

# Estudio de Viabilidad al Sustituir el Sistema de Almacenaje Convencional por una Pequeña Central Hidráulica Reversible

Nil Llopis Vilar, Herminio Martínez-García, Encarna García-Vílchez, Francisco Casellas-Beneyto

*Electronics Engineering Department*

*Eastern Barcelona School of Engineering (EEBE)*

*Technical University of Catalonia (UPC), BarcelonaTech*

Barcelona, Spain

[herminio.martinez; francisco.casellas}@upc.edu](mailto:herminio.martinez; francisco.casellas}@upc.edu)

**Resumen**—El presente trabajo presenta el estudio de viabilidad donde se analiza si es posible sustituir las baterías convencionales que se utilizan para almacenar la energía eléctrica en las microrredes eléctricas (*microgrids*, MG) aisladas por otro tipo de acumulación de energía. La propuesta es el almacenaje de energía mediante una pequeña central hidráulica reversible. Para este estudio, se realiza el diseño de esta instalación propuesta en una vivienda unifamiliar y se calculan y simulan los flujos energéticos de esta microrred. Los resultados obtenidos muestran el posible estudio de viabilidad así como sus mejoras, teniendo en cuenta rendimiento global de la instalación y presupuesto que conlleva implantarla. Para encontrar un límite de viabilidad, se estudia que, sobredimensionando la fuente de generación eléctrica, que en este caso de estudio son unos paneles solares fotovoltaicos, el bajo rendimiento no afecta a los flujos de potencia demandados por la vivienda y la instalación en sí no tiene que ser tan grande por lo que no hace falta acumular tanta energía y, en consecuencia, no requiere de un presupuesto tan elevado.

**Palabras clave**—Almacenaje energía eléctrica, central hidráulica reversible, micro-red inteligente, autoconsumo.

## I. INTRODUCCIÓN.

Las centrales hidroeléctricas de bombeo forman parte de un tipo especial de central hidroeléctrica que tienen dos embalses (si son de gran producción) o depósitos (si son mini o microcentrales) de almacenamiento. El agua contenida en el embalse situado en el nivel más bajo —embalse inferior—, es bombeada durante las horas de menor demanda eléctrica al depósito situado en la cota más alta —embalse superior—, con el fin de turbinarla, posteriormente, para generar electricidad en las horas de mayor consumo eléctrico. Por tanto, estas instalaciones permiten una mejora en la eficiencia económica de la explotación del sistema eléctrico al almacenar electricidad en forma de agua embalsada en el depósito superior. Constituye en la actualidad la forma más económica de almacenar energía eléctrica.

El objetivo del presente trabajo consiste en el estudio, a

partir del conocimiento y análisis previo del flujo de energía eléctrica de una batería trabajando en una microrred (MG) inteligente aislada con utilización de energías renovables, modelar una pequeña central hidráulica reversible como alternativa al almacenamiento de energía. Para modelar esta central y ver si es viable realizarlo o no, se estudian caudales volumétricos, dimensiones de los depósitos, alturas necesarias, tipo de turbina y/o bomba hidráulica, se calculan todo tipo de pérdidas y el rendimiento del ciclo completo, tanto hidráulico como eléctrico. Además, se realiza un estudio económico para conocer el coste de su posible implantación en una MG doméstica.

Por último, en el caso de obtener una negativa a la viabilidad del estudio, se buscan los parámetros necesarios a cambiar u otras posibles alternativas para encontrar el límite donde este estudio si sería viable.

## II. ESCENARIO INICIAL.

### A. Selección Escenario Inicial.

Como escenario previo para el estudio de los flujos de energía eléctrica se parte de [1]. En este trabajo, se estudia la necesidad de hacer frente al agotamiento de los combustibles fósiles y la contaminación medioambiental proponiendo una instalación alimentada con energías renovables y la posibilidad de almacenar energía a partir de un sistema de acumulación de esta gracias a baterías.

El caso práctico de este estudio lo diseña para una vivienda situada en Mallorca, concretamente en la localidad de Porreres.

### B. Datos de Interés.

A partir del diseño realizado en [1], los datos de interés son los flujos de potencia eléctrica de las baterías. A partir de las simulaciones, se puede conocer el estado de carga de éstas y con ello calcular las potencias de carga y descarga que requiere el sistema de almacenamiento y la energía total a acumular.

### III. INSTALACIÓN BAJO ESTUDIO.

#### A. Descripción de la Instalación.

El sistema de almacenamiento de energía eléctrica consiste en una pequeña central hidráulica reversible; es decir, la instalación consiste en la transformación de la energía eléctrica en energía potencial como nueva forma de almacenamiento de energía.

Para poder llevar a cabo esta conversión, la instalación está formada por dos depósitos de agua (Fig. 1), situados a alturas diferentes el uno respecto del otro. De este modo, cuando las placas solares fotovoltaicas generan un excedente de energía eléctrica, esta energía se utiliza para bombear agua desde el depósito de abajo hacia el depósito de arriba mediante una bomba hidráulica, almacenando así la energía que en un principio había sido eléctrica y pasa por mecánica y cinética, en, finalmente, energía potencial. De igual manera, cuando la vivienda unifamiliar tiene una demanda de consumo que las placas solares fotovoltaicas no pueden cubrir (ya sea por inexistencia de radiación solar o por insuficiente de ésta), la energía potencial se convierte en cinética cuando cae del depósito situado a mayor altura hacia el inferior, posteriormente en mecánica gracias a una turbina hidráulica y finalmente en eléctrica gracias a un generador acoplado a la turbina.

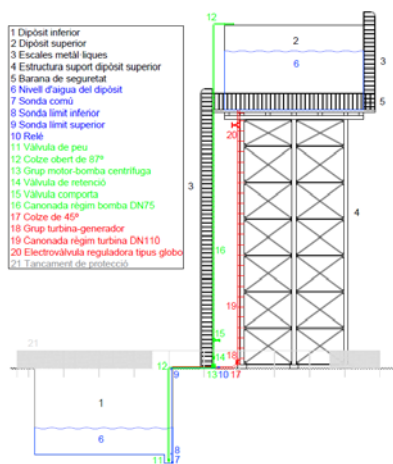


Fig. 1. Esquema detallado del diseño de la instalación.

El fluido de trabajo para todas estas transformaciones energéticas es el agua. Se escoge este fluido, aunque no es el que tiene una viscosidad cinemática más baja [2] con lo que evitar grandes pérdidas por rozamiento del fluido con las paredes de los conductos y otros, porque como se necesita una gran cantidad para poder almacenar mucha energía potencial, resulta económicamente viable, ya que el precio es claramente inferior al resto de fluidos.

#### B. Funcionamiento de la Instalación.

En la anterior Subsección III.A ya se ha hecho un breve avance del principio de funcionamiento de esta instalación, pero en esta subsección se profundizará más.

El primer punto a tener en cuenta es cada una de las fuentes

de consumo o generación en qué estados pueden trabajar y en cuáles no; para ello se realiza previamente un diagrama de bloques (ver Fig. 2) y a continuación una tabla de estados (ver Tabla I).

Para la tabla de estados, en el caso de las placas solares fotovoltaicas toma valor 1 si generan electricidad y valor 0 en caso contrario; para la instalación de almacenaje toma valor -1 si acumula, 0 si está en pausa y 1 si genera; para el consumo de la vivienda toma valor -1 si consume y valor 0 en caso contrario.

De la Tabla I se aprecia que la puesta en marcha de la instalación de almacenamiento se inicia cuando el consumo eléctrico de la vivienda unifamiliar es superior a la generación fotovoltaica o cuando, esta última, tiene una generación por encima del consumo eléctrico. Cuando pasa esto, se distingue el régimen donde se turbinan y el régimen donde se bombea, respectivamente.

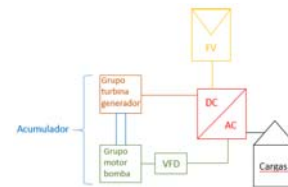


Fig. 2. Diagrama de bloques con las conexiones pertinentes de la microrred alrededor de la instalación bajo estudio.

TABLA I  
TABLA DE ESTADOS DE LA MICRORRED

Placas solares	Instalación de almacenaje	Consumo vivienda	Estado
0	-1	-1	Imposible
0	-1	0	Imposible
0	0	-1	Imposible
0	0	0	Posible
0	1	-1	Posible
0	1	0	Imposible
1	-1	-1	Posible
1	-1	0	Posible
1	0	-1	Posible
1	0	0	Imposible
1	1	-1	Posible
1	1	0	Imposible

En el caso de régimen donde se turbinan, la insuficiencia de generación eléctrica es detectada por el sistema de control descrito en la Subsección VII.B, que dará la orden a la electroválvula de abrirse hasta el punto de trabajo adecuado. De esta manera empieza a circular caudal de agua del depósito superior hacia el inferior por la tubería diseñada. Este caudal es el encargado de transformar la energía potencial que se tenía en el depósito superior por energía cinética. Con la micro-turbina, la energía cinética se transforma en energía mecánica de rotación; el agua sale de la turbina y cae directamente al depósito inferior para ser almacenada. Por otra parte, la energía mecánica de rotación que se tiene en la turbina, gracias al acoplamiento directo con un generador de corriente continua y con la existencia de un regulador de carga conectado a este, produce la energía eléctrica necesaria. Esta

pasa primero por el inversor ya existente en la instalación inicial, y sale en forma de corriente alterna a 230 V y 50 Hz para poder abastecer los consumos. El sistema de control verifica que se esté proporcionando la generación de corriente adecuada al consumo deseado siendo a lazo cerrado.

Por otra parte, se tiene el caso de régimen donde se bombea. Este caso se produce cuando la generación eléctrica proporcionada por los paneles solares fotovoltaicos es superior al consumo o no hay consumo. Teniendo esta situación, la energía excedente de la generación sale del inversor por una salida llamada *reserva* también en forma de corriente alterna a 230 V y 50 Hz, pasa por un variador de frecuencia que permite la regulación de ésta y sale a tensión trifásica: la tensión necesaria para poder trabajar el motor que impulsa la bomba. Este grupo motor-bomba transforma la energía eléctrica en mecánica y la transmite al agua en forma de cinética para, finalmente, obtenerla a gran altura y así poder almacenarla como energía potencial. La cantidad de energía eléctrica que llegue al grupo motor-bomba será variable y eso afecta al correcto funcionamiento de éste; por este motivo, se dispone del variador de frecuencia, ya que permitirá que el grupo pueda seguir trabajando con potencias más bajas y el agua pueda ser bombeada igualmente con caudales volumétricos inferiores.

#### IV. RÉGIMEN DONDE SE TURBINA.

##### A. Datos y Limitaciones.

Como se justificaba en la Subsección III.A, el fluido de trabajo es el agua y se encuentra a condiciones estándar de presión y temperatura, 25 °C y 1 atm [3]. La densidad del agua en estas condiciones es igual a 997,048 kg/m<sup>3</sup> [4] y la viscosidad dinámica es 0,000891 Pa·s [5].

Para los cálculos, la potencia hidráulica depende del caudal volumétrico y de la altura manométrica y, a su vez, estos dos parámetros, de la velocidad. Así pues, si dada una potencia eléctrica deseada, se requiere conocer estas dos magnitudes, al depender la una de la otra, resolverlo con un método analítico no se ve viable y por ello se utiliza un método numérico donde se implanta un proceso de iteración hasta conseguir un resultado que se considere suficientemente correcto.

##### B. Diseño de la Instalación donde se Turbina.

1) *Cálculo Altura Geométrica*: Corresponde a la diferencia de altura entre el nivel de aguas arriba y el nivel de aguas abajo de la instalación [6]. El nivel aguas abajo siempre será el mismo, ya que lo marca la boca de entrada a la turbina y se considera que se encuentra a la altura 0 metros; pero el nivel aguas arriba es no estacionario debido a que el nivel del depósito superior cambia a medida que se va llenando y vaciando.

2) *Cálculo Altura Dinámica*: Es el resultado de la caída de presión cuando un líquido circula por el interior de una tubería, es decir, corresponde a las pérdidas por rozamiento pared-fluido [7]. Se calcula con la fórmula de Darcy-Weisbach [8] por ser una de las fórmulas más exactas para

cálculos hidráulicos teniendo régimen turbulento:

$$h_{dinámica} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad (1)$$

- *g*: La gravedad para una latitud de 39° 32' 7,89", a partir de la fórmula que desarrolló Jacobi [9] es de 9,801 m/s<sup>2</sup>.
- *D*: No se utiliza el método de cálculo del diámetro mínimo, sino que se prueban reiteradamente diferentes diámetros de tuberías normalizados y se escoge aquel que resulta ideal para la instalación. Las tuberías se cogen de PVC por ser las que tienen más bajo coeficiente de rugosidad absoluta [10]. Se obtiene que resultan ideales las tuberías de DN110 con grosor de 3,2 mm.
- *L*: La longitud geométrica de la tubería más las longitudes equivalentes de los accesorios equiparadas mediante nomogramas. Para el régimen donde se turbinan sólo hay una electroválvula reguladora de caudal de tipo globo cuya longitud equivalente conociendo el diámetro de la tubería y con el nomograma que se presenta en [8] es de 31 m, obteniendo así una longitud total de 46 m.
- *v*: La velocidad del fluido al paso por la tubería dependerá del caudal volumétrico que permita la electroválvula reguladora de caudal.
- *f*: Para el cálculo del coeficiente de fricción se escoge la ecuación de Colebrook-White, válida para todo tipo de flujos y rugosidades por ser la más exacta y universal [8]. De esta expresión, Re es el número de Reynolds y  $\epsilon/D$  es la rugosidad relativa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{\epsilon}{3,71 D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

Para el estudio, el cálculo iterativo que requiere esta ecuación se realiza 4 veces consiguiendo una precisión de hasta 4 decimales y tomando un valor inicial de  $f=1$ .

3) *Cálculo Altura Total o Manométrica*: Es la altura geométrica menos la altura dinámica.

4) *Potencia Hidráulica sobre la Turbina*: Hace referencia a aquella potencia que puede absorber la turbina y de la que una parte posteriormente se convertirá potencia mecánica de rotación. Su cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación donde  $\rho$  es la densidad del agua y  $Q$  es el caudal volumétrico:

$$P_{hidráulica, Turbina} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h_{total} \quad (3)$$

5) *Rendimiento grupo Turbina-Generador y Potencia Eléctrica*: El rendimiento se obtiene de la curva característica del grupo y este, multiplicado por la potencia hidráulica sobre la turbina permite obtener la potencia eléctrica.

6) *Selección Turbina-Generador*: Se ha optado por el tipo de mini turbina que incorpora un generador. El modelo escogido es la turbina HE tipo Inline de la empresa *Tecnoturbinas*. El generador que incorpora un regulador de carga, permitiendo una tensión de trabajo constante. El modelo permite diferentes tensiones de salida; escogiendo la de 48 V ya que es la nominal del inversor.

## V. RÉGIMEN DONDE SE BOMBEA.

### A. Datos y Limitaciones.

Se mantienen igual las condiciones estándares de trabajo, con lo que la densidad del agua y la viscosidad dinámica también. Se sigue utilizando un método de cálculo numérico.

### B. Diseño de la Instalación donde se Bombea.

1) *Cálculo Altura Geométrica:* Es la distancia geométrica desde el nivel del agua en el depósito inferior hasta el punto más alto donde se debe bombear el agua [13]. En la instalación, el punto más alto hasta donde se debe bombear siempre será el mismo, ya que lo marca la boca de salida hacia el depósito. En cambio, el nivel aguas abajo no es estacionario debido al cambio de nivel del depósito inferior a medida que se va llenando y vaciando.

2) *Cálculo Altura Dinámica:* Igual que en la Subsección IV.B.2) y utilizando también la ecuación (1), donde la gravedad sigue siendo la misma y el cálculo de la velocidad y el factor de fricción se realizan de igual manera. El diámetro ideal en este régimen resulta ser para tuberías de PVC con DN75 y grosor de 3,0 mm. La longitud total teniendo en cuenta la longitud geométrica, las longitudes equivalentes equiparadas con [8] y [11] de 2 codos de 87°, una válvula de retención, una válvula de atajadera abierta, una válvula de pie y una sumergencia mínima para cumplir con los requerimientos hidráulicos e impedir el ingreso de aire en la tubería [12] resulta ser de 42,379 m.

3) *Cálculo Altura Total o Manométrica:* Es la altura geométrica, más la altura dinámica y más el abatimiento, siendo este último calculado como un valor aproximado del 10% de la altura total.

4) *Potencia Hidráulica:* Es aquella potencia que debe vencer la bomba para poder darle al fluido la energía necesaria para subir del depósito inferior al superior [13]. Para el cálculo sirve la misma ecuación (3).

5) *Rendimiento grupo Motor-Bomba y Variador de Frecuencia y Potencia Eléctrica:* El rendimiento también se obtiene de la curva característica del grupo y este, dividiendo la potencia hidráulica junto con el rendimiento del variador de frecuencia permite obtener la potencia eléctrica.

6) *Selección Motor-Bomba y Variador de Frecuencia:* Se ha optado por una bomba centrífuga. El modelo escogido es la MN40-200B de la empresa Bombas Saci. El motor que incorpora es de corriente alterna trifásica a 220 V – 50 Hz. Como el caudal volumétrico a bombear es variante, ya que dependerá de la potencia eléctrica que se haya de almacenar, entre la salida del inversor y la entrada al grupo motor-bomba se incorpora un variador de frecuencia que permitirá la regulación del mismo. Para la selección del variador de frecuencia se ha escogido el modelo AT1-05K5X de la cadena VCO BOP2.

## VI. DISEÑO DE LOS DEPÓSITOS DE ALMACENAJE.

Tal y como se mostraba en la Fig. 1, el depósito inferior está enterrado en el suelo, por lo que se aprovecha mejor la

diferencia de alturas y, el superior, está elevado gracias a una estructura de apoyo. Se ha encontrado una empresa china que se dedica a hacer depósitos de agua elevados formados por mini-tanques y a medida del proyecto: formatos, alturas, estructuras, orificios, material y tamaño pueden ser escogidos. Para el caso objeto de estudio, la instalación requiere de 320 m<sup>3</sup>. Se seleccionan los mini-tanques de 1×1×1 m<sup>3</sup> de material FRP, por lo que en total serán necesarios 640. Tendrán una estructura elevada a 15 m sobre el nivel del suelo montada sobre una losa. El depósito inferior se separa tres metros de esta estructura de soporte de manera que no pueda verse afectado por el peso ni pueda recibir presiones externas. Por otra parte, la disposición de los mini-tanques será de 8×8×5, estarán interconectados entre ellos y tendrán los orificios con diámetros calculados los dos regímenes. Por último, para cumplir con la sumergencia mínima, un mini-tanque extra de 0,5×0,5×0,5 m<sup>3</sup> será colocado debajo del depósito inferior siendo allí donde estará la válvula de pie; es decir, la boca de absorción de agua del régimen de bombeo.

## VII. OTRAS PARTES DE LA INSTALACIÓN.

### A. Boya.

Como el volumen de agua total es siempre el mismo y es conocido, para el correcto funcionamiento de la instalación, con tener controlado uno de los depósitos es suficiente. Se controla el depósito inferior y se supervisa que no se sobrepase el nivel mínimo ni el máximo utilizando un relé y varias sondas (modelos AKO-53.171 y AKO-53173 de la empresa AKO, respectivamente). Cuando el nivel mínimo está al límite, el relé colocado entre el variador de frecuencia y el grupo motor-bomba para el motor de la bomba. En el caso contrario, no importa alcanzar el límite superior, ya que, el volumen de control es conocido y los depósitos ya han sido diseñados para que tengan la capacidad para almacenar toda el agua del circuito y el relé no da ninguna orden porque el propio grupo turbina-generator deja de generar corriente eléctrica al no recibir más caudal de agua. Por último, hay una tercera sonda encargada de la conexión a tierra porque los mini-tanques son de FRP y al ser aislante sí es necesaria la sonda común.

### B. Control.

El sistema de control de la instalación de almacenamiento no se modeliza porque escapa el objeto y alcance del estudio. Consistiría en un *hardware* (concretamente un mini PLC de Siemens) con su correspondiente *software* que regulará en lazo cerrado la energía para el régimen donde se turbinará, emitiendo órdenes para abrir adecuadamente la electroválvula y así producir corriente eléctrica. Para poder conocer cuál es el grado de apertura, este sistema de control necesita sensores no binarios, ya que se quiere saber qué valor tiene el consumo. Conociendo el valor total de las cargas y la potencia que están generando las placas solares fotovoltaicas, este sistema de control podrá saber qué potencia debe generar.

### C. Accesorios y Extras.

Otros elementos de la instalación de almacenamiento son las abrazadoras que sujetarán las tuberías, una valla de protección y toda la instalación eléctrica que este estudio requiere siguiendo siempre las ITCs del REBT [14]: cables conductores, canalizaciones y elementos de protección.

## VIII. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

### A. Gráficos.

Tal y como se puede apreciar en la Fig. 3, por la noche sólo produce energía el régimen donde se turбина. Esta demanda tiene una cierta periodicidad y aumenta a partir de las 7:00 h. Hacia las 9:30 h, con una irradiancia solar muy alta ya, el régimen donde se turбина prácticamente desaparece y son las propias placas solares fotovoltaicas las que alimentan los consumos y queda un excedente que es la potencia que se dirige hacia la bomba. Más tarde, la potencia eléctrica a almacenar no acciona la bomba, debido a la necesidad de una mínima potencia para hacer funcionar el grupo motor-bomba; también ocurre con el régimen donde se turбина, donde para demandas pequeñas se produce una potencia eléctrica mínima.

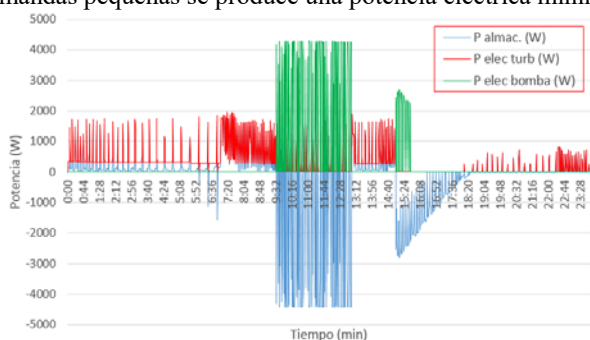


Fig. 3. Flujos de potencia eléctrica del sistema de almacenamiento.

Otro análisis es el mostrado en la Fig. 4, donde el inicio de la simulación comienza con un depósito 1 (depósito superior) lleno y, por lo tanto, un depósito 2 (depósito inferior) vacío. Se observa como el nivel de agua bombeado hacia el depósito superior es muy pequeño y que al final del día el depósito superior queda prácticamente vacío.

Un último gráfico es una comparación entre el estado de carga de las baterías de la instalación de almacenaje previa y el equivalente en esta instalación, que es el estado del nivel de agua del depósito superior. Se observa en la Fig. 5 como el perfil de la curva es bastante similar, pero en el caso del estado de carga (SOC) de las baterías, la descarga es de una tendencia poco pronunciada, mientras que en el caso del depósito superior el nivel de agua baja muy bruscamente. En cambio, cuando se obtiene la carga en las baterías, éstas se llenan con una pendiente mucho más fuerte que el caso del depósito.

## IX. VIABILIDAD DEL ESTUDIO.

Con los resultados obtenidos del análisis y con otras causas

obtenidas durante el diseño de la instalación, se puede concluir que esta pequeña central hidráulica reversible no sería, en principio, viable. Las causas son:

- La eficiencia de la instalación de almacenamiento es claramente baja (17,47%).
- La cantidad de agua necesaria, ya que se necesitan unos depósitos de capacidades muy elevadas (320 m<sup>3</sup>) y esto significa un volumen de control de 320.000 L.
- El presupuesto es de 96.677,04 €. En comparación con el coste que supone almacenar la energía de la micro-red con las baterías convencionales, es un 1420% más elevado. Con esta diferencia de costes tan significativa, la competitividad por este tipo de almacenamiento nuevo propuesto, con respecto al factor económico, lo hace no viable.
- Requerimiento de potencias mínimas de funcionamiento.
- El tiempo de respuesta cuando el sistema de control detecta la necesidad de energía eléctrica. La instalación puede tardar algunas decenas de segundos en generar corriente.

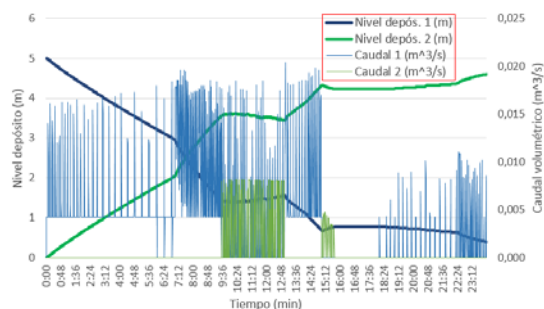


Fig. 4. Relación entre niveles de los depósitos y caudales volumétricos.

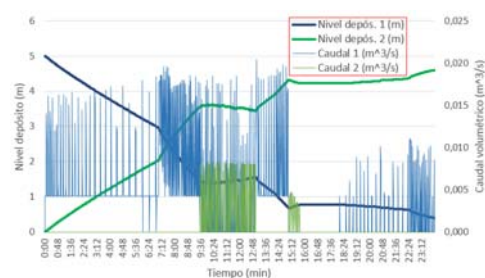


Fig. 5. Comparación SOC baterías y nivel agua depósito superior.

### A. Propuestas para la Mejora de la Instalación.

Las tres ideas principales que se propondrían son:

- Evitar colocar el depósito superior sobre una estructura de apoyo que encarece mucho la instalación. Podría utilizarse el propio desnivel del terreno, aunque después esta instalación tendría más pérdidas dinámicas. El inconveniente de esta propuesta, es que teniendo en cuenta el emplazamiento de la vivienda unifamiliar, el relieve en el que se encuentra es llano.
- Instalar en el régimen donde se bombea una segunda bomba centrífuga para evitar pérdidas por potencias mínimas. Pero no permite un significativo cambio en la eficiencia global.
- Aumentar la potencia instalada de las placas solares

fotovoltaicas. Aumentando la generación eléctrica, se consigue más excedente energético y, por tanto, poder almacenar más energía potencial. Esta propuesta parece la más viable y, por este motivo, se realiza en la siguiente subsección un estudio añadido para conocer cuál sería la potencia fotovoltaica ideal a instalar de más, como sería el diseño de este nuevo régimen donde se bombea y qué resultados se obtendrían de esta nueva instalación.

### B. Propuesta de Mejora: Aumento Potencia Fotovoltaica Instalada.

Se aumenta en 3 kW pico la potencia de los paneles y se calculan los nuevos flujos de potencia. Se realiza de nuevo el diseño del régimen donde se bombea ya que ahora se tendrán potencias eléctricas que almacenar mayores y se deja igual el del régimen donde se turbinan. Se siguen exactamente los mismos pasos que con la Sección V y se escogen un nuevo diámetro de tuberías con sus accesorios actualizados, un nuevo grupo motor-bomba y un nuevo variador de frecuencia. Se realizan de nuevo los análisis y se da por correcto el aumento escogido (ver Fig. 6).

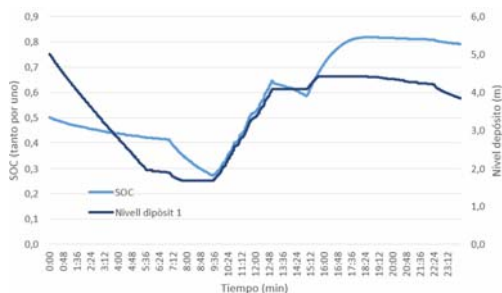


Fig. 6. Comparación entre el SOC y el nivel de agua del depósito superior.

Con la nueva propuesta, a pesar del bajo rendimiento global y la pérdida energética por potencias mínimas de arranque, sí permite el correcto funcionamiento de la instalación cubriendo dos de los 5 motivos por lo que se consideraba no viable el estudio inicial. En adición, afecta positivamente a 2 de los otros 3 motivos restantes. Como el almacenamiento es viable, ya no se necesitan unos depósitos tan grandes para cubrir la demanda energética, haciendo que la cantidad de agua necesaria descienda un 43,75% (ahora son necesarios 180 m<sup>3</sup> de agua). El segundo factor afectado positivamente va directamente ligado; como se necesitan menos depósitos, el término de los depósitos en el presupuesto se ve alterado y, como consecuencia, se reduciría en un 42,64% (concretamente, bajaría a 46.468 €).

## X. CONCLUSIONES.

Las grandes centrales hidráulicas reversibles sí son una buena opción para el equilibrio eléctrico de la red principal, gracias a la opción de almacenamiento de energía durante picos de generación o periodos de bajo consumo y generación a la inversa, entre otros factores de interés que permiten; pero extrapolando esto a pequeña escala, como método de

almacenamiento de energía eléctrica, se recomienda de cara a estudios futuros buscar otros tipos de instalaciones o sistemas, ya sean electroquímicos como es el caso de las baterías, mecánicos como es el caso de la batería inercial, o térmicos, entre otras muchas opciones que con el paso del tiempo y los estudios irán surgiendo.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICINN)-Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Gobierno Español, y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del proyecto PGC2018-098946-B-I00.

## REFERENCIAS

- [1] Andreu i Julià, Caterina. Diseño de un sistema de gestión de energía para una vivienda unifamiliar. Trabajo final de Grado, UPC, Grado en Ingeniería Eléctrica, 2017.
- [2] Frank M. White. Mecánica de fluidos. 5ta Edición. Aravaca (Madrid): McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U., 2004. Traducido de la quinta edición en inglés de Fluid Mechanics por McGraw-Hill, Inc, 2003. ISBN 10: 0072402172. ISBN 13: 9780072402179.
- [3] Condiciones estándar de presión y temperatura - Wikipedia, la enciclopedia libre. A: [en línea]. [Consulta: 23 noviembre 2019]. Disponible en: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Condicions\\_estàndard\\_de\\_pressió\\_i\\_temperatura](https://ca.wikipedia.org/wiki/Condicions_estàndard_de_pressió_i_temperatura).
- [4] Colt, J. Dissolved Gas Concentration in Water: Computation as Functions of Temperature, Salinity and Pressure [en línea]. Second Edi. Seattle USA: 2012. [Consulta: 23 noviembre 2019].
- [5] VaxaSoftware - Recursos educativos de Matemáticas, Física, Química. A: [en línea]. [Consulta: 23 noviembre 2019]. Disponible en: [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui.html](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui.html).
- [6] Neva Rodríguez, Á. y Charry López, H. TURBINAS HIDRÁULICAS I (ACH03). A: [en línea]. [Consulta: 24 noviembre 2019]. Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/8837496/>.
- [7] Bloque I, Sistemas de ESF: Dimensionado de Instalaciones para Sistemas de Bombeo. ENRE, Energías Renovables-295302. Grado de Ingeniería de la Energía, Departamento de Ingeniería Electrónica, Herminio Martínez García.
- [8] Cálculo de pérdidas de carga en tuberías. TDFE, Transporte y distribución de fluidos energéticos-820330. Grado de Ingeniería de la Energía, Francisco Estrany Coda.
- [9] Energía Eólica, *Gesamt-Skriptum zur Vorlesung Windenergie. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Elektrod und Informationstechnik*, Prof. Ddr.-Ing. Oliver Brückl.
- [10] Meadros, Michael E.; Walski, Thomas M.; Barnard, Thomas E.; Durrans, S. Rocky. *Computer Applications in Hydraulic Engineering. 5th Edition* (CAIHE). Atwood, CA, Estados Unidos de América; U.S.A. Haestad Methods Inc, 2002. ISBN 10: 0971414149. ISBN 13: 9780971414143.
- [11] Accesorios de tubería para agua. Nomograma de pérdida de carga secundaria de la firma Gould Pumps, U.S.A.
- [12] Organización Panamericana de la salud y COSUDE. Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable. A: [en línea]. Lima: 2005. [Consulta: 28 noviembre 2019]. Disponible en: [https://www.academia.edu/33709488/GU%C3%8DAS\\_PARA\\_EL\\_DISE%C3%91O\\_DE\\_ESTACIONES\\_DE\\_BOMBEO\\_DE\\_AGUA\\_POTABLE](https://www.academia.edu/33709488/GU%C3%8DAS_PARA_EL_DISE%C3%91O_DE_ESTACIONES_DE_BOMBEO_DE_AGUA_POTABLE).
- [13] Ingemeccánica. Instalaciones de Bombeo de Agua. A: [en línea]. [Consulta: 25 noviembre 2019]. Disponible en: <https://ingemeccanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html>.
- [14] España. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Orden 18099, sobre el Reglamento electrotécnico para baja tensión y las instrucciones técnicas complementarias (ITC) BT 01 a BT 51, aprobado por el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto. A: Boletín oficial del Estado. Madrid: BOE, 18 septiembre 2002, ITC-BT-19, ITC-BT-21 i ITC-BT-40. ISSN 978-84-283-3810-3.