

## Energy production exploiting “Water Hammer” effect

*Antón Benito, Carlos (ORCID: 0000-0001-9485-5138);Margaretto Díaz, Tamara (0000-0003-3157-8289) (\*)*

*Abstract*— the aim of this work is to analyze the possibilities to obtain energy by using the “Water Hammer” effect. It is based on a modified and improved “Ram Pump” design. Main components of the project are the following: a Permanent Magnet Generator (PMG), a DC Boost Converter and a Grid Tie Inverter (GTI). The energy obtained is dumped into the electric grid with the GTI in order to supply the customers. In order to validate proposals included in this work several PAIM simulations have been done.

*Index Terms*— Renewable energy, Water Hammer, Ram Pump, Permanent Magnet Generator (PMG), Grid Tie Inverter (GTI)

(\*) All authors are from University of Oviedo. Electronic Engineering students. (Phone number: +34 627 795 924) Campus de Viesques– ES-33204 - GIJON – ASTURIAS – SPAIN. *E-mail of authors:* Antón Benito, Carlos is the corresponding author (UO250395@uniovi.es),MargarettoDíaz, Tamara (UO246477@uniovi.es).

## I. INTRODUCTION

En la actualidad, la demanda energética es cada vez mayor debido a la continua innovación tecnológica. A su vez, no todas las formas de obtención de energía empleadas hoy en día son eficientes o renovables. El tránsito a las energías renovables, a pesar de la escasez de los combustibles fósiles, se encuentra lastreado por la gran carga económica que supone este cambio. La tecnología que apoya la obtención de energía, capaz de competir con el poder de los combustibles, está lejos de ser un producto asequible para el conjunto de la población.

De este problema nace la idea de obtener un sistema de generación de energía limpia, que a su vez sea de fácil adquisición. Con este planteamiento se ha investigado el aprovechamiento del efecto del “golpe de ariete” para la generación de energía.

El efecto de “golpe de ariete” o “pulso de Zhukowski” es resultado del comportamiento elástico del fluido: al cerrar una válvula rápidamente, las partículas detenidas son empujadas por sus anteriores que siguen aún en movimiento, provocando una sobrepresión que se desplaza a lo largo de la tubería. Esta sobrepresión es capaz de alcanzar valores que rondan entre sesenta y setenta veces la presión normal de la tubería y superar la velocidad del sonido. Es, junto con la cavitación, una de las principales causas de averías en las instalaciones hidráulicas.

Este efecto fue utilizado por primera vez en 1772 en una aplicación de accionamiento manual ideada por John Whitehurst. Este invento al que se le denominó motor de pulsación fue modificado y mejorado por el francés Joseph Michel Montgolfier, el cual, patentó el diseño que hoy en día conocemos como “Bomba de ariete”.

El funcionamiento del dispositivo es simple; partiendo de un volumen de agua a cierta altura se hace descender de manera que adquiere la velocidad necesaria para que cierre la válvula 1 (normalmente abierta). Este cierre repentino provoca que la presión en la tubería crezca, lo que a su vez produce una fuerza vertical en la válvula 2 (normalmente cerrada). Cuando se igualan las presiones, ambas válvulas vuelven a sus estados iniciales, comenzando de nuevo el ciclo. A pesar de que el funcionamiento es por impulsos, la salida del agua en la bomba es continuo.

El dispositivo que se ha ideado consiste en aprovechar la sobrepresión que se crea en la tubería para el producir la elevación de un pistón que, unido a un mecanismo de biela-manivela, induce un movimiento rotatorio en el eje de un generador eléctrico.

## II. OBJETIVOS

El objetivo final del proyecto es conseguir alimentar una línea de distribución trifásica utilizando un generador que aprovecha el citado efecto. A partir de un motor trifásico de imanes permanentes (PMG: Permanent Magnet Generator) se obtendrá una tensión principal con la que trabajar. Esta tensión al pasar por un rectificador transformará la señal alterna que da el motor a una señal continua, que, con un circuito electrónico, se elevará a cuatrocientos voltios con una tolerancia de más menos cincuenta voltios. Finalmente se realizará una transformación de potencia consistente en un inversor, para poder inyectar la potencia generada a la red eléctrica.

## III. BASE TEÓRICA

Como se ha dicho en las líneas anteriores, se hace uso del diseño de la bomba de ariete de Joseph Michel para, mediante a unas pequeñas modificaciones cumplir con el objetivo deseado. En primer lugar, se elimina la cámara de aire que permite mantener la presión en la tubería de subida del agua. En su lugar se colocaría un elemento de canalización del agua sobrante. Además, es necesario sustituir la válvula (2) que se encuentra normalmente cerrada por un pistón. En la figura 1.a se puede ver la bomba de ariete mientras que en la imagen 1.b se ve el mecanismo modificado.

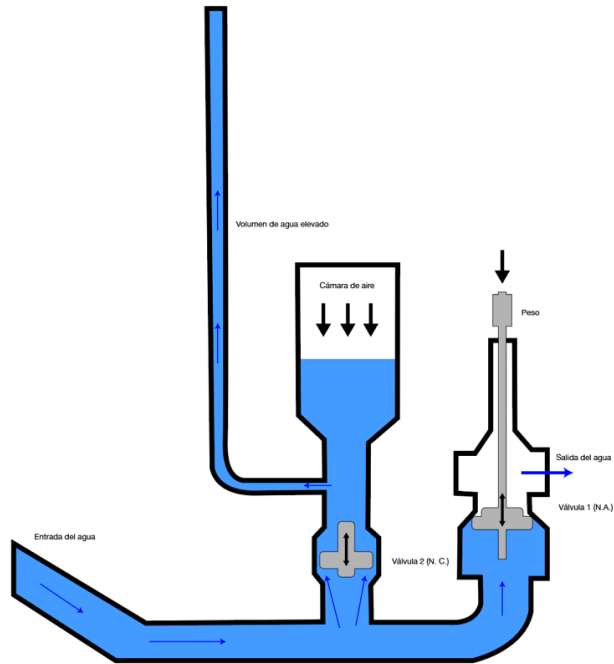


Fig 1.a: Esquema de una bomba de ariete

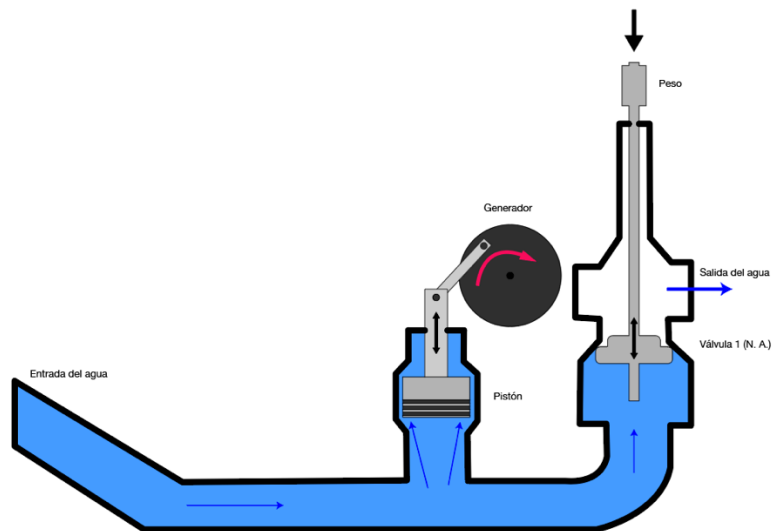


Fig 1.b: Esquema de la bomba de ariete modificada

#### IV. BALANCE DE POTENCIA Y ENERGÍA

En esta sección se explica el proceso que se ha seguido en el modelado matemático del sistema, es necesario destacar que, todo este desarrollo se fundamenta en unos cimientos teóricos. Con esto se trata de explicar que aun no se ha demostrado la viabilidad del proyecto y, por tanto, solo se trata de ilustrar un posible modelo de funcionamiento del sistema. Para llevarlo a cabo se han hecho una serie de simplificaciones que alejan los resultados que se muestran de los que realmente se darían en el equipo.

Se parte de que la potencia almacenada en el agua viene dada por la ecuación (1):

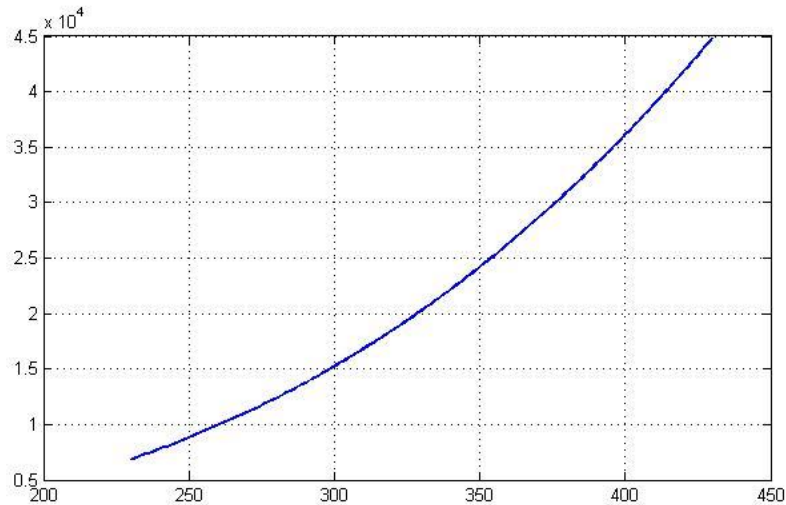
$$Potencia = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1)$$

Donde el área A es el que ocupan las aspas de la turbina, que sustituiremos por el área interior de la tubería utilizada, V es la velocidad del fluido y  $\rho$  su densidad.

Inicialmente, y basado en el modelo teórico de las turbinas, se asume un rendimiento máximo del ariete del 20%, y se decide como oportuno tanto un diámetro de la tubería de 0.1 metros como un radio del generador de 0.5 metros. Esta decisión se ha tomado teniendo en cuenta que el rendimiento máximo de las turbinas no supera el 59%, y que, además, generalmente los rendimientos de mecanismos con pistones rondan el 20%.

También se asume que la velocidad angular del motor es la misma que la del fluido para simplificar el modelo. Gracias a esto, podemos determinar a partir de la velocidad del fluido la velocidad angular del motor, y obtener así la potencia generada por el ariete en función de las revoluciones por minuto de éste.

La gráfica resultante (figura 1) refleja la evolución de la potencia en función de las revoluciones del generador, si este tuviese un rendimiento del 100%. También representa como aumenta la potencia almacenada en el agua según aumenta su velocidad.



*Fig 2: potencia en vatios en función de las rpm del generador.*

A la vista de la gráfica (figura 2), parece interesante centrar el estudio en torno a las 300 revoluciones por minuto (rpm), ya que el manejo posterior de potencias mayores es complicado. Se trata de un sistema de pistones, si se quiere que el coste de mantenimiento sea bajo interesa que el desgaste de estos sea mínimo y por eso se elige una velocidad de trabajo baja. Por otra parte, el equipo tiene que ser de económicamente asequible por lo que es lógico pensar que el coste crezca a medida que este tenga que manejar mayor potencia.

Tomando como referencia el modelo de turbinas, el mecanismo tendrá un punto en el que su rendimiento es máximo y, a medida que se aleja de este, el rendimiento decrece. Por esto se ha considerado un rendimiento del 20% a 330 revoluciones, y un rendimiento del 10% a 260 rpm y 400 rpm. Con estos datos se ha determinado la parábola que pasa por esos puntos para obtener el rendimiento en función de las revoluciones y que se refleja a continuación en la figura 3.

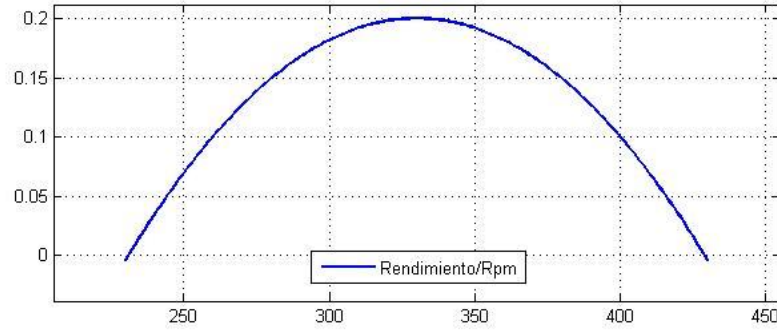


Fig 3: rendimiento en función de velocidad del generador en rpm

Finalmente, la fusión de las dos graficas en una sola (multiplicando a la ecuación 1 por el rendimiento que tendría el ariete para esa misma velocidad  $\eta$ , ecuación (2).

$$Potencia\ instantanea = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot \eta \tag{2}$$

Obteniendo como resultado la gráfica mostrada a continuación (figura 4), que refleja la potencia esperada en función de las revoluciones del generador considerando las limitaciones que podría tener en la realidad y que en este caso corresponden a lo definido previamente.

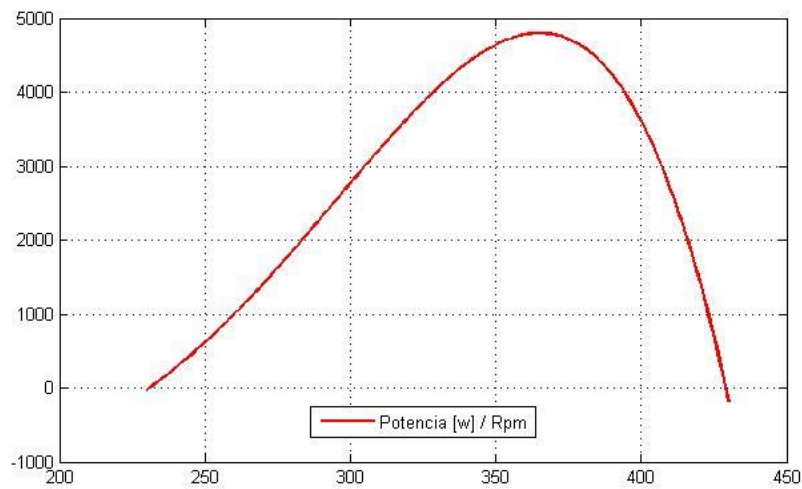


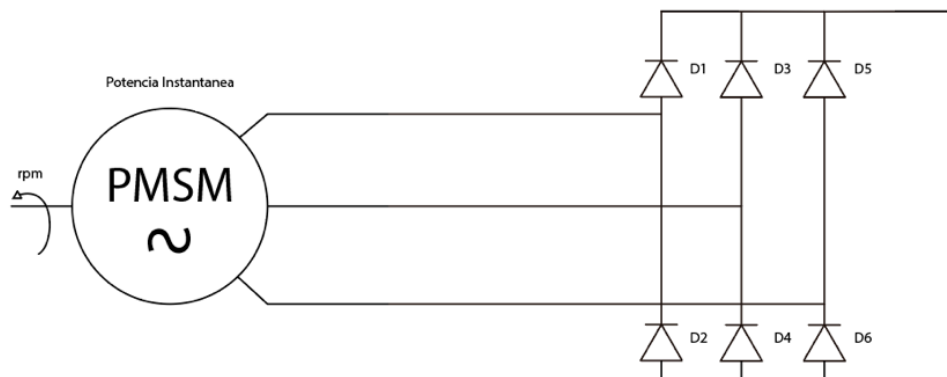
Fig 4: potencia esperada en función de las revoluciones del motor

Se ha optado por hacer un control de potencia, de manera que se limita el funcionamiento del mecanismo a trabajar en un intervalo de velocidades para que en el caso de que la velocidad se aleje del punto de rendimiento máximo el sistema quede en reposo. Con esto conseguimos que el generador se acelere demasiado y el consiguiente desgaste de los pistones. En este caso se ha escogido un intervalo de trabajo entre 260 y 423 rpm (1 kW). Trabajando a máximo rendimiento, y a una velocidad de 365 rpm se obtendría la máxima potencia (4.8 kW).

## V. FUNCIONAMIENTO GENERAL

Para poder realizar todo el circuito de potencia necesario de este proyecto, se ha dividido en tres partes bien diferenciadas.

La primera parte es un rectificador de corriente (AC – DC), que transforma la corriente alterna obtenida a partir del motor eléctrico de imanes permanentes, en corriente continua.



*Fig 5: Motor PMSM con sus tres terminales conectados al rectificador*



La segunda parte es un elevador de tensión mediante un circuito “Boost”, que tiene por entrada la corriente continua del rectificador y del cual obtenemos una tensión de salida de 400V. El circuito se compone de tres elementos, una bobina que se encarga de almacenar e inyectar la energía, un diodo que regula el flujo de la corriente y el transistor Mosfet encargado del control del elevador.

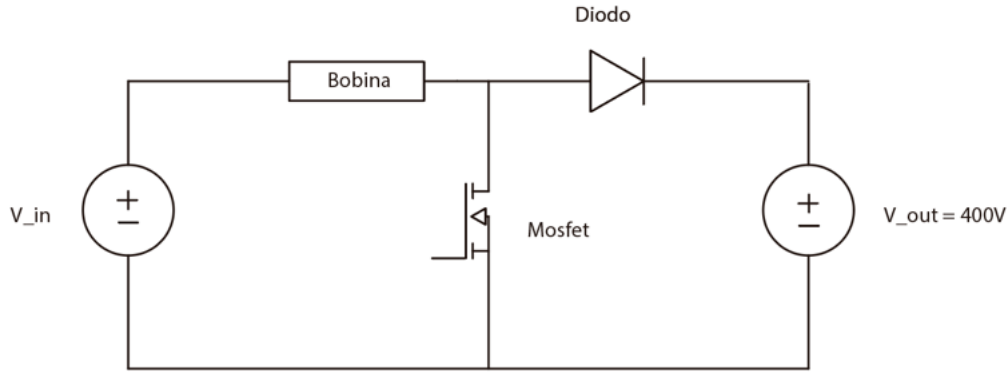


Fig 6: Circuito del convertidor elevador (DC-DC) tipo Boost

El funcionamiento se basa en regular los dos posibles estados del circuito mediante la conmutación del transistor. En un tiempo la corriente circula a través del Mosfet, haciendo que la intensidad que circula por la bobina crezca y que esta se cargue de energía; una vez cargada el Mosfet conmuta haciendo que la corriente circule por el diodo y este a su vez consigue que no retorne

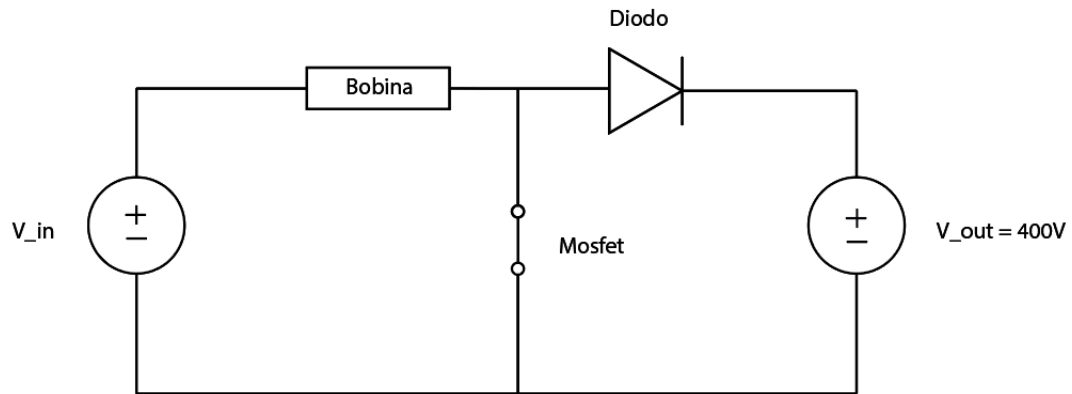


Fig 7: Circuito del convertidor elevador Con el Mosfet cerrado

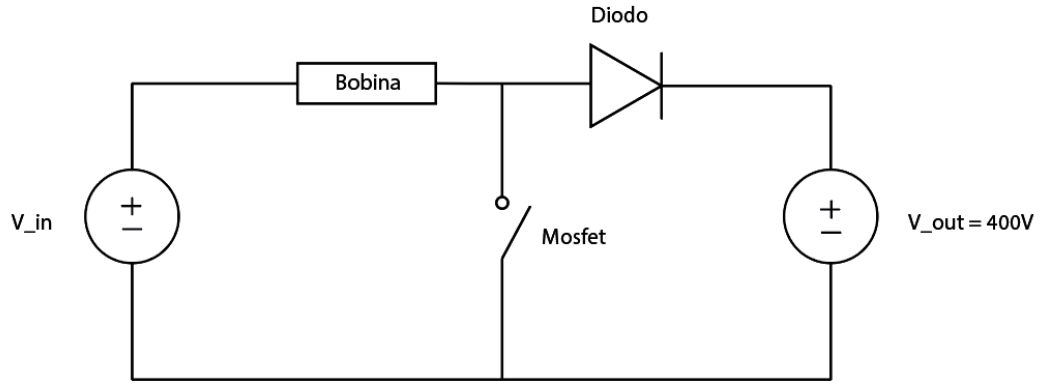


Fig 8: Circuito del convertidor elevador Con el Mosfet abierto

Para esta aplicación la tensión de entrada al elevador varia para todo el rango de velocidades lo que implica que el duty estaría cambiando constantemente, para solucionarlo se utiliza un control de corriente. Este se basa en medir la corriente que pasa por la bobina para limitar la máxima intensidad que pasa por ella. Una vez que se llega al valor máximo el Mosfet se abre durante un periodo de tiempo que fijamos en el diseño (Toff).

$$I_{Máxima} = \frac{IL_{media}}{1 - duty} + \frac{V_{out} - V_{in}}{2 \cdot L} \cdot T_{off} \quad (3)$$

Este tipo de control tiene la ventaja añadida de que limita la corriente que entra al circuito, evitando así que en caso de que se produzca una sobretensión los componentes del circuito resulten dañados.

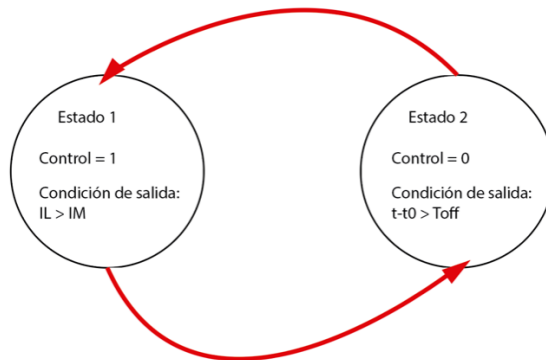
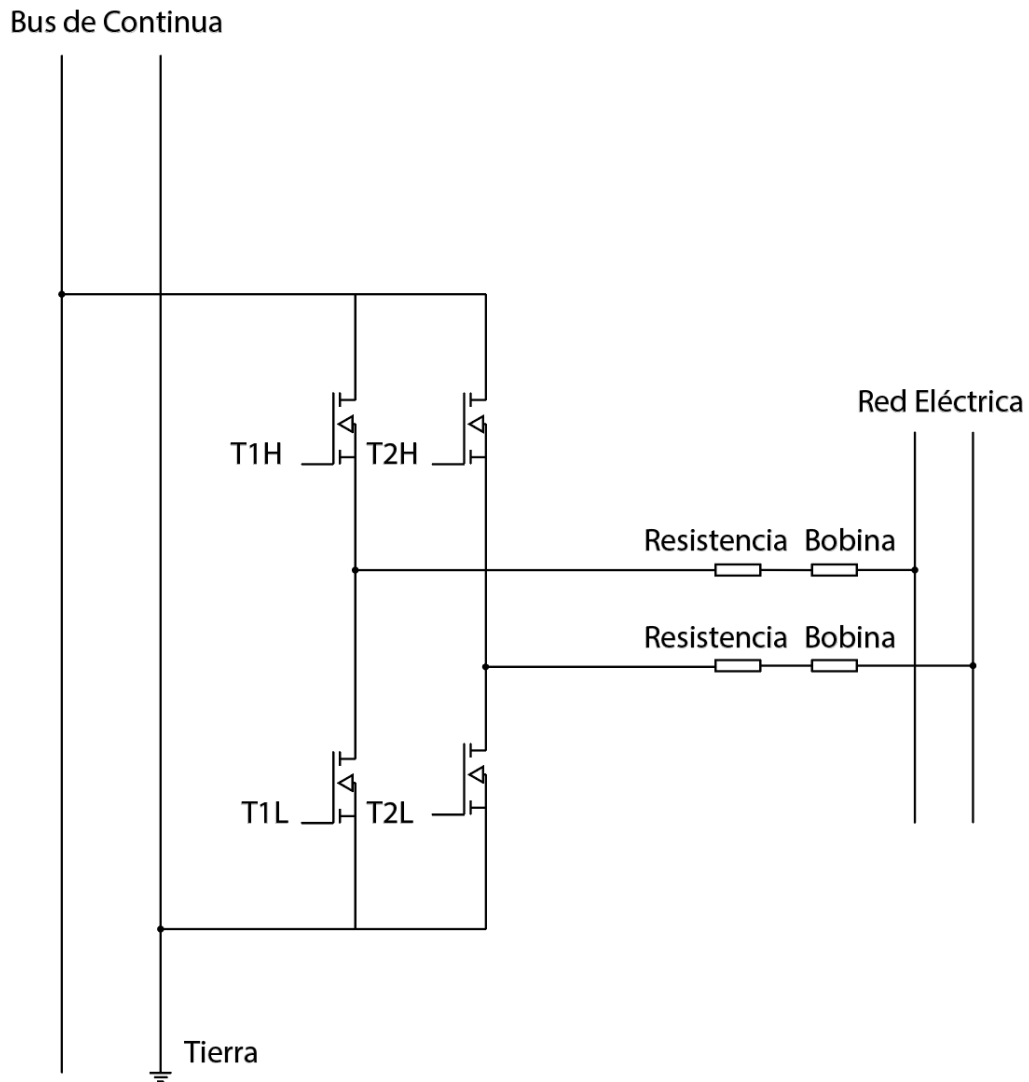


Fig 9: Control de corriente esquematizado en una maquina de estados

La tercera y última parte es un inversor de enlace a red (GTI – Grid Tie Inverter), que transforma la corriente continua del elevador de tensión, a corriente alterna, para ser inyectada a la red eléctrica europea.



*Fig 10: Bus de continua junto con el GTI y la red eléctrica (de izquierda a derecha)*

En este proyecto se cuenta con un bus de corriente continua a 400V (+50V/-50V) del cual se inyecta o se extrae energía dependiendo de las posibles variaciones que ocurren en el circuito completo.

El inversor está formado de 4 semiconductores (MOSFETS) que están controlados por un microcontrolador al cual se le conecta una fuente de tensión de señal triangular, y dependiendo del valor del bus de continua en el tiempo, se produce la apertura o cierre de los MOSFETS obteniendo una señal senoidal.

Si se realiza un balance de potencias en el bus de continua, se diferencian tres casos: Que no se esté extrayendo ni inyectando energía, que se extraiga energía o que se inyecte energía. Para contemplar los tres casos citados anteriormente se utilizara un inversor en el que se modificara la amplitud, el desfase y la frecuencia dependiendo del modo de trabajo.

Se debe tener en cuenta las posibles variaciones de tensión continua (400V), así como los posibles fallos en la red eléctrica que afectarían al control del inversor.

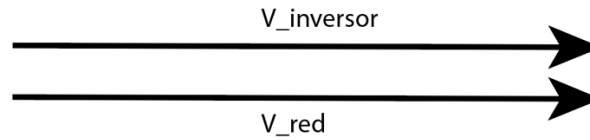


Fig 11: Representación vectorial de las tensiones del inversor y la red

El primer caso se trata del más simple ya que el bus de 400V no sufre variaciones y se encuentra en equilibrio, lo que implica que el ángulo de trabajo es cero.

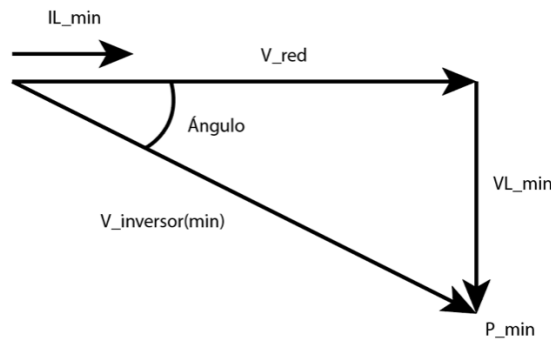


Fig 12: Representación vectorial de las tensiones del inversor y la red para el segundo caso

Analizando el segundo caso, podemos ver que se produce un exceso de energía en el mismo, debido a que las cargas conectadas están consumiendo menos energía que la que se inyecta, por lo que la tensión del inversor aumenta y por tanto, también el ángulo de trabajo.

En este caso, trabajamos con  $V_{red}$  de  $230 \cdot \sqrt{2}$  V (red europea), con un valor de bus máximo  $V_{bus_{max}}$  y con un valor de potencia máxima  $P_{max}$ .

$$\cos(\theta_{max}) = \frac{V_{red}}{V_{inv_{max}}} = \frac{V_{red}}{m_a * V_{bus_{max}}} \tag{4}$$

A su vez, la tensión máxima que pasa por las bobinas  $V_{L\_max}$  se puede calcular mediante trigonometría (5):

$$V_{Lmax} = \sqrt{V_{inv\_max}^2 - V_{red}^2} \quad (5)$$

Finalmente se calculará la corriente máxima que pasa por la bobina y el valor de esta ( $f = 50\text{Hz}$  red europea).

$$I_{Lmax} = P_{max} * V_{red} \quad (6)$$

$$L = V_{L\_max}^2 * \pi * f * I_{L\_max} \quad (7)$$

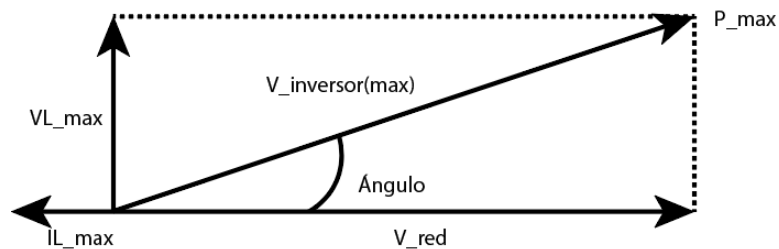


Fig 13: Representación vectorial de las tensiones del inversor y la red para el tercer caso

Si al inyectar energía al bus, no es suficiente para poder alimentar todas las cargas conectadas de manera correcta, se produciría un descenso de la tensión del bus. A causa este suceso, se tendría que sacar energía de la red, haciendo que la tensión del inversor también disminuya, al igual que el ángulo (que pasa a ser negativo).

De darse estas circunstancias se estaría trabajando con  $V_{bus}$  y  $V_{inv}$  mínimo, y siguiendo los razonamientos anteriores se podrían obtener los mismos datos.

$$\cos(\theta_{min}) = \frac{V_{red}}{V_{inv_{min}}} = \frac{V_{red}}{ma * V_{bus_{min}}} \quad (8)$$

$$V_{L\_min} = \sqrt{V_{inv\_min}^2 - V_{red}^2} \quad (9)$$

$$I_{L\_min} = \frac{V_{L\_min}}{2 * \pi * f * L} \quad (10)$$

$$P_{min} = V_{red}(rms) * I_{L\_min}(rms) \quad (11)$$

Finalmente destacar que la totalidad de los componentes que constituyen el equipo, tanto los subsistemas electrónicos como las partes mecánicas pueden ser adquiridas fácilmente por la mayoría de los suministradores, y por ello no se detalla los aspectos constructivos de estos.

## VI. ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS

Se define la celeridad como la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua contenida en una tubería. Su valor se determina a partir de la ecuación de continuidad y depende fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción, así como de la compresibilidad del agua.

Una expresión práctica propuesta por Allievi (12), que permite obtener el valor de la celeridad cuando el fluido es agua, es la siguiente:

$$Celeridad = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K * \frac{D}{e}}} \quad (12)$$

Siendo “D” el diámetro de la tubería, “e” el espesor de esta y “K” un coeficiente que varía en función del módulo de elasticidad ( $\varepsilon$ ) del material de la tubería:

$$K = \frac{10^{10}}{\varepsilon} \quad (13)$$

A continuación, se presenta una tabla en la que se muestran diferentes valores de K para algunos de los materiales más comunes:

<b>Material</b>	<b><math>\varepsilon(\text{Kg/m}^2)</math></b>	<b>K</b>
<b>PVC</b>	$3 \cdot 10^8$	20-50
<b>PE baja densidad</b>	$2 \cdot 10^7$	500
<b>PE alta densidad</b>	$9 \cdot 10^7$	111.11

*Tabla 1. Valores de K*

Cuanto menor sea la celeridad, mejor soporta la tubería los golpes de ariete. De esta forma se reduce la posibilidad de roturas en las tuberías y conexiones entre las mismas. Por otro lado, se puede valorar el uso de materiales compuestos como poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) que ofrecen grandes ventajas. Están constituidos por distintas capas o componentes, cada uno con una función específica. Las materias primas básicas son resina de poliéster insaturado, fibras de vidrio y cargas inertes.

Una mejora frente a los materiales tradicionales es que las tuberías de PRFV se distinguen por su larga vida útil y reducidos costes de operación y mantenimiento, tiene alta resistencia mecánica lo que implica resistencia a altas presiones y a la abrasión.

Además, su celeridad de onda, menor que la obtenida con tuberías de otros materiales, conlleva una reducción de costes en los diseños para sobrecargas de presión por golpe de ariete.

## VII. CONCLUSIONES

La finalidad de este documento es el estudio de una alternativa viable para la generación de energía gracias a un volumen de agua almacenado a cierta altura, pudiendo tratarse de un depósito construido para esta finalidad como embalses o ríos.

En el diseño del sistema se ha tenido en cuenta una potencia máxima de 4,8Kw, que se adaptara a las condiciones de velocidad del agua almacenada, ya que muy posiblemente no trabaje en este punto de funcionamiento de manera continuada.

Para el desarrollo del proyecto se han calculado los valores críticos mediante una simulación a través del software PSIM. Además, las graficas vectoriales han sido dibujadas con Adobe Illustrator.

Esta propuesta intenta solventar la necesidad energética con un elemento de fácil adquisición que permita suministrar energía a un bus de continua, y este a su vez a la red eléctrica mediante un inversor.

## VIII. REFERENCIAS

- [1] *ESPARZA SOLA, Tomás. Diseño dimensionado y simulación de un convertidor DC/DC elevador para pilas de combustible. 2015*
- [2] *HAUKE, Brigitte. Basic calculation of a Boost converter's power stage. Texas Instruments, Application Report November, 2009, p.*
- [3] *PENA-LOPEZ, Cristian. Wind turbine based on a Permanent Magnet Generator*
- [4] *PSIM- <https://powersimtech.com/>*
- [5] *Revista Workrooms- <http://workrooms.dieecs.com/>*
- [6] *Wikipedia- [https://es.wikipedia.org/wiki/Golpe\\_de\\_ariete](https://es.wikipedia.org/wiki/Golpe_de_ariete)*
- [7] *[https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_hidr/Tema10.PDF](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema10.PDF)*
- [8] *Moleco-<http://molecor.com/es/canalizaciones/caracteristicas-tecnicas/resistencia-golpe-ariete>*