones. Cuando se abandonaron los trabajos de minería y cesó el drenaje se inundaron los pozos formándose un embalse minero subterráneo.

II.1. Hidrogeología.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la CCC se encuentra dentro de la denominada "Unidad Paleozoica" (figura 3), zona formada por materiales impermeables o muy poco permeables que, aunque pueden dar lugar a pequeños acuíferos, no dan lugar a sistemas de importancia. Las principales explotaciones de carbón se localizaron de forma relevante en la serie productiva que (con la excepción de un nivel de calizas de potencia inferior a 6 m, en la base del paquete Generalas) está constituida por una alternancia de pizarras, areniscas, conglomerados y capas de carbón, materiales que pueden considerarse de permeabilidad muy baja o baja por fisuración. Existen, además, materiales de permeabilidad variable por porosidad intergranular, constituidos predominantemente por depósitos cuaternarios (desde lutitas hasta gravas) situados en las zonas bajas de los valles que, aunque no se consideran acuíferos importantes, pueden estar conectados hidráulicamente con las labores mineras. En la llanura aluvial en la que se ubica el Pozo Barredo, estos sedimentos presentan espesores no superiores a los 10 m, estando situado el nivel freático en torno a los 5-7 m de profundidad.

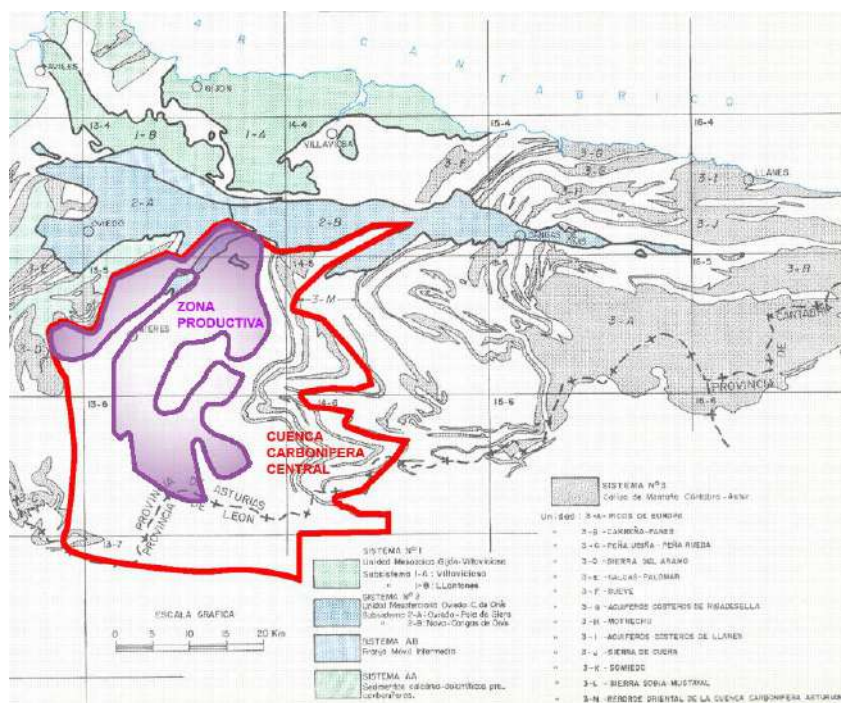


Figura 3. Mapa de situación de los sistemas acuíferos de Asturias (IGME, 1984), con la ubicación de la CCC y su zona productiva.

II.2. Incidencia de la minería.

La minería comenzó mediante galerías en capa, produciéndose un deshulle desde el nivel del valle hasta el afloramiento de las capas en superficie. Agotado el yacimiento, se continuó su explotación mediante pozos verticales o inclinados, pero aunque se intentó dejar macizos de protección sin explotar de hasta 50 m, no se respetaron debidamente y resultaron, en general, inútiles para evitar la infiltración, exigiendo el mantenimiento de un intenso bombeo de desagüe. Como resultado, la superficie piezométrica del acuífero sufrió un descenso progresivo hasta las cotas más bajas de drenaje, siendo en esta primera fase de minería de montaña, el transversal general más bajo la referencia del nivel base de drenaje, provocando un lento y paulatino retroceso de la superficie piezométrica inicial hacia los frentes de avance. En las explotaciones mediante pozos, el nivel base de drenaje serán las nuevas galerías construidas, desplazándose hacia la planta más profunda. Por otra parte, los efectos mecánicos de la subsidencia minera produjeron cambios en los valores de porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento de los materiales, que aumentaron notablemente respecto a sus valores iniciales, como puede verse en la tabla 1.

Porosidad (%)		Coeficiente de Almacenamiento		Permeabilidad (m/día)		Transmisividad (m ² /día)	
Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	>10	10 ⁻³ -10 ⁻⁴	10 ⁻¹	10 ⁻¹	100	10	1000

Tabla 1. Variación de los parámetros hidrogeológicos a consecuencia de las labores mineras en la zona del Aller (García-Fuente, 1996)

II.3. Formación del embalse minero.

Partiendo de una situación inicial antes de la minería con únicamente acuíferos de pequeña entidad en arenisca de un sistema multicapa (Pendás et al., 2002), se llega a una situación final de formación de un hueco por extracción del carbón y fracturación del macizo, que constituye un nuevo "acuífero" con una triple porosidad (intergranular, por fracturación y huecos de galerías y capas explotadas) similar a la de los acuíferos carbonatados kársticos (Pendás y Loredo, 2006). En estas condiciones, si la descarga-desagüe se anula, la recarga por infiltración provoca la inundación de los huecos mineros y se forma un *Embalse Minero Subterráneo*.

La cuenca de afección del embalse minero subterráneo se ha definido como aquella tal que sólo aquella parte de la lluvia útil que es infiltrada en su interior recargará el embalse minero de manera relevante. Para su delimitación se ha considerado la extensión de las labores de minería de montaña y en profundidad en la zona, las divisorias topográficas, los afloramientos de los paquetes explotados y los bordes de las cubetas de hundimiento y fisuración, calculadas de acuerdo con la profundidad de las labores y los ángulos de incidencia de las mismas (Rambaud et al., 1986). Finalmente, la superficie de la cuenca de afección del embalse Barredo-Figaredo se ha estimado en 16,41 km² (figura 3).

III. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO. FUNDAMENTOS. EXPERIENCIAS.

En este apartado de la tesis se mencionan aquellos sistemas que realizan un aprovechamiento energético del agua, centrándose luego exclusivamente en el uso de la bomba de calor para el aprovechamiento de su energía calorífica.

El calor fluye de forma natural desde las altas a las bajas temperaturas (segundo principio de la termodinámica); sin embargo, es técnicamente posible forzar el flujo de calor en la dirección contraria, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. Para ello se usan bombas de calor, que hacen exactamente lo que su nombre indica: bombean calor, es decir pueden transferir el calor (bombearlo) desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura (foco frío), tales como aire, agua o el propio terreno, hacia las dependencias interiores que se pretenden calentar (foco caliente), o bien emplearlo en procesos que precisan calor, en la edificación o la industria. Se aprovechan así fuentes de energía de baja entalpía.

Tras describir los principios físicos de su funcionamiento y los principales tipos de bombas de calor, se concluye la elección de bombas de calor de compresión mecánica. De estas bombas se describe su funcionamiento y se justifican las ecuaciones termodinámicas del evaporador, compresor, condensador y de la válvula de expansión.

Una vez vistas las distintas clasificaciones de las bombas de calor de compresión mecánica, y ya centrándose en las bombas de calor geotérmicas agua-agua y sus distintas disposiciones, se detallan las características de las bombas de calor aplicables al aprovechamiento del agua de mina que son aquellas que funcionan con un sistema de circuito abierto (open-loop) y con disposición no reversible, bien de forma única (calefacción o refrigeración) o de forma simultánea (calefacción y refrigeración); en este caso el foco frío es el agua de mina y el foco caliente el agua de los circuitos de calefacción.

Se define la eficacia de la bomba de calor y los distintos enfoques de los coeficientes de eficacia (COP): teórico, práctico, global de instalación, medio estacional y global en energía primaria (PER-Primary Energy Ratio). Se desarrollan las ecuaciones de la potencia calorífica aprovechada y de la energía calorífica útil, completando el estudio teórico con el análisis de los distintos fluidos refrigerantes utilizados y las ventajas económicas y ambientales de la bomba de calor.

Se hace un resumen de utilización mundial de la bomba de calor y en España, tras el que se describen las más relevantes aplicaciones de la bomba de calor utilizando el agua de mina como fuente fría, finalizando con una descripción detallada de dos aplicaciones de la bomba geotérmica de calor agua-agua de especial interés para este estudio; la experiencia del hospital regional Deventer (Holanda) (De jong gortewaker algra, 2010; Fraunhofer Institute for Solar Energy, 2005), con bombas de calor para calefacción y refrigeración utilizando el agua de dos acuíferos a 15°C y 7°C y la experiencia del Edificio de la Autoridad Portuaria de Valencia (Torrero y Torrero, 2005), utilizando un sistema de funcionamiento simultáneo para calefacción y refrigeración.

También se menciona la posibilidad del uso de minicentrales hidráulicas para el aprovechamiento de su energía mecánica, en aquellos casos en que sea aconsejable la devolución al pozo del agua bombeada, tras pasar por los intercambiadores de calor, describiendo los fundamentos técnicos de estas minicentrales y las ecuaciones de producción en función de las horas de funcionamiento, el salto neto y el caudal de agua, así como los criterios que deben utilizarse para la selección del tipo de turbina empleada, fijando, finalmente, el tipo de turbina más adecuado para un funcionamiento de máxima flexibilidad con caudales mínimos y mayores alturas (Penche C., 1998; MHyLab, SCPH, ESHA, 2005; RETScreen® International, 2007).

IV. EL EMBALSE MINERO BARREDO-FIGAREDO. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.

Para su estudio se definen, como marco geográfico, las cuencas hidrográficas de los ríos Turón y Caudal, así como el marco geológico de la zona de estudio, encuadrada en la hoja 53 del Mapa Geológico Nacional (MAGNA-IGME 1975).

IV.1. Síntesis minera.

Las explotaciones que pueden afectar a la infiltración y recarga del embalse minero Barredo-Figaredo corresponden tanto a minería de montaña (Mina Mariana, Juan Carro, Mina Baltasara -Sector Mariana-, Ortiz Sobrinos y Minas de Figaredo) como subterránea (Pozo Barredo y Pozos San Vicente y San Inocencio -Minas de Figaredo-). Para definir el comportamiento del embalse minero Barredo-Figaredo, se ha consultado abundante documentación, entre la que destacan 59 planes de labores conservados en Archivos históricos (desde 1970 hasta el cierre de los pozos), numerosos estudios geológicos, hidrogeológicos y mineros, inventarios de recursos y multitud de informes.

Se han estudiado las conexiones de las labores de Barredo-Figaredo con explotaciones colindantes: Figaredo-San José, San José-Santa Bárbara, San José-Santiago y la posible comunicación por circulación de agua de tipo fisural entre Minas de Figaredo y el pozo plano de Vanguardia y sus grupos, ubicados en la parte inferior del valle del Aller, en su zona más occidental, así como con el cauce del río Aller en esa misma zona (Ochoa 1994). De este estudio, complementado con los datos del proceso de inundación de los cuatro pozos Santa Bárbara, San José, Figaredo y Barredo, desde el 01/08/2008 hasta el 16/07/2009, se ha concluido que el embalse minero Figaredo-Barredo se puede considerar como una unidad hidrogeológica aislada y su cuenca de afección, aunque localizada dentro de la Cuenca minera Caudal-Turón, es independiente de las que afectan a las labores de otros pozos o minas de montaña de la misma. En la figura 3 se muestra la cuenca de afección

hidrológica del embalse minero sobre el mapa geológico de superficie, mostrando, además, las labores de ambos pozos y el detalle de la inclinación del sinclinal de Barredo.

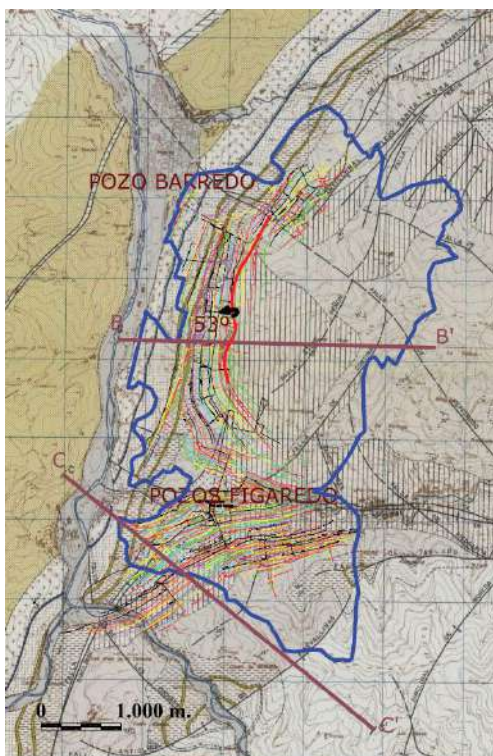


Figura 3. Límite de la cuenca de afección del embalse Barredo-Figaredo y labores de ambos pozos.

IV.2. Climatología.

Teniendo en cuenta los registros de 31 estaciones meteorológicas, abarcando un área de unos 1500 km², con una densidad de pluviómetros de uno por cada 48 km², se hizo un estudio tras el que se obtuvieron, para el periodo 1970/71-2007/08, mapas de isoyetas, isotermas, y evapotranspiración potencial y real. Particularizando el estudio para la cuenca de afección del embalse minero Barredo-Figaredo, se calculó una precipitación media de 1.127 mm/año, equivalente a 587 l/s y una lluvia útil media de 527 mm/año, equivalente a 300 l/s.

IV.3. Estudio hidrológico.

La cuenca hidrológica considerada, que abarca además de la cuenca natural del río Turón, el área de afección de las labores mineras existentes en su valle, tiene una superficie total de 57,15 km² (figura 4 izq; Ordóñez *et al.*, 2009). Para determinar el caudal del río Turón se seleccionaron tres puntos de aforo, antes de su desembocadura al río Caudal, aguas arriba y abajo de las labores mineras, con el fin de evaluar la influencia de las mismas sobre el caudal del río (figura 4 izq.). El primero (1), aguas arriba de las labores mineras; el segundo (2), aguas abajo de las labores mineras de S. José y Santa Bárbara y aguas arriba de las labores de Minas Figaredo, a la entrada de la cuenca de afección del embalse minero Barredo-Figaredo; el tercero (3) aguas abajo de las labores de Minas Figaredo, a la salida de la cuenca de afección.

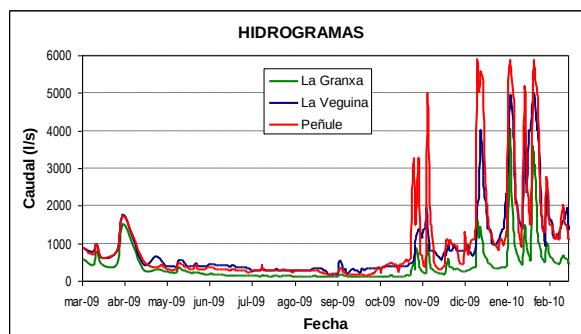


Figura 4. Izq.: Cuenca del río Turón considerando el área de afección de las labores mineras existentes en su valle; se indican los puntos de aforo (con escalas limnimétricas) y las subcuencas asociadas. Dcha.: Representación conjunta de los hidrogramas de las tres secciones de aforo.

La representación conjunta de los hidrogramas de las tres secciones de aforo revela una distribución a lo largo del tiempo análoga para los tres casos, coincidiendo las puntas de caudal con episodios de precipitación intensa, como puede verse en la figura 4 dcha. Sin embargo, llama la atención que el caudal en la sección de aforo 3, situada aguas abajo de la zona más minada del pozo Figaredo, es, en general, menor que en la sección de aforo 2, situada aguas arriba del pozo Figaredo, pese a que su cuenca de aporte es casi un 30% superior a la de ésta. Esta diferencia queda enmascarada en los episodios tormentosos que generan puntas de caudal, pero, en general, corresponde a un promedio de 61 l/s, es decir unos 5300 m³/día, que son infiltrados en esta tercera subcuenca de afección de los pozos Barredo-Figaredo, más minada y por tanto más fracturada, aunque proceden de la escorrentía de las subcuencas aguas arriba de la misma.

IV.4. Formación del embalse minero Barredo-Figaredo.

El 01/08/2008 se comenzó la inundación de los pozos de Minas Figaredo y el 05/09/2008, al alcanzar la cota inferior del pozo Barredo, comenzó la de este pozo, finalizando el 8-02-2010 a la cota +150 m.s.n.m. (70 m del brocal del pozo Barredo), cota definitiva de estudio a los efectos del aprovechamiento hídrico y energético de este embalse minero.

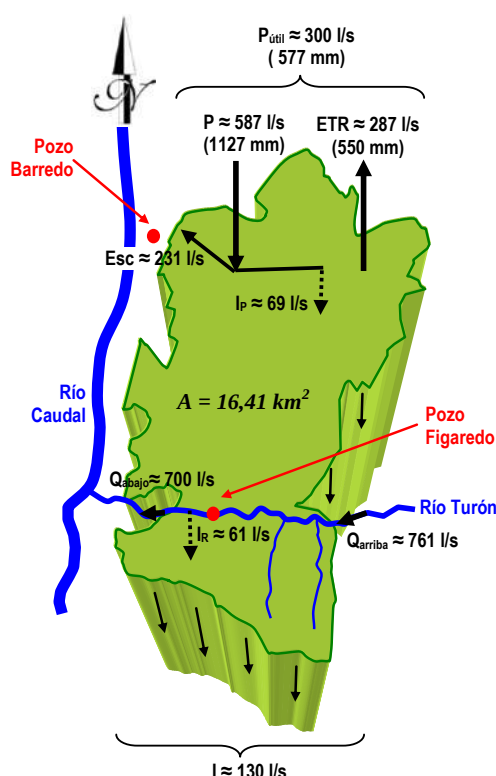
A partir de los datos históricos de desagüe de ambos pozos, se obtuvo la recarga por infiltración y comparando este desagüe diario con los datos de lluvia útil diaria del mismo periodo, se dedujo que el desfase entre precipitación e infiltración para el conjunto del embalse minero Barredo-Figaredo es de 19 ± 5 días. Adicionalmente, se comprobó que se mantiene un cierto bombeo en los periodos secos, indicando que existe un aporte “constante” de infiltración, además del procedente de las precipitaciones, y que corresponde, como ya se ha indicado, a la infiltración diaria de unos 5300 m³ (61 l/s) de agua del río Turón, en la zona más fracturada a su paso por las labores de Figaredo. Se ha buscado la expresión que más fielmente relaciona la lluvia útil diaria con la infiltración al interior del embalse minero Barredo-Figaredo, llegándose a la siguiente expresión, coherente con la anterior y que será de gran utilidad para estimar el llenado de volumen de huecos a partir de la infiltración de precipitación durante la inundación:

$$\text{INFILTRACIÓN (m}^3/\text{día)} = 0,23 \cdot \text{LLUVIA ÚTIL (m}^3/\text{día)} + 5300 \text{ (m}^3/\text{día)}$$

Para comprobar la fiabilidad de la anterior expresión, se ha aplicado para calcular la infiltración diaria del periodo 2002-2007 y, sumada por meses, se ha comparado con los datos de bombeo mensual de los que se dispone, obteniéndose (tras desechar algunos valores erróneos), un ajuste muy aceptable entre infiltración real y calculada (coeficiente de correlación = 0,8). Cabe indicar, no obstante, que se trata de una expresión simplificada, por lo que, si bien permite hacer aproximaciones de los valores reales, en algún caso concreto estos pueden distar de los calculados.

IV.5. Modelo hidrogeológico conceptual del embalse minero Barredo-Figaredo.

Para realizar el balance hídrico de la cuenca se tiene en cuenta que las entradas de agua a la misma han de coincidir con las salidas, es decir (considerando que para periodos largos de tiempo no existe variación significativa en el almacenamiento): Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía superficial + Escorrentía subterránea.



Para la realización del modelo conceptual de balance hídrico para un año medio (figura 5), en primer lugar se considerará como entrada la Precipitación (P), que en el estudio climático se estimó en 1127 mm, es decir, 587 l/s en la cuenca de afección de los pozos Barredo-Figaredo, de 16,41 km² de extensión. También fue calculada en ese estudio la Precipitación útil (P_{útil}) en 577 mm (300 l/s para esta cuenca), lo que significa que 287 l/s (550 mm) se pierden hacia la atmósfera como Evapotranspiración real (ETR). Según se ha deducido anteriormente, para un año medio, el caudal evacuado por los pozos Barredo y Figaredo en conjunto, es de 130 l/s y este será el caudal de Infiltración (I) a las labores mineras del embalse Barredo-Figaredo.

Por otra parte, en la realización de los aforos del río Turón aguas arriba y abajo de la cuenca de afección se dedujo que éste reducía su caudal un valor medio de 61 l/s, que se infiltraban hacia el interior de las zonas minadas (I_R), manteniendo el río un caudal medio de 700 l/s, a la salida de la cuenca. Así, la lluvia útil genera, por una parte, unos 69 l/s de Infiltración (I_L), que se suman al aporte de agua del río infiltrada (I_R) para dar lugar a los 130 l/s de Infiltración total a las labores subterráneas y por otra, Escorrentía subsuperficial (Esc), que corresponde a unos 231 l/s y que incluye el agua que tras haberse infiltrado en las labores de montaña nunca llega a infiltrarse en profundidad, así como la escorrentía general de la cuenca que subsuperficialmente drena hacia el río Caudal. Si, como se ha obtenido anteriormente, la lluvia útil anual en la cuenca es de 300 l/s, la infiltración de agua al interior de las labores subterráneas es de 130 l/s, valor que coincide con el caudal medio anual bombeado al exterior de las mismas, durante su periodo de actividad.

Figura 5. Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la cuenca de afección de los pozos Barredo-Figaredo, para un año medio.

IV.6. Capacidad del embalse minero Barredo-Figaredo.

La capacidad del embalse minero vendrá definida por los huecos mineros residuales. Estos huecos pueden clasificarse en: huecos de las cañas de los pozos de extracción, huecos en los embarques y lazos de maniobra de cada planta, con revestimiento hormigonado; huecos residuales en las galerías de acceso a los campos de explotación, una vez afectadas por los fenómenos de convergencia y huecos residuales en los talleres de explotación de carbón. El hueco residual de las cañas, embarques y galerías fue fácil de calcular a partir de los datos de los planos de labores, aplicando a las galerías criterios de convergencia generalizadamente reconocidos. Sin embargo la determinación del hueco útil residual de los talleres de explotación presentaba mayor dificultad dado que sería el resultante de multiplicar el volumen deshullado por dos coeficientes diferentes, según el tipo de explotación (hundimiento o relleno), lo que supone una reducción porcentual del hueco inicial abierto. Se decidió, siguiendo a Degas *et al.* (2003), comparar los resultados obtenidos mediante el cálculo del volumen de los huecos por el método de los coeficientes de capacidad de agua (Rogoz, 1978) y por el método volumétrico, con la información facilitada por un experto de reconocido prestigio en mecánica de rocas (B. Celada, comunicación oral, 2009) y la de un experto en subsidencia minera y gran conocedor de las explotaciones asturianas de carbón (J. Toraño, comunicación oral, 2009). De esta comparación se concluyó tomar como coeficiente de reducción de los huecos iniciales de explotación, un 15% del hueco original explotado por relleno, y un 30% del hueco explotado por hundimiento. La estimación de los huecos así obtenida es imprecisa, por defecto, en las plantas superiores de ambos pozos, puesto que no se pudo acceder a los planes de labores más antiguos y por tanto no fue contabilizada su producción. Para contrastar estos valores y corregirlos en las cotas superiores, se realizó el cálculo de huecos a partir del volumen ocupado por la infiltración diaria y, como era de esperar, ambas curvas se ajustan bien en los niveles inferiores e intermedios (mejor conocidos en cuanto a su explotación) y difieren mucho (casi 1 Hm³) en los superiores, parte de cuya producción no había sido estimada. Esto permite validar el modelo, definir los coeficientes para el mejor ajuste de ambas curvas y deducir el volumen total de huecos del embalse minero para cada cota, incrementado el volumen de huecos en los niveles superiores de ambos pozos hasta hacer ajustar ambas curvas, como se ve en la figura 6 izq. Tomando como nivel máximo de inundación definitivo la cota +150 m.s.n.m., la capacidad del embalse minero Barredo-Figaredo es de 5,8 Hm³ (figura 6 dcha).

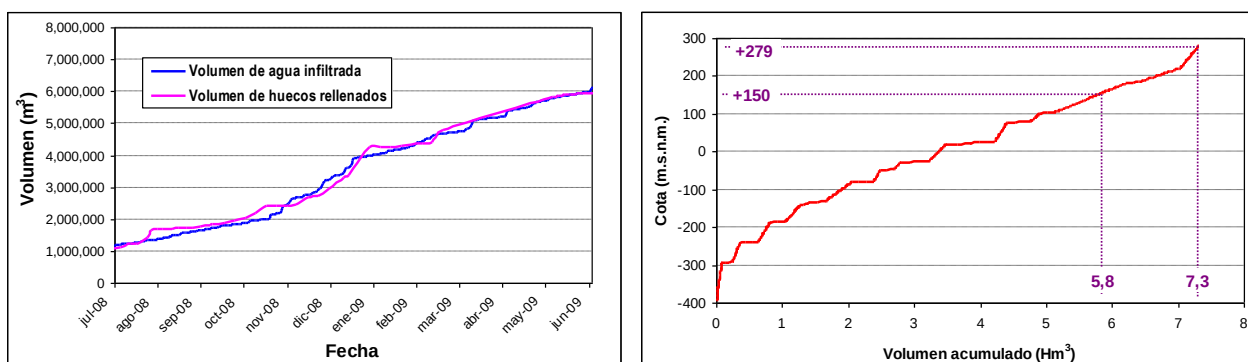


Figura 6. (Izq.: Variación temporal del volumen de agua infiltrada durante la inundación y del volumen de llenado de los huecos estimados, una vez corregidos en los niveles superiores. Dcha.: Capacidad del embalse minero Barredo-Figaredo a cada cota absoluta.

IV.7. Cese del desagüe. El rebote del nivel piezométrico.

Con el cese del drenaje producido por el desagüe, el nivel piezométrico se fue recuperando, según el proceso conocido como “rebote” (Henton, 1981). El control de la evolución del nivel del agua se realizó semanalmente en la caña de ambos pozos desde el 1 de agosto de 2008 hasta Mayo de 2009, determinando también los parámetros in situ: pH, temperatura y conductividad eléctrica.

Se ha intentado modelizar la inundación por medio del modelo GRAM (Groundwater Rebound in Abandoned Mineworkings), herramienta desarrollada por el Institute for Research on Environment and Sustainability (IRES) de la Universidad de Newcastle upon Tyne (Inglaterra) para mejorar el conocimiento de los sistemas mineros abandonados, evaluando distintas alternativas conceptuales, ante el generalmente escaso volumen de datos conocidos (Kortas y Younger, 2007). Se ha podido observar la crítica dependencia de factores como el volumen de agua de entrada al sistema, el porcentaje de escorrentía y el coeficiente de almacenamiento. Asignando a este último un valor de 0,08 (en coherencia con los valores que se estima se alcanzan tras la actividad minera en la zona (Tabla 1) para el conjunto del embalse (*pond*), se han obtenido resultados satisfactorios, pues los niveles obtenidos reproducen aquellos observados en la práctica (figura 7). Ello permite comprender mejor el proceso de inundación, de forma que la experiencia obtenida en la modelización pueda ser aplicada a otros casos semejantes antes de su inundación, con fines predictivos.

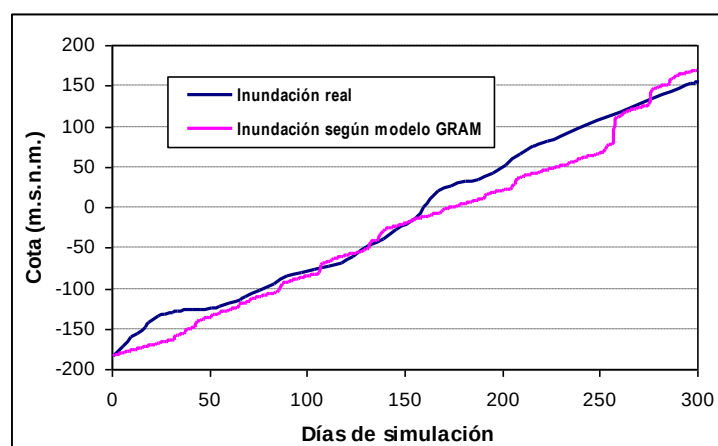


Figura 7. Comparación entre el proceso de rebote del nivel piezométrico medido en el embalse Barredo-Figaredo y el simulado mediante el modelo GRAM

IV.8. Hidroquímica del agua del embalse minero Barredo-Figaredo.

De acuerdo con los diagramas de Piper y Stiff (figura 8), se deduce que las aguas de los pozos Barredo y Figaredo son en general aguas sulfatadas cálcico-magnésicas, en algunos casos sódicas y cuyo pH no baja de 7. El problema principal que afecta a las aguas es su elevada dureza, que en algunos casos llega a superar los 100° franceses y que impide la utilización directa de las aguas de mina como fuente fría de la bomba de calor.

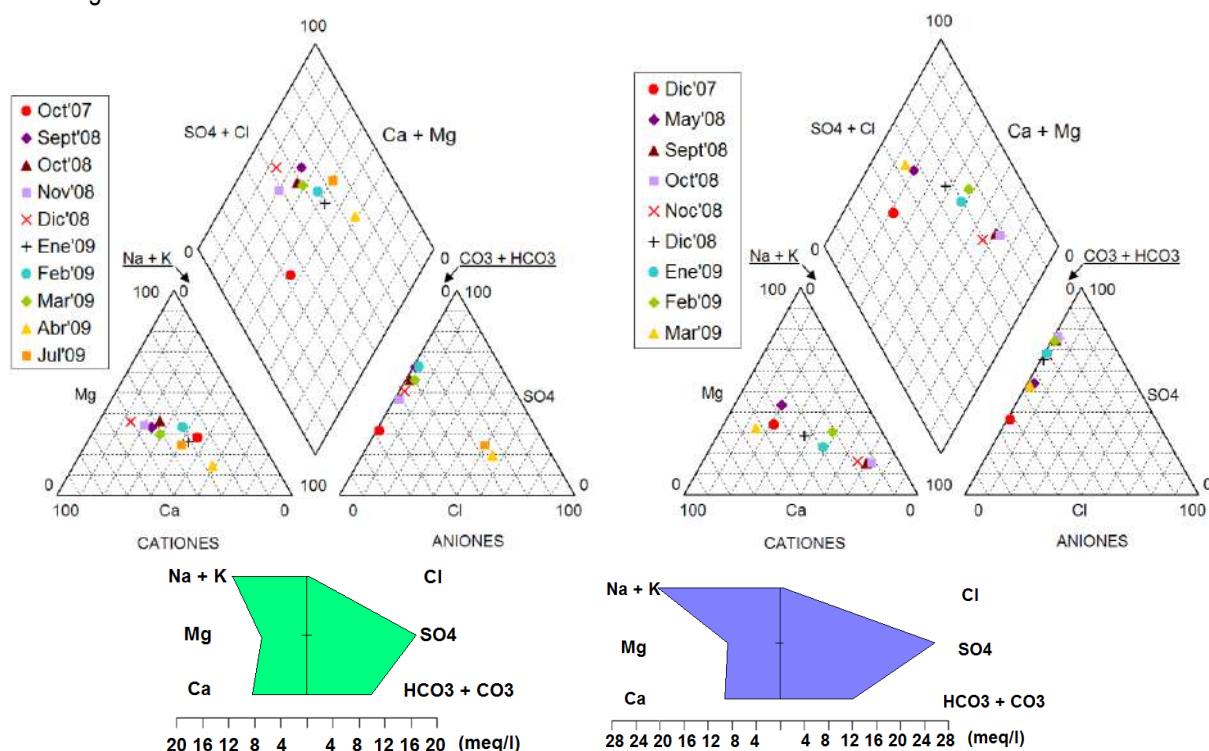


Figura 8. Diagramas de Piper (arriba) y Stiff (abajo) correspondientes al promedio del agua de Barredo (izda.) y de Figaredo (dcha.)

De acuerdo con los análisis de partículas sólidas en suspensión del agua estudiada, se observa la necesidad de un filtrado previo, siguiendo el artículo 6.4.3.3.2, apartado a, de la Norma UNE 112076, que considera un tratamiento imprescindible la filtración en el caso de circuitos cerrados. Dada su dureza, y aunque el carácter del agua sea poco incrustante (Ryznar, 1944; Custodio y Llamas, 2001), se ve aconsejable instalar, después del filtrado previo de sólidos en suspensión, un desincrustador y un descalcificador. Para evaluar si existe estratificación en la columna del pozo Barredo, se utilizó una sonda multiparamétrica capaz de resistir las presiones correspondientes a la columna de agua en profundidad, dentro de la caña del pozo y que registra durante su descenso varios parámetros, algunos de los cuales se muestran en la figura 9. Se observa que los perfiles acusan cambios cuando la sonda atraviesa las plantas del pozo, en 2ª y 3ª, y que todos los parámetros representados van aumentando en magnitud al hacerlo la profundidad hasta llegar a la altura de 3ª planta, a partir de la cual se estabilizan. Los perfiles de conductividad, sólidos disueltos y salinidad son análogos, como es obvio, pues los parámetros que representan están muy relacionados.

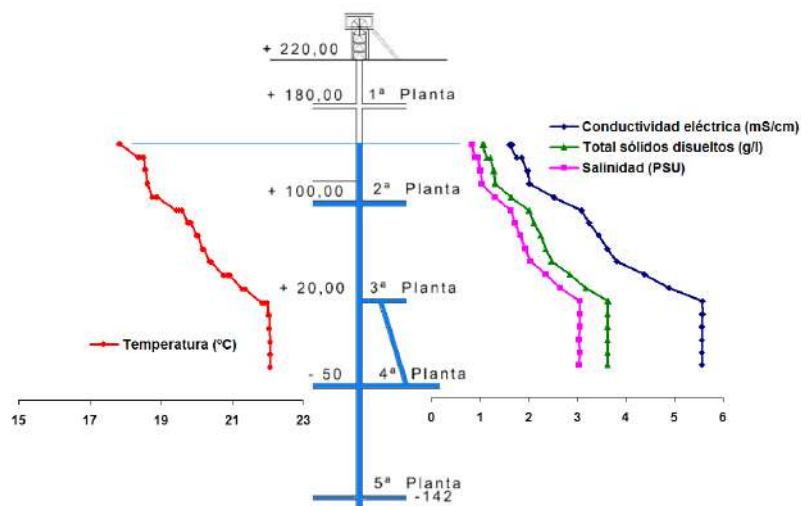
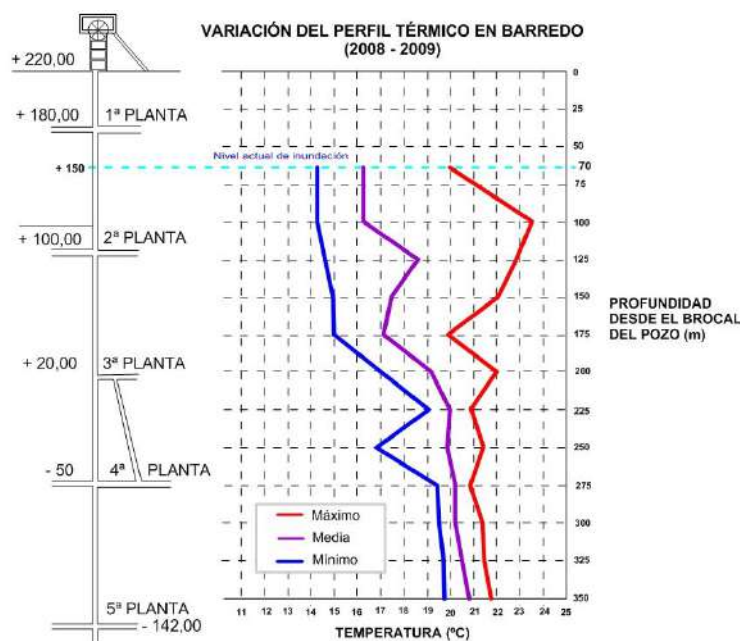


Figura 9. Perfiles de varios parámetros registrados a lo largo de la caña del pozo Barredo

En cuanto a su aptitud para consumo humano, de acuerdo con la Directiva 75/440/CEE, debido a los altos contenidos en el agua de ambos pozos de hierro y manganeso, habría que aplicarles un tratamiento tipo A3, es decir un tratamiento físico intensivo (TFI, en el que tras el TFN se realiza una microfiltración, una ultrafiltración y/o una osmosis inversa), seguido de un tratamiento químico intensivo (TQI, que consiste en un TQN seguido de una oxidación con ozono, de una electrodiálisis y/o de un intercambio) para finalizar, como en los otros tratamientos, con una desinfección.

IV.9. Temperatura de las aguas.



Desde el año 2004, HUNOSA ha venido realizando medidas de la temperatura de las aguas desaguadas por los pozos Barredo y Figaredo, al principio de forma discontinua y desde mayo de 2009, de forma continua, observando que ambas fluctúan en torno a los 20°C. Como la variabilidad de estas medidas a lo largo del tiempo era elevada, en la figura 10 se observa la tendencia de las temperaturas media, máxima y mínima, para medidas realizadas entre diciembre de 2008 y junio de 2009, tiempo durante el cual, el nivel del agua ascendió casi 200 m. El estudio del perfil térmico ha permitido establecer que la temperatura del agua extraída del embalse minero mantendrá una temperatura entre 19°C y 25°C, idónea para el funcionamiento de los equipos de bomba de calor, por lo que, a los efectos del aprovechamiento geotérmico, y al objeto de obtener resultados conservadores, se considerará una temperatura de 20°C para el pozo Barredo.

Figura 10. Perfil térmico del Pozo Barredo, una vez efectuado el proceso de inundación. Se observa la tendencia de la temperatura media, así como los intervalos entre los que se ha movido la temperatura a cada cota.

V. EL EMBALSE MINERO BARREDO-FIGAREDO. APROVECHAMIENTO.

Se plantean tres opciones:

V.1. Aprovechamiento para abastecimiento: el embalse minero formado por los pozos Barredo y Figaredo, es susceptible de ser aprovechado para abastecimiento hídrico, humano e industrial, y justificado por las siguientes razones:

Utilidad ecológica: Cuando las minas estaban en explotación, el bombeo servía como regulación del embalse subterráneo suministrando un caudal cuasiconstante que era vertido a los ríos Turón (Figaredo) y Caudal (Barredo). Al cesar el bombeo, el río Turón, tendrá agua abundante en invierno, creándose problemas de desecación e insalubridad en el verano. Así, el aprovechamiento hídrico del embalse Barredo-Figaredo, que alimenta el consumo de su entorno, permitirá facilitar el

mantenimiento del caudal ecológico del río Turón, ya que incrementando su caudal con agua subterránea, puede ser utilizada su agua en épocas de estiaje.

Infraestructura: Ambos pozos se encuentran muy próximos a núcleos urbanos, por lo que la incorporación de estos caudales a los sistemas generales de abastecimiento puede resultar económica y técnicamente viable. Destaca, en particular, la cercanía del pozo Barredo a las proyectadas conexiones entre los sistemas de abastecimiento de agua del valle del Caudal con el sistema de abastecimiento de la zona central de Asturias (Consortio de Aguas, 2010a), por lo que su aprovechamiento supondría un importante aporte de caudales con inversiones inferiores a las previstas para suplir las carencias existentes y/o atender los crecimientos de demanda proyectados.

Capacidad y Regulación: Tomando como recarga o aportación al embalse Barredo-Figaredo la media de la suma de los caudales bombeados en ambos pozos durante el periodo 2002-2007 ($4,1 \text{ Hm}^3/\text{año}$), se observa que, según la gráfica de la figura 11, el consumo máximo que se podría satisfacer es de $0,335 \text{ Hm}^3/\text{mes}$. Esta cifra sería teóricamente suficiente para abastecer a 60.300 personas, suponiendo un consumo constante por habitante y día de 185 l como media de Asturias (INE, 2009). Se tiene, pues, que el embalse podría satisfacer la demanda teórica de no sólo la ciudad de Mieres, sino también la de todo el concejo homónimo, cuyos habitantes se estiman en 25.000 y 44.500, respectivamente (INE, 2008).

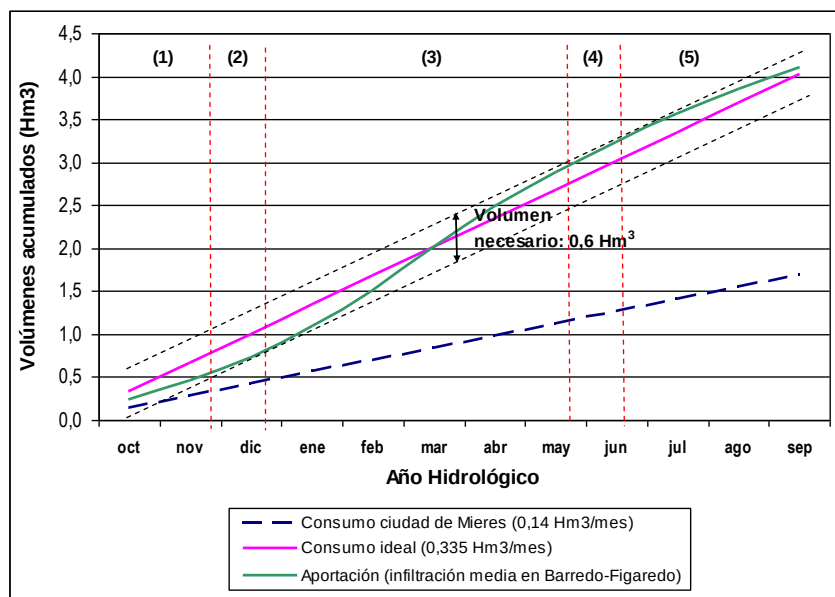


Figura 11. Gráfica de aportaciones acumuladas para el embalse Barredo-Figaredo.

Como se observa en la gráfica de aportaciones acumuladas, en los meses de julio a noviembre (periodo en el que la pendiente de la recta de la demanda es superior a la de la tangente de la curva de caudal aportado, periodos 1 y 5), de no existir regulación, no sería posible el abastecimiento. En junio y diciembre, periodos en los que ambas pendientes coinciden, podría abastecer justo lo necesario y en el periodo de enero a mayo (sección 3), sobraría agua. También se deduce de la gráfica que un volumen de embalse de $0,6 \text{ Hm}^3$ (muy inferior

al realmente existente) sería suficiente para regular la aportación media considerada. Aunque la capacidad real del embalse es muy superior, con la recarga natural del éste, no sería posible aumentar la demanda satisfecha, a no ser que se aumentase artificialmente dicha recarga, ya que existe la posibilidad de “importar” durante los seis meses de déficit (2ª mitad del año) un caudal de agua del río Aller de 130 l/s (algo perfectamente soportable por el río, pues su caudal medio es de $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y su caudal ambiental de 700 l/s. Así el embalse recibiría más recarga, para poder llegar a satisfacer el doble de demanda, es decir, $0,7 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ (abastecimiento teórico de 135.600 personas), minimizando el rebose, que sería sólo de $0,13 \text{ Hm}^3$, entre los meses de Mayo y Junio.

Se dispone así de una alternativa limpia a la solución de abastecimiento de la zona central del Principado de Asturias presentada, en estos momentos, por la Administración: la construcción de un embalse en la zona del Alto Nalón con una capacidad de 25 Hm^3 , y que está fuertemente contestada, con razón, por los grupos verdes, dado el fuerte impacto ambiental que supone estas infraestructuras hidráulicas en un entorno natural tan privilegiado como el de la montaña asturiana.

V.2. Aprovechamiento energético mediante bomba de calor, que, como se adelantó en la Introducción, supone un ahorro económico importante y, como se verá, resulta tener una gran eficiencia energética.

Ante la menor carga térmica conseguida en los nuevos edificios diseñados de acuerdo a las exigencias básicas de ahorro de energía del CTE-2006 (Ministerio de Vivienda, 2006) y el RITE, así como tras la aplicación del Procedimiento básico para la certificación energética de edificios de nueva construcción o *que se modifiquen, reformen o rehabiliten* en una extensión determinada (IDAE, 2007d), es evidente que la forma de calentar el agua se ha modificado, pero, además, se puede observar que todos los sistemas de alta eficiencia energética o que aprovechan las nuevas fuentes de energía tienden a trabajar a bajas y muy bajas temperaturas de impulsión (LTH = Low Temperature Heating). En este estudio, para una mayor eficiencia energética, salvo para aquellos usuarios que gestionen directamente el agua de mina y deseen mantener sistemas tradicionales de emisión de calor, se plantean temperaturas de impulsión/retorno de $35/30^\circ\text{C}$ por su compatibilidad con sistemas de calefacción de suelo radiante, dinámicos tipo fancoil y los nuevos radiadores de baja masa y baja inercia térmica (JAGA, 2007). Además, los COP de las bombas de calor son más altos y el rendimiento de las calderas de condensación para subir la temperatura de esta agua a la de suministro de ACS es mayor a baja carga.

V.2.1. Planteamiento técnico-económico

El potencial térmico del foco frío, P_f , en vatios térmicos (W_t), será el calor cedido por el agua del foco frío en el evaporador, Q_2 , por unidad de tiempo, y ganado por el refrigerante y vendría dado por el producto del gasto o flujo másico del agua circulante del foco frío por la diferencia de entalpías de esta agua a la entrada (h_{ee}) y salida del evaporador (h_{se}):

$$P_f = \dot{m}_{\text{agua}} (h_{ee} - h_{se}) \quad [1]$$

Siendo $\dot{m}_{\text{agua}}$ el gasto másico por segundo:

$$\dot{m}_{\text{agua}} = (V_t \cdot \rho) / t \quad [2]$$

$$(h_{ee} - h_{se}) = \Delta T \cdot C_e \quad [3]$$

Con lo que:

$$P_f = (\Delta T \cdot C_e \cdot V_t \cdot \rho) / t (W_t) \quad [4]$$

Donde:

ΔT = Salto térmico, que en el caso de las bombas de calor habituales, es de 5°C

C_e = Calor específico del agua = 4186,8 J/kg · °C

V_t = Volumen (m^3) de agua de evacuado en un tiempo t .

ρ = Densidad del agua = 1000 kg/ m^3

t = tiempo de calefacción considerado en segundos

Q = Caudal de agua necesario, en l/s, $V_t = Q \cdot 1000^{-1} \cdot t$

Sustituyendo en [4]:

$$P_f = 5 \cdot 4186,8 \cdot Q \cdot 1000^{-1} \cdot 1000 \Rightarrow Q (l/s) = 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot P_f (W) \quad [5]$$

Y siendo E_f la energía térmica del foco frío en kWh y t el tiempo de funcionamiento expresado en horas:

$$P_f = E_f \cdot t^{-1} (kW) = E_f \cdot t^{-1} \cdot 106 (W) \quad [6] \rightarrow Q (l/s) = 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot E_f \cdot t^{-1} \cdot 106 (W) \quad [7]$$

El potencial térmico del foco caliente será:

$$P_c = P_f + W_e \quad [8]$$

Siendo W_e el trabajo aportado al compresor de la bomba de calor.

Dada la definición de COP y operando:

$$P_c = P_f \cdot COP / (COP^{-1}) \quad [9]$$

En general, para un edificio residencial, se supone un horario diario de calefacción desde 7 a 11,30 h por la mañana y de 16 a 21 h por la tarde, lo que suma un total de 9,5 horas/día y considerando como período de calefacción desde principios de Noviembre hasta finales de Abril, se tiene 181 días/año, es decir, 1719,5 horas/año. Para estos edificios residenciales se elige como unidad de comparación una vivienda de 100 m^2 , que, según datos del Instituto Nacional de Estadística, es la superficie media útil de un piso con calefacción en Mieres (INE, 2010b) y se utilizará una demanda térmica de 50 W/ m^2 , apropiada a sistemas de baja temperatura, en viviendas con buen aislamiento térmico (Oschner, 2008). Se precisan, pues, $50 \cdot 100 \cdot 1719,5 \cdot 1000^{-1} = 8597,5$ kWh/año, por vivienda.

Para evaluar el coste de instalación de una bomba de calor se parte de un presupuesto estándar de una bomba de calor con potencia calorífica de 280kW, a 50°C de salida del condensador (Grupo enfriador agua/agua TRANE- RTWB 210; TRANE, 2010a) totalmente instalada, de 64.262€, siendo 45.845€ el costo variable de la bomba de calor, proporcional a su potencia calorífica y 18.417€ el costo fijo de electrobomba, instalación eléctrica y depósito regulador de entrada del agua de mina (ENOL Consultores). Por tanto, siendo P_i la potencia calorífica, a 50°C de salida del condensador, ello nos conduce a que la inversión I_i de la bomba de calor se calcule de acuerdo a:

$$I_i = 18.417 + (P_i \cdot 45.845)/280 \quad [10]$$

Para la imputación al consumidor como coste fijo, siendo la inversión I_i , con una vida útil de n años y la tasa exigida al capital i , la amortización anual A_i será $K_i \cdot I_i$, siendo

$$K_i = (1 + i)^n / [(1 + i)^n - 1] \cdot i^{-1} \quad [11]$$

Para una tasa exigida al capital del 6% y 30 años de vida útil:

$$K = (1,06)^{30} / [(1,06^{29} - 1) \cdot 0,06^{-1}] = 0,078 \quad [12]$$

Para el análisis económico comparativo de la sustitución de los viejos emisores térmicos de alta inercia térmica y concebidos para temperaturas de impulsión superiores a 60°C, a nuevos emisores térmicos de menor inercia térmica y capaces de trabajar con temperaturas de impulsión/retorno de 35/30°C, se supone que este costo es similar al de la instalación de suelo radiante y se aplican los siguientes criterios elaborados de acuerdo a la guía de Ochsner (2008), para una casa o espacio a calefactar de 100 m^2 :

Emisores térmicos = 2538€

Instalación y control = 1078€

Coste sin IVA = 3616€

En este sentido se considerarán dos posibilidades, según sea o no subvencionada esta renovación con cargo a las ayudas que, en España, prevea el nuevo Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020, similares a las actuales, del 30% (IDAE,

2005). La modalidad de subvencionar la renovación de los sistemas de calefacción, por parte de las compañías suministradoras de energía eléctrica debería también ser planteada de forma generalizada. Se cita, a título de ejemplo, las subvenciones concedidas por la empresa gas natural-UNION FENOSA a todos sus clientes para la renovación de los sistemas convencionales de calefacción por equipos geotérmicos (Centro tecnológico de Eficiencia y Sostenibilidad Energética (energylab, 2009). Finalmente, se utilizan los siguientes parámetros técnico-económicos:

Precio sin tasas del gas en España = 14,64 €/GJ (EUROSTAT, 2010a)

Precio sin tasas de la electricidad en España = 0,1294 €/kWh ((EUROSTAT, 2010b)

Porcentaje aplicado del IVA: 18%. Incremento anual de los costes: 2%. Tasa exigida al capital: 6%

Para el cálculo de las emisiones de CO₂ se han utilizado los *Factores de conversión a energía primaria (ep) y factor de emisión de CO₂ para carburantes, usos térmicos y electricidad – 2008* (IDAE, 2010) en punto de consumo:

Gas natural: 0,223 t de CO₂ por MWh suministrado

Energía eléctrica: 0,385 t de CO₂ por MWh suministrado.

En cuanto a los posibles usuarios, considerando una zona que abarque 2000 m al sur y 1000 m al norte del pozo Barredo (figura 12), en su interior se encuentran, además del conjunto de edificios de antigua construcción que conformaban el núcleo de población, zonas residenciales de nueva construcción; el Campus de Mieres; empresas del polígono industrial cercano; centros comerciales como Eroski, Caudalia y DIA; el Recinto Ferial; el nuevo Hospital; un Centro de día/ Residencia Geriátrica y un conjunto de edificios residenciales de alta densidad en viviendas al Sur del Hospital, por lo que, en un clima como el de la Cuenca Central Asturiana, existen dos tipos de necesidades de climatización: de calefacción, tanto en edificios



residenciales y grandes edificios comerciales o de servicios, y de refrigeración exclusivamente en estos grandes edificios. Por lo tanto, las alternativas de aprovechamiento energético mediante bombas de calor quedan, reducidas a dos District Heating diferentes: una red calorífica a muy baja temperatura, la temperatura del agua de mina, para su uso directo por el usuario; y una red calorífica de baja temperatura, a 35°C, con origen en una Central de Generación Térmica a boca del embalse minero.

Figura 12. Vista general de la zona de influencia del pozo Barredo

V.2.2. Red calorífica de muy baja temperatura (18°C- 22°C).

En esta alternativa, desde el embalse minero se transportaría el agua de mina a los centros de consumo, para su aprovechamiento energético directo con bombas de calor. Cada consumidor, tras producir la energía calorífica necesaria, produciría también la energía frigorífica que necesita, disipando su balance térmico a la tubería de retorno al embalse subterráneo para su equilibrio térmico y recirculación. Dentro de esta alternativa se puede también incluir la instalación de bombas de calor en los centros de consumo que necesiten exclusivamente calefacción, pero que necesiten una gran potencia calorífica.

El agua de esta red debe gravarse con el desagüe del embalse minero, ya que sólo se contempla una red térmica que parte y retorna al pozo Barredo. Con bombas de 470 m³/h de caudal, rendimiento del 90% y una altura manométrica de 80 m, la energía consumida, por m³ desaguado, es: $9,81 \cdot 0,278 \cdot 1000^{-1} \cdot 80 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,2424 \text{ kWh/m}^3$, que supone un costo de 0,031 €/m³ desaguado, pero, dadas las características de riesgo y responsabilidad del negocio, se estima un 18% de Beneficio Industrial de HUNOSA, con lo que se supone una imputación al consumidor, por m³ usado de la red, de 0,037 €/m³, sin IVA.

Al mismo tiempo, los usuarios deberán bombear el caudal de agua necesario para alimentar sus equipos de bombas de calor y devolverlo al retorno de la red una vez haya sido usado. Para facilitar el análisis, se supone que para la recirculación del agua de mina cada usuario necesita instalar una bomba de 120 m³/h de caudal nominal, equivalente a 33,33 l/s, un rendimiento del 90% y que esta recirculación supone una pérdida de carga equivalente a una altura manométrica uniforme de 10 m.

Se distinguen dos tipos de usuarios:

A) Usuarios que necesitan calefacción y refrigeración simultáneas

En el segundo caso, de suministro simultáneo de calefacción y refrigeración, dado que se trata de un proceso no continuo o de tipo hornada (procesos "batch"), es decir, no hay simultaneidad en las necesidades de calentamiento y refrigeración, la utilización de almacenamientos térmicos intermedios es la solución precisa que permite la utilización de las bombas de calor de la forma más eficiente energéticamente (Renedo *et al.*, 2004; Peredo *et al.*, 2007).

Se plantean dos modelos de almacenamiento intermedio, según que el consumo de agua caliente sanitaria (domestic hot water -DHW-) sea suficientemente alto para justificar el uso exclusivo de una bomba de calor a tal fin. Para consumidores medios el esquema propuesto parte de la alimentación de un grupo de una o dos bombas de calor desde un depósito regulador del agua de mina (en la figura 13, a modo de ejemplo, a 19°C) que suministran agua fría para refrigeración a 7°C y caliente para calefacción a 45°C. Para consumidores altos, como el Hospital, se propone que el almacenamiento térmico de agua caliente para uso del sistema de calefacción sea intermedio como fuente de calor para una tercera bomba de calor que suministre agua caliente, a 60°C, a un tercer almacenamiento térmico, para uso de la red de DWH (figura 14). Como puede observarse en esta figura, donde el agua de mina está a 20°C, mediante una válvula de tres vías, el agua que retorna del circuito de calefacción, a 30°C, se une controladamente con la que sale del evaporador de la tercera bomba, a 15°C, para suministrar el agua que entra en el evaporador a 20°C. En el condensador el agua sale a 60°C y retorna a 55°C. La prevención del riesgo de *legionella* estaría garantizada instalando en este almacenamiento térmico de DWH unas resistencias eléctricas que, cada cierto tiempo, elevasen la temperatura hasta los 65°C

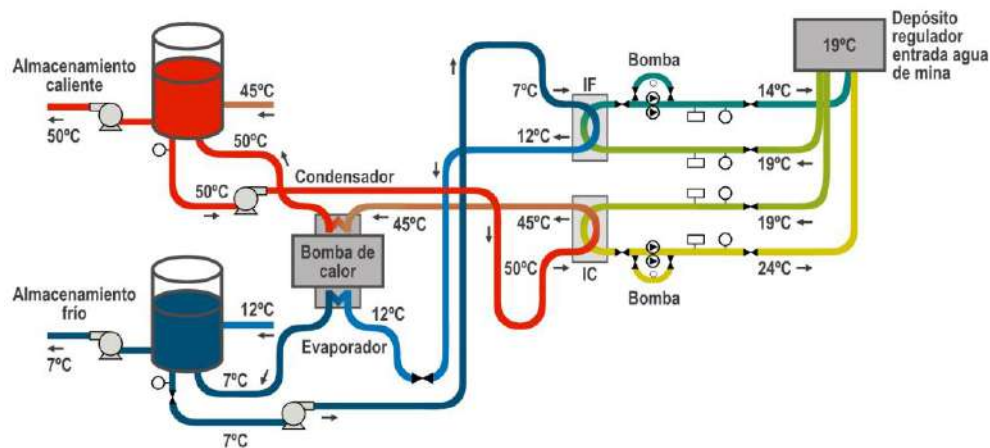
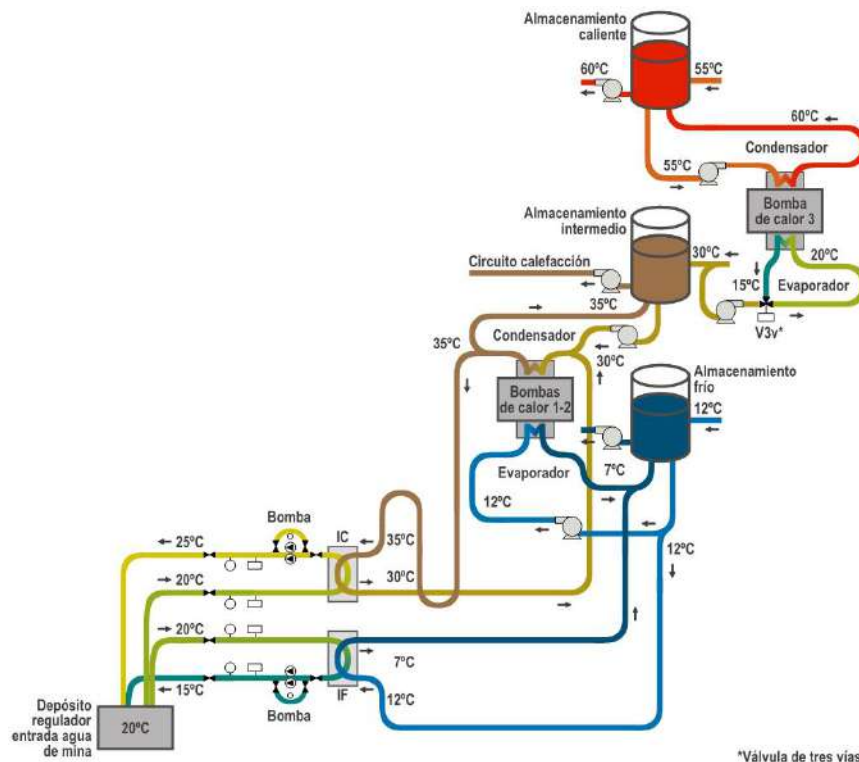


Figura 13. Esquema básico de la bomba de calor con agua de mina y almacenamiento de frío y calor.



*Válvula de tres vías

Figura 14. Propuesta de esquema básico de tres bombas de calor con almacenamiento intermedio de calefacción y almacenamiento de A.C.S.

Así, el sistema tiene unos depósitos de inercia, como almacenes térmicos, a las salidas de los condensadores y evaporadores de las bombas de calor, de tal manera que las salidas del condensador de ambas máquinas van al depósito de calor y las salidas del evaporador de ambas máquinas van al depósito de frío. Regulando así la demanda, se eleva el rendimiento de la máquina, ya que el coeficiente de eficiencia energética aumenta: $\text{Coef. Efic. Energética} = \text{CEE} = [\text{Etcondensador} + \text{Etevapador}] / \text{Wcompresor}$.

En la actualidad está en desarrollo el Proyecto de Climatización del Edificio de Investigación del Campus de Mieres, elaborado por ENOL Consultores. Este edificio, con una superficie total de 57.393 m², aunque tiene independizada la climatización general del sistema de refrigeración para la disipación del calor de las salas de ordenadores, necesita simultáneamente calor y frío en esta climatización. Se eligió la alternativa de aprovechar la baja entalpía del agua de mina mediante bombas de calor, conectadas a un sistema de climatización a cuatro tubos para satisfacer sus necesidades instalando dos Grupos enfriadores agua/agua modelo RTWB 210 de TRANE. En el evaporador de las enfriadoras el agua entra a 14°C y sale a 7°C; a su vez, en el condensador de las enfriadoras el agua entra a 45°C y sale a 50°C. El COP previsto es de 3,8 y el EER de 2,77. Para que la máquina pueda funcionar con el salto térmico adecuado, los intercambiadores permiten mantener el equilibrio entre las necesidades de calor y frío del edificio empleando el agua de mina como fluido de compensación. Así, en modo refrigeración, cuando las necesidades de frío superen a la demanda de calor, el agua de mina actuaría disminuyendo la temperatura del agua caliente de retorno a través de un intercambiador de calor de placas, modelo UFP 102/55 LH-PN10. Si en modo calefacción el edificio no es capaz de consumir todo el frío que requiere el sistema para funcionar compensado, el agua de mina se encargará de aportar el calor necesario, a través de un segundo intercambiador, modelo UFP 102/39 LH-PN 1.

Los resultados siguientes son los teóricos presentados por los técnicos de ENOL Consultores, en situaciones de funcionamiento de máxima carga de la potencia nominal del sistema; así, en la figura 15, se representan, mes a mes, las necesidades de energía térmica, los ahorros y el consumo eléctrico de la máquina y, en la tabla adjunta, se recoge el resumen del balance energético con el coeficiente de eficiencia energética de la instalación. Sin embargo, de acuerdo a la diferencia experimentada entre los resultados proyectados y los reales experimentados en una aplicación similar efectuada para la climatización de la Autoridad Portuaria de Valencia (Torrero, 2008) se espera una eficiencia energética real mayor que la teórica calculada. En cuanto al agua de mina, el caudal punta necesario calculado es 128,54 m³/h, y el caudal anual 251.458 m³/año.

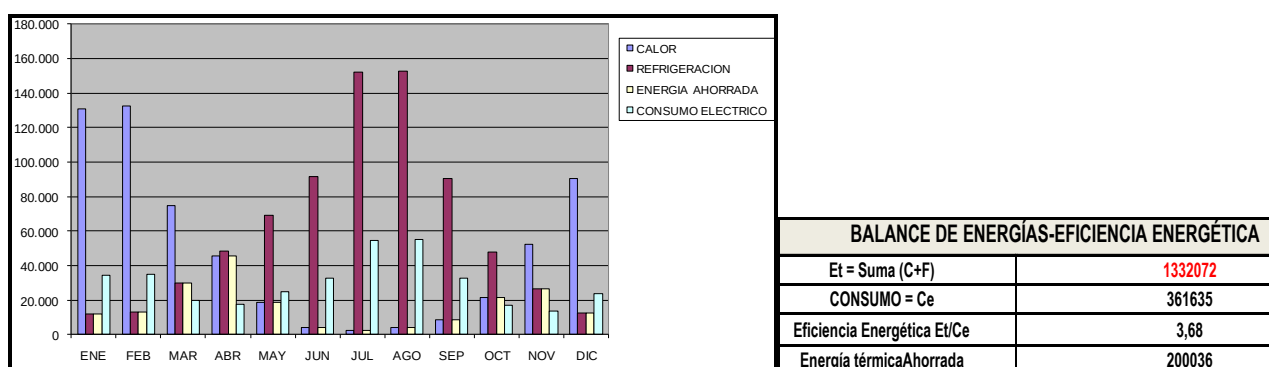


Figura 15. Balance de energías térmicas y consumo eléctrico y Eficiencia energética del Centro de Investigación (facilitado por ENOL Consultores)

B) Usuarios que sólo necesitan calefacción

A título de ejemplo, se plantea la modificación del actual sistema de calefacción del Edificio docente del Campus de Mieres, de la Universidad de Oviedo, de tres calderas de gas con una potencia útil total instalada de 2.625kW por una bomba de calor CIATESA de gran potencia calorífica, modelo MT-LW-LWP (R134a)-E y tipo 3400BX, de 1255 kW de potencia, para temperaturas de salida del condensador de 50°C y de salida del evaporador de 15°C (CIATESA, 2010a). En estas condiciones, se tiene un COP = 4,6 suministrando calefacción 1775 horas anuales durante 142 días a temperaturas de impulsión de 50°C con retorno a 45°C. En la situación actual, los consumos del año 2006 fueron 191.053 m³ de gas, que equivale a 2144,3 MWh. Esto significa un coste anual, sin tasas, de 113.013 € y unas emisiones de CO₂ de 478,18 t.

En la nueva situación propuesta, el trabajo exterior aportado, igual al consumo eléctrico del compresor, será (Ec/COP): 2144,3/4,6 = 466,15 MWh. El caudal de agua necesario será 159,9 m³/h, que supone un consumo anual de 283.823 m³ de agua de mina, que al precio de 0,037 €/m³ implica un coste, sin IVA, de 10.501 €/año. La energía eléctrica necesaria para la recirculación de este caudal de agua será de 8594 kWh, con lo que el consumo eléctrico total será 474.746 kWh, con un coste sin IVA de 61.432€ y unas emisiones de CO₂ de 182,7 t. El balance comparativo de ambos sistemas se recoge en la tabla 2. El TIR de sustitución es del 58% y la inversión se recupera antes de dos años.

Resultados Anuales de Calefacción	Caldera de gas	Bomba calor agua mina (con retorno)
Energía Térmica necesaria (kWh)	2.144.300	2.144.300
Consumo gas (GJ)	7.719,50	
Consumo electricidad (kWh)		474.746
Costes Energía Térmica sin IVA (€)	113.013	61.432
Consumos agua (m³)		283.823
Costes HUNOSA (€)		10.501
COSTES sin IVA (€)	113.013	71.933
COSTES con IVA (€)	133.355	84.881
Emisiones CO ₂ (t)	478,18	182,7

Tabla 2. Balance de calefacción del Edificio docente del Campus de Mieres.

Posibilidades de consumo de agua de mina en la red de muy baja temperatura.

Actualmente sólo se puede aventurar una previsión muy orientativa del consumo de agua por los futuros usuarios de esta red. Dentro de los usuarios que sólo necesitan calefacción, no es aventurado suponer que el éxito en costes y en eficiencia energética del caso estudiado, unido a los muy probables incentivos a la renovación de equipos, incrementará la demanda de agua de la red hasta una estimación de consumo de 1,035 Hm³/año, que supone un consumo unitario de 583m³/h, equivalente a 0,162 m³/s, durante 1775 horas al año. En cuanto a los usuarios que requieren calefacción y refrigeración, sólo se dispone de los datos del proyecto del Centro de Investigación que, extrapolados a las necesidades del Hospital y los tres centros comerciales, conducen a la siguiente estimación: un consumo de 87,3 m³/h, equivalente a 0,024 m³/s, durante 8 horas diarias y meses de 30 días, es decir 2880 horas al año para el Centro de Investigación; un consumo de 261,9 m³/h, equivalentes a 0,072 m³/s, durante 12 horas diarias y meses de 30 días, es decir 4320 horas al año para los tres Centros Comerciales; y un consumo de 87,3 m³/h, equivalentes a 0,024 m³/s, durante 24 horas diarias los 365 días del año, es decir 8760 horas al año para el Hospital. En resumen, se tendría necesidad máxima de caudal de bombeo de 1020 m³/h y un total de 3.182.405 m³/año suministrados, de los que 1.035.000 m³ son utilizados como fuente de calor y 2.147.405 m³ como fuente y sumidero de calor.

V.2.3. Red calorífica de baja temperatura (35°C).

Desde una instalación de bombas de calor en Central de Generación Térmica a boca del embalse minero se suministraría agua caliente para calefacción y, con sobrecalentamiento añadido de A.C.S., para sistemas de calefacción, destinado a aquellos consumidores que no precisan suministro de refrigeración. La capacidad máxima de suministro de energía térmica viene dada por la capacidad máxima de bombeo y por la capacidad del embalse hasta la cota máxima de inundación, cuando el agua retorna al mismo. Para la colocación y soporte de las bombas de aspiración sumergibles y la tubería de descarga de las aguas devueltas al embalse minero, tras su aprovechamiento geotérmico, se hace necesario un sellado de hormigón en la misma caña del pozo, que permita el soporte de las tuberías de impulsión de las bombas sumergibles y de la tubería de retorno de las aguas de mina que deben retornar al embalse que, en el caso del pozo Barredo, se debe hacer a la altura del brocal por estar todas las plantas inundadas (figura 16). En esta figura aparece esta estructura en su estado actual provisional que permite el paso de la tubería de descarga al embalse minero, así como de dos tuberías de impulsión de bombas sumergible; adaptando este sellado para instalar



6 bombas de un caudal máximo de 470 m³/h, lo que sería factible, se tendría una capacidad máxima de bombeo de 2.820 m³/h, con lo que descontando las posibilidades de consumo de agua de mina de la red de muy baja temperatura, de 1.020 m³/h quedaría disponible una capacidad de bombeo de 1800 m³/h.

Figura 16. Sellado de hormigón de la caña del pozo Barredo (a) y vista superior del mismo (b) (Álvarez, 2009)

El bombeo necesario para el suministro a la red de abastecimiento hídrico no supone limitación alguna fuera de los períodos de calefacción porque, concentrando el desagüe en horas nocturnas, supondría un bombeo de 930,6 m³/h. En períodos de calefacción, este bombeo tampoco supone interferencia ya que antes de pasar al circuito que lleva el agua a la estación de tratamiento se utiliza como recurso energético por las bombas de calor de la Central de Generación Térmica y, como se tendría disponible 0,335 Hm³/mes · 6 meses/año + 0,08 Hm³/año (rebose) ~ 2,1 Hm³/año, concentrando el desagüe durante las horas de calefacción, se necesita un bombeo de 1221 m³/h.

La capacidad y potencia calorífica de este embalse, suministrando agua caliente a 35°C, se puede calcular a partir de las ecuaciones [8] y [9]. Se suponen bombas de calor CIATESA, tipo HYDROCIAT LWP – 4200 BX, de alta potencia calorífica, que para salida del condensador de 35 °C tienen un $COP = 6,73$, según el catálogo de bombas de calor de CIATESA, *MT-LW-LWP (R134a)-E*. Se tiene $P_f = 7,065 \text{ MW}_t$ y $P_c = 8,3 \text{ MW}_t$, lo que supondría una energía térmica anual disponible, a la salida de los condensadores, de: $E_c = 8,3 \cdot 1719,5 = 14.271,9 \text{ MWh}_t$, consumiendo $14.271,9 \cdot 6,73 - 1 = 2.121 \text{ MWh}$ de electricidad.

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), en su Instrucción Técnica *IT 1.2*. (Ministerio de la Presidencia, 2007a, 2007b), establece una pérdida térmica global máxima por el conjunto de conducciones de una instalación térmica, en la que el fluido caloportador es agua, del 4%. Por tanto, se asume esta pérdida, sin tener en cuenta las posibles ganancias de calor debidas a la energía absorbida por los equipos de transporte, siempre una fracción relativamente pequeña de la potencia transportada (IDAE, 2007d), con lo que se tendría una energía térmica anual disponible de: $E_{UC} = 13.701 \text{ MWh}_t$, lo que supone que, para temporadas de calefacción de 1719,5 horas/año, la capacidad calorífica del embalse minero, sin retornar agua al mismo, es de $C_{Emb} = (13.701 / 2,1) = 6.524,6 \text{ MWh}_t/\text{Hm}^3 \sim 6,5 \text{ kWh}_t/\text{m}^3$ y una potencia útil de: $3,81 \text{ MW}_t/\text{Hm}^3$, valores de capacidad de producción y potencias caloríficas que se consideran válidos también para situaciones de uso del agua con retorno al embalse minero. Aún nos queda una posibilidad de bombeo de $1800 - 1221 = 579 \text{ m}^3/\text{h}$ para producir energía térmica en la red de baja temperatura que, durante las 1719,5 horas de la temporada de calefacción, suponen $0,996 \text{ Hm}^3$ que deberían retornar al embalse minero y que, de acuerdo con el ratio de producción térmica por m^3/h desaguado pueden generar $6.524,3 \cdot 0,996 = 6498 \text{ MWh}_t$, consumiendo $6498 \cdot 1,04/6,73 = 1004,15 \text{ MWh}$ de electricidad.

Si a este suministro de energía térmica se le suma la energía térmica útil suministrada por los $2,1 \text{ Hm}^3$ del abastecimiento hídrico, es decir, 13.701 MWh_t , se tiene un total de energía térmica suministrada de 20.199 MWh_t , con un consumo de electricidad, en las bombas de calor, de: $20.199 \cdot 1,04/6,73 = 3121,4 \text{ MWh}$, y unas emisiones de CO_2 de $1.201,7 \text{ t}$, mientras que para producir esa misma energía térmica con calderas de gas se hubiesen emitido $4.504,4 \text{ t}$. Y de cara a los usuarios, a los efectos de costes comparativos de las alternativas de sistemas de calefacción de una vivienda de 100 m^2 , se tendrá en cuenta el gasto del bombeo suplementario del agua del embalse, por lo que se considera el siguiente balance final: 20.199 MWh_t suministrados, con un consumo de $(3.121,4 + 241,104) = 3.362,5 \text{ MWh}$ y unas emisiones de CO_2 de $1294,6 \text{ t}$. Dado que se necesitan $8597,5 \text{ kWh}_t$ por vivienda estándar de 100 m^2 (V.2.1), esto quiere decir que se puede suministrar calefacción a 2.350 viviendas del centro de Mieres. Supuesta una media de tres personas por vivienda se satisface la necesidad de calefacción de 7.050 personas, que, para una población del casco urbano de Mieres de 24.890 personas (INE, 2010b), supone el 28,3% del total. Aplicando a esta vivienda estándar de 100 m^2 el balance global, se tendrá un consumo de electricidad por vivienda de $1.430,8 \text{ kWh}$ y unas emisiones de CO_2 de $550,8 \text{ kg}$.

Se necesita instalar 8 bombas de calor del tipo 4200BX, de los modelos *MT-LW-LWP (R134a)-E*, de una potencia calorífica de 1581 kW , para temperaturas de salida del condensador de 35°C y de salida del evaporador de 15°C , equivalente a una potencia de 1512 kW para temperaturas de salida del condensador de 50°C . Por tanto, la inversión necesaria en bombas de calor [10], supondrá un total de: $8 \cdot [18417 + (45845 - 1512)/280] = 2.127.840\text{€}$, es decir, 905€ por vivienda, y, aunque estas instalaciones tengan una vida de muy larga

Análisis Económico (Costes anuales-Inversión) (€)	Vivienda 100 m^2	
	Caldera de gas	Bomba calor agua mina $COP = 6,73$
Energía Térmica Útil Euc (kWh)	8597,5	8597,5
Horas funcionamiento	1719,5	1719,5
Consumo gas (Gj)	31,6	
Consumo electricidad (kWh)		1.430,8
Costes Energía sin IVA	462,6	185,1
Costes mantenimiento	65,5	26
Beneficio HUNOSA		17
Costes Explotación sin IVA	528,1	228,1
Costes imputados de Amortización HUNOSA		70,6
Costes explotación con 18% IVA	623	352,5
Inversión	1.200	
Imputación Amortización	40	
COSTES TOTALES	663	353
Emisiones CO_2 (kg)	1.956	550,8

duración, conservadoramente, se toma como vida útil 30 años, a efectos de amortización; la amortización anual, imputable al consumidor como coste [12], será de $2127840 \cdot 0,078 = 165.972\text{€}$, que supone unos $70,6\text{€}$ por vivienda de 100 m^2 . Se suponen unos gastos de explotación de 60.000€ , principalmente debidos a mano de obra (4 operarios durante seis meses), que suponen unos 26€ por vivienda de 100 m^2 , imputables al concepto de mantenimiento. Para su comparación con los costes de una vivienda nueva equipada con caldera de gas se suponen calderas de condensación de alta eficiencia energética, con un rendimiento, sobre el poder calorífico superior (P.C.S.), del 98%; por tanto, para satisfacer la demanda y producir $8597,5 \text{ kWh/año}$, se consumirá una cantidad de gas con P.C.S. equivalente a: $8597,5 \text{ kWh/año} / 0,98 = 8773 \text{ kWh/año} \cdot 3,6 \cdot 106 \text{ J/kWh} = 31,6 \text{ GJ/año}$ para cada vivienda. Se parte de los costes de inversión que el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía estima para equipos de calderas de gas (IDAE 2007c), de 24.000 € para una superficie calefactada de 2000 m^2 , equivalente a un edificio de 20 viviendas, por lo que para una vivienda de 100 m^2 serán de 1200€ y como costes de mantenimiento se supone el costo del servicio "Funciona" de Hidrocantábrico, de $76\text{€}/\text{año}$, con IVA, $65,5\text{€}$ sin IVA. El análisis económico comparativo se recoge en la tabla 3; la inversión de renovar los emisores de alta temperatura de impulsión para adaptar las viviendas antiguas se recupera entre los años 10 y 11, con subvención del 30%, y entre los años 14 y 15, sin ella.

Tabla 3. Balance de calefacción de una vivienda de 100 m^2

V.3. Aprovechamiento mediante minicentral hidráulica: al combinar los anteriores aprovechamientos, devolviendo los caudales utilizados por las bombas de calor, y no consumidos como recurso hídrico, al embalse, por lo que este aprovechamiento solo se contempla como consecuencia del necesario retorno al embalse minero de parte de las aguas aprovechadas para las redes térmicas, con lo que se produce un balance de energías consumidas y generadas. Por un lado, se ha consumido una energía eléctrica, E_{cons} , para el desagüe de los caudales que retornan al pozo, que se compensa en parte por la energía eléctrica generada en la microturbina, E_{gen} . El balance final será:

$$E_{\text{cons}} - E_{\text{gen}} = 9,81 \cdot \sum Q_i \cdot T \cdot [H_m \cdot \eta - 1 - H_n \cdot e] \text{ (kWh)} \quad [15]$$

$\sum Q_i$ = Total caudales retornados al embalse en m³/s

T = n° de horas de funcionamiento

H_m = altura manométrica, en m

$[H_m = \text{altura de impulsión desde el nivel de inundación (HNI)} + \text{pérdidas carga} (\sim 10\text{m})]$

η , rendimiento de la bomba, que se supone del 90% = 0,9

H_n = Salto neto existente, en m.

e = Factor de eficiencia de la central, que se supone del 85% = 0,85

Siendo el rendimiento como central de bombeo:

$$E_{\text{gen}} / E_{\text{cons}} = H_n \cdot e / H_m \cdot \eta - 1 = 0,765 H_n / H_m \quad [16]$$

De acuerdo a los caudales retornados según las posibilidades de las redes térmicas y con un nivel estable de inundación a la cota +150 m y la turbina a la cota +155 m (figura 17), $H_m = 80\text{m}$ y $H_n = 65\text{m}$, según [15]:

$$E_{\text{cons}} - E_{\text{gen}} = 9,81 \cdot [80/0,9 - 0,85 \cdot 65] [0,1608 \cdot 1719,5 + 0,162 \cdot 1775 + 0,024 \cdot 2880 + 0,024 \cdot 8760 + 0,072 \cdot 4320] \text{ kWh}$$

Que supone un balance final de energía en el desagüe de las aguas retornadas: $E_{\text{cons}} - E_{\text{gen}} = 380.965 \text{ kWh}$, al haberse generado con la microturbina: $E_{\text{gen}} = 625.712 \text{ kWh}$, que supone una generación de $0,15 \text{ kWh/m}^3$, con un rendimiento como central de bombeo [16], $E_{\text{gen}} / E_{\text{cons}} = 0,622$.

V.4. Esquema y balance final de las redes térmicas.

En la figura 17 se muestra el esquema propuesto de las dos redes desde el pozo Barredo. Las aguas del embalse minero realizan el siguiente recorrido:

Aspiración por la bomba (B) → Paso por un filtro para eliminación de sólidos en suspensión → Paso por un descalcificador, con regulación de agua sin descalcificar para regular la dureza residual → Paso por un desincrustador electrónico anticálcico → Paso por el nudo donde se efectúa el desvío de las aguas al ramal de la Central de Generación Térmica, Q_1 , a pie de pozo, y al nudo de la red de muy baja temperatura, Q_2 → El caudal Q_1 , alimentará las bombas de calor, a pie de pozo, que elevarán la temperatura del agua hasta 35°C, manteniendo constante la impulsión de la red de baja temperatura. El caudal previsto para abastecimiento hídrico, Q_{11} , tras pasar por el evaporador de la bomba continuará en la conducción hacia el sistema de abastecimiento de la zona central de Asturias → El resto, Q_{12} , tras pasar por el evaporador de la bomba, retornará al embalse minero para su turbinado → Parte del caudal Q_2 destinado a la red de muy baja temperatura, Q_{21} , se enviará hasta los Centros de Aprovechamiento de forma regulada por los medidores de presión, P , y de temperatura, T . Su retorno, tras pasar por un intercambiador de calor, 7, para mantener constante la temperatura de la red, se volverá a recircular → El resto Q_{22} , tras pasar por el intercambiador de calor, 7, retornará al embalse minero para su turbinado. En el equilibrio, $Q_2 = Q_{22}$ → Finalmente, el caudal conjunto $Q_3 = Q_{12} + Q_{22}$ devuelto al pozo, alimentará la microturbina (T) y, a la salida de su nivel de desagüe, retornará al embalse minero.

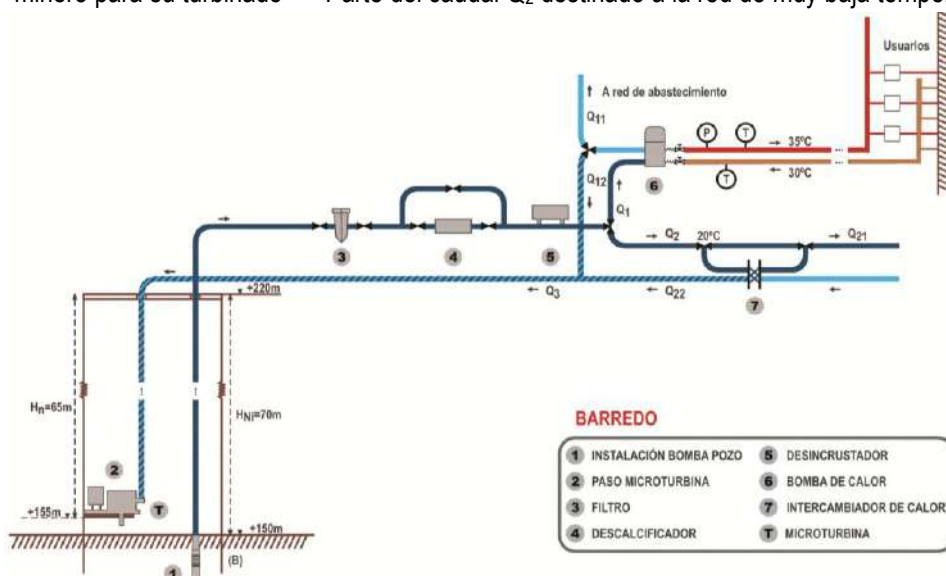


Figura 17. Esquema básico de las redes térmicas desde el pozo Barredo

A nivel de toda la red de baja temperatura, teniendo en cuenta que la circulación del agua del embalse minero que retorna al embalse presenta como balance entre la energía eléctrica gastada en el bombeo y la energía eléctrica producida en el turbinado, un consumo final de 380.965 kWh, con unas emisiones de CO₂ de 146,7 t, se tiene una emisión total de 1441,3t, por lo que dado

que con calderas de gas se hubiesen emitido 4504,4 t, supone una reducción total de emisiones de CO₂ de 3.063t. Además de esta reducción de emisiones está la efectuada en cada uno de los aprovechamientos particulares de la red de muy baja temperatura imputable a cada una de las aplicaciones. Finalmente destacar que Asturias, según datos de la Fundación Asturiana de la Energía (FAEN, 2009a), durante 2008 se ha tenido un consumo de energía primaria de 2.778.873 tep, generándose 1.271.090 tep, con lo que se tiene una eficiencia de generación de 0,457412. Por lo tanto, para HSPF = 6, fácilmente obtenible con temperatura media del agua del foco frío o fuente de calor de 20°C y temperatura media de salida del condensador de 35°C, se tendría un PER de la bomba de calor de 2,74, valores de COP y PER que superan ampliamente los valores mínimos de 5,10 y 2,04 del Anexo de *Criterios Ecológicos de la Decisión 2007/742/EC* (Comisión de las Comunidades Europeas, 2007a).

VI. CONCLUSIONES

Aprovechamiento energético.

La valoración de las características físico-químicas del agua del embalse minero aconseja la instalación de un sistema de filtrado previo de sólidos en suspensión, el paso intermitente por un descalcificador y, de forma continua por un desisincrustador electrónico anticalcáreo, a la salida del embalse minero para evitar atascamientos y limpiezas en los intercambiadores de calor.

El aprovechamiento directo de agua caliente para calefacción, desde una Central Térmica cercana al brocal de cualquiera de los pozos del embalse minero es más económico que los sistemas de calefacción basados en el uso de calderas de gas.

La inversión en la rehabilitación de las viviendas antiguas, para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de calefacción y posibilitar el suministro directo de agua caliente desde el aprovechamiento geotérmico de las aguas del embalse minero, se recupera siempre en plazos de tiempo inferiores a 15 años.

Por medio de la red de baja temperatura, se puede aprovechar la máxima capacidad calorífica de suministro de agua caliente de 6,5 kWh/m³ y HUNOSA puede llegar a suministrar directamente 22.000 MWh, reduciendo las emisiones de CO₂ en 3.322 t. Por medio de una red de muy baja temperatura, HUNOSA puede poner el agua de mina a disposición de determinados consumidores con necesidades de calefacción o de refrigeración y calefacción simultáneas: edificios del Campus de Mieres, empresas del polígono industrial Vega de Arriba, centros comerciales como DIA, Eroski, o Caudalia, el nuevo Hospital Comarcal de Mieres, una residencia Geriátrica cercana y un gran conjunto de edificios residenciales. Utilizando el agua de esta red, estos consumidores conseguirían ahorros energéticos del orden del 50%.

El aprovechamiento microhidráulico es una posibilidad consecuencia del retorno al embalse minero de parte de las aguas aprovechadas para las redes térmicas y, de acuerdo a las estimaciones de aprovechamiento geotérmico de este estudio, el balance final de energía de los bombeos y retornos al embalse es de 380.965 kWh siendo su rendimiento como central de bombeo del 62,2%.

Aprovechamiento hídrico.

La aportación hídrica anual o recarga del embalse, de 4,1 Hm³, sería teóricamente suficiente para abastecer a 60.300 personas, suponiendo un consumo constante por habitante y día de 185 l como media de Asturias, es decir a todo el Concejo de Mieres y 15.800 personas más. Este abastecimiento podría duplicarse con sólo tomar un caudal de 130 l/s del río Aller, lo cual sería medioambientalmente asumible por dicho río, pues su caudal medio es de 6,7 m³/s y su caudal ambiental se estima en 700 l/s.

De este aprovechamiento destaca la importancia ecológica que supone tener un embalse (subterráneo) de esta capacidad ya “construido”, en el que el agua no está expuesta a eutrofización y de la que se puede disponer en función de la demanda, con fáciles conexiones al abastecimiento de agua del Valle del Caudal, sin necesidad de generar un fuerte impacto ambiental con infraestructuras hidráulicas en superficie, en un entorno natural tan privilegiado como el de la montaña asturiana.

Consideración final.

Como colofón, cabe resaltar que el aprovechamiento de las aguas almacenadas en el embalse minero aquí planteado, es trasladable homotéticamente a cualquier otro tipo de embalse minero de HUNOSA. La media de los caudales desaguados por HUNOSA durante el período 2004-2006 es de 36,8 Hm³/año. Si se añade el caudal correspondiente a pozos no contemplados en esta estadística, como Olloniego o Lieres, se pueden alcanzar los 40 Hm³/año, lo que además de su potencial hídrico supone una capacidad de suministro a la zona central de Asturias cercana a 260 GWh/año.

A la vista de estas conclusiones, cabe una última reflexión, citando a Terry E. Ackman y George Watzlaf (2007): “Desaprovechar el agua de mina es un despilfarro terrible” (*A minewater is a terrible thing to waste*).

VI. AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar el autor agradece a D^a. Almudena Ordóñez Alonso su decisiva colaboración para conseguir esta síntesis.

En segundo lugar, agradece a Consultores ENOL, CIATESA, JAGA y a D^a. Conchita Crespo, responsable del mantenimiento del Edificio de la Universidad del Campus de Mieres, por proporcionar valiosa información.

Especial agradecimiento a la empresa HUNOSA y, muy particularmente, al Director General de Ingeniería y Nuevos Desarrollos del Grupo HUNOSA, D. Claudio Álvarez, que, desde la primera exposición sobre esta Tesis, en octubre de 2006, supo ver su alcance.

Sin ellos, sin su colaboración y facilidades en el suministro de datos, sencillamente este trabajo no hubiese sido posible.

VII. REFERENCIAS.

De las 246 referencias de la Tesis, sólo se mencionan las siguientes 48, expresamente citadas en esta síntesis:

AENOR. Norma UNE-EN 112076, 2004. Prevención de la corrosión en circuitos de agua.

Álvarez, C., 2009. La actividad de HUNOSA en el campo de la geotermia. Actas de la Jornada técnica sobre Energía Geotérmica. Cátedra Hunosa - Universidad de Oviedo. <http://www.unioviedo.es/catedrahunosa/archivos/Claudio%20Alvarez.pdf>

Centro tecnológico de Eficiencia y Sostenibilidad Energética (energylab), 2009. Renovación del Sistema de Climatización con Bomba de Calor Geotérmica en Viviendas Unifamiliares. http://www.energylab.es/fotos/091119133548_2MGV.pdf

CIATESA, 2010a. *Folleto técnico MT-LW-LWP (R134A y R407C)*. www.ciatesa.es.

Comisión de las Comunidades Europeas, 2007a. Decisión de la Comisión de 9 de noviembre de 2007 por la que se establecen los criterios ecológicos para la concesión de la etiqueta ecológica comunitaria a las bombas de calor accionadas eléctricamente o por gas o de absorción a gas. Diario Oficial de la Unión Europea (DOCE), nº L 301 de 20 de Noviembre de 2007, p. 14-25.

Consejo de la Unión Europea, 1975. Directiva del Consejo 75/440/CEE, de 16 de junio de 1975, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros. Diario Oficial de la Unión Europea (DOCE), nº L 194 de 25 de Julio de 1975, p. 26-31.

Consortio para el Abastecimiento de Agua y Saneamiento en el Principado de Asturias (Consortio de Aguas), 2010a. *Infraestructuras en Abastecimiento*. www.consortioaa.com/cmscaa/opencms/CAA/abastecimiento/infraestructuras-en-abastecimiento.htm

Custodio, E., Llamas, M.R., 2001. *Hidrología Subterránea* (2ª ed.). 2 vol. Ed. Omega, 2350 p. Madrid.

Degas, M., Wojtkowiak, F., Metz, M., Branchet, M., 2003. *Stabilité de la surface après l'exploitation totale du charbon et l'arrêt des pompes d'exhaure minière*. Actas del Congreso Après-mines 2003, Nancy, Francia: www.gisos.ensg.inpl-nancy.fr/UserFiles/File/PM_2003/Degas.pdf

De jong gortewaker algra, 2010. *Deventer Hospita. New building*. http://www.djga.nl/projecten/ziekenhuizen/eng/pdf/4125%20Deventer%20Ziekenhuis_eng.pdf?iframe=true&width=1000&height=500

EUROSTAT, European Commission, 2010a. *Gas prices by type of user. Medium size households*. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=0&pcode=tsier050&language=en>

EUROSTAT, European Commission, 2010b. *Electricity prices by type of user. Medium size households*. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsier040&language=en>

Fraunhofer Institute for Solar Energy, 2005. *Hospitals - Exemplary Energy-Conscious European Hospitals and Health Care Buildings*. Project Number: NNE5-2001-00295. Final Technical Report, 31/12/2005. www.eu-hospitals.net/results/pdf/Final/Full_Final_Report_Deventer_Hospital.pdf

Fundación Asturiana de la Energía (FAEN), 2009a. *Energía en Asturias 2008*. www.faen.es/nueva/ftp/BEPA_2008_v_final.pdf

García Fuente, P.A., 1996. *Sistema experto de predicción de desagües en minas subterráneas de carbón. Aplicación al Grupo Aller de Hunosa*. Tesis Doctoral, 2 vol. Universidad de Oviedo. Inédita.

Henton, M.P., 1981. *The problem of water table rebound after mining activity and its effects on ground and surface water quality*. In: van Duijvenbooden W, Glasbergen P, Van Lelyveld H (ed) *Quality of Groundwater* (Proceedings of an International Symposium Noordwijkerhout, The Netherlands). Elsevier, The Netherlands, pp 111-116

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 1975. *Mapa geológico de España*. MAGNA. Hoja 53. *Planos y memoria*. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 1984. *Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Norte: Asturias*. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas. Ministerio de Industria y Energía; Secretaría de la Energía y Recursos Minerales. Madrid.

Instituto Nacional de Estadística (INE), 2008. *Demografía y Población*. www.ine.es

Instituto Nacional de Estadística (INE), 2009. *Encuesta sobre el suministro y saneamiento del agua*. Año 2007. www.ine.es/prensa/np561.pdf

Instituto Nacional de Estadística (INE), 2010b. *Relación de unidades poblacionales*. INEbase / Nomenclátor. <http://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaRapida&subaccion=&numPag=0&ordenAnios=ASC&nombrePoblacion=mieres& botonBusquedaRapida=Consultar+selecci%F3n>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2005. *Plan Energías Renovables en España 2005-2010*. Ministerio de

- Industria, Turismo y Comercio. <http://www.idae.es/index.php/mod.pags/mem.detalle/idpag.14/recategoria.1153/remenu.12>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007c. Biomasa: Edificios. http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_edificios_07_ed87f465.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007d. Comentarios al RITE. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10540_Comentarios_RITE_GT7_07_2200d691.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2010. *Factores de conversión a Energía Primaria y factores de emisión de CO₂*. Publicado el 12-02-2010 2n Documentos. <http://www.idae.es/index.php/>
- JAGA, 2007. *Eficiencia energética y sostenibilidad en los sistemas de calefacción. Instalaciones y técnicas del confort*, N°. 186 (Febrero), 2007, pags. 72-78
- Jardón, J.S.; Pendás, F.; Ordóñez, A.; Cordero, C.; Álvarez, C.; Garzón, B, 2007. *Aprovechamiento de las aguas de mina en la Cuenca Central Asturiana como recurso hídrico y energético*. Actas del XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales. Oviedo.
- Kortas, L., Younger, P.L., 2007. *Using the GRAM Model to Reconstruct the Important Factors in Historic Groundwater Rebound in Part of the Durham Coalfield, UK*. Mine Water and the Environment, 26: 60–69.
- Ministerio de la Presidencia, 2007a. *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, (RITE)*. BOE 207 de 29/08/2007, Sección 1, p.35931-35984.
- Ministerio de la Presidencia, 2007b. *Corrección de errores del Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)*. [BOE 051 de 28/02/2008, Sec. 1, p. 12002-12004](http://www.boe.es/boe-datos/BOE-A-2008-05112.html).
- Ministerio de Vivienda, 2006. *Código Técnico de la Edificación, (CTE)*. BOE 74 de 28/03/2006, p.11816-11831
- MHyLab, SCPTH, ESHA, 2005. *Checklist sobre minihidráulica. Estudio de Prefactibilidad de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos*. www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/publications/checklist-ES-2005.pdf
- Ochoa, A., 1994. Estudio de la subsidencia minera relacionada con ampliación y nueva explotación sobre la capa 30 de Minas de Figaredo S.A., en Santa Cruz de Mieres (Asturias). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Madrid
- Ochsner, K., 2008. *Geothermal Heat Pumps. A guide to Planning&Installing*. Edit. Earthscan 2008.
- Ordóñez A., Andrés C., Jardón S., Álvarez R., Pendás F., Loredó J., 2009. *Aprovechamiento de las aguas subterráneas como recurso hídrico y energético*. Universidad de Oviedo. Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Fundación MAPFRE. Convocatoria 2008 de Ayudas a la Investigación. Área temática: Medio Ambiente
- Penche C., 1998. *Manual de Pequeña Hidráulica*. Comisión Europea. Dirección General de Energía (DG XVII). European Small Hydropower Association (ESHA).
- Pendás, F.; Loredó, J.; Ordóñez, A. (2002). *Exploración, evaluación y explotación de metano en capas de carbón*. Ed. Instituto Geológico y Minero de España, Vol. 1, 224 p.
- Pendás, F.; Loredó, J. (2006). *El agua en los procesos de cierre de minas en Asturias*. Actas de la Reunión Científico-Técnica "Gestión del agua en los procesos de cierre de minas". E.T.S. Ingenieros de Minas. Universidad de Oviedo.
- Peredo, J.; Ortiz, A.; Renedo, C., 2007. *Integración de la bomba de calor en superestructuras de almacenamiento térmico*. Ingeniería química, N°. 447, 2007 , pags. 136-149
- Rambaud, P., Del Olmo, A., Pernia, L., Ramírez, O., Celada, B., Campos, 1986. *Hundimientos Mineros*. IGME.
- Renedo, C; Ortiz, A.; Peredo, J., 2004. *Recuperación energética mediante almacenamiento térmico en procesos "batch"*. Ingeniería química, N°. 418, 2004 , pags. 184-204
- RETScreen® International, 2007. *Análisis de Proyectos de Pequeñas Hidros*. Minister of Natural Resources Canada 2001-2006. www.retscreen.net/es/t_training.php
- Rogoz, M., 1978. *Water capacity of abandoned working in underground coal mines*. Actas de la Conferencia Internacional: Water in Mining and Underground Works. SIAMOS, Granada (Spain).
- Ryznar, J.W., 1944. *A new index for determining the amount of calcium carbonate scale formed by a water*. Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 36, 472-473.
- TRANE, 2010a. *Enfriadoras de líquido con compresor de tornillo de la Serie R. Modelo RTWB 207-224*. [http://doc.trane-eur.com/Marketing/CdTrane.nsf/PdfByName/RLC-PRC002-ES_1003.pdf/\\$file/RLC-PRC002-ES_1003.pdf](http://doc.trane-eur.com/Marketing/CdTrane.nsf/PdfByName/RLC-PRC002-ES_1003.pdf/$file/RLC-PRC002-ES_1003.pdf)
- Torrero Gras, P.; Torrero Sales, P., 2005. *Mayor eficiencia energética en plantas enfriadoras agua/agua con aprovechamiento integral del calor del ciclo de compresión produciendo frío y calor simultáneo para instalaciones a 4 tubos*. Frío-calor y aire acondicionado, 370: 12-23.
- Torrero Gras, P (2008). *Edificio Autoridad Portuaria de Valencia*. Fundación Estudios Calidad Edificación Asturias (FECEA). Jornada sobre el agua como energía para la edificación. www.fecea.org/noticias_fecea.php?id=69
- Watzlaf, G.R., Ackman, T.E., 2007. *U.S. Mining Regions –The Saudia Arabia of Geothermal Energy*. 10th Annual Electric Utilities Environmental Conference. The Westin La Paloma. Tucson, Arizona.