



Proyecto de Fin de Grado
Ingeniería Electromecánica- Especialidad eléctrica

Almacenamiento de energía gravitatoria con
utilización de cuerpos sólidos

Autor

Miguel Carreras López

Director del proyecto

Unai Búrdalo García

Coordinador

Fernando de Cuadra García

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA GRAVITATORIA CON
UTILIZACIÓN DE CUERPOS SÓLIDOS**
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017-2018 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:



Fecha: 05 / 07 / 2018

Miguel Carreras López

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.:

Uvay BÚRDALO GARCÍA

Fecha: 05 / 07 / 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1ª. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D.MIGUEL CARRERAS LÓPEZ

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA GRAVITATORIA CON UTILIZACIÓN DE CUERPOS SÓLIDOS**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2ª. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3ª. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4ª. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5ª. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que

podieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 1 de Julio de 2018

ACEPTA

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA GRAVITATORIA CON UTILIZACIÓN DE CUERPOS SÓLIDOS

Autor: Carreras López, Miguel.

Director: Búrdalo García, Unai.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de energía gravitatoria mediante cuerpos sólidos es una propuesta que viene motivada por la necesidad de aportar soluciones tecnológicas a los retos que afronta actualmente el sistema eléctrico. El objetivo principal es el de mejorar la integración e intermitencia de la energía renovable, acumulando energía en las horas de generación alta y baja demanda, cuando se producen excedentes. El almacenamiento gravitacional es una tecnología aún incipiente, pero con potencial de uso y debido a sus ventajas frente a otras tecnologías de acumulación de energía debe ser tenido en cuenta.

Nuestra tecnología se fundamentará en el desplazamiento de una gran masa en el eje vertical a bajas velocidades con el fin de conseguir una energía acumulada de 500 kWh. Tomaremos como ejemplo a seguir para diseñar nuestro accionamiento el prototipo Gavitrlicity, rechazando otras propuestas como ARES o Gravity Power.

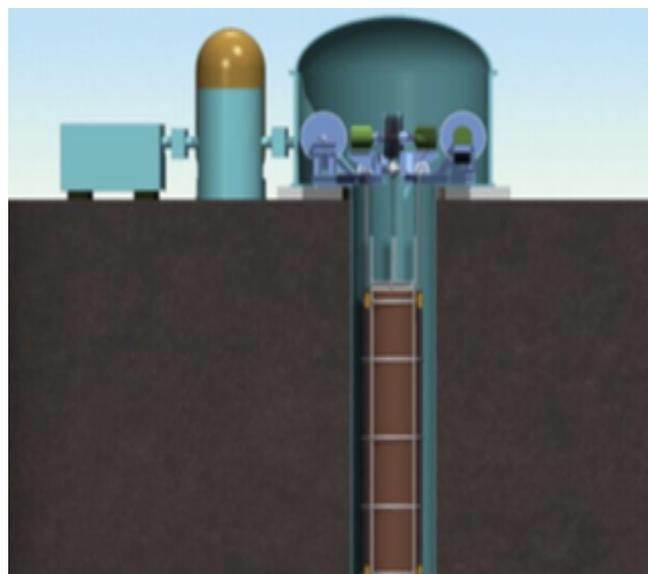


Ilustración 1 - Prototipo Gavitrlicity

El peso cilíndrico, constituido por varias toneladas de acero, se suspende en el interior de un pozo de gran profundidad colgado de cables. El sistema de cables guía evita que se balancee. Al descender la masa los motores pasan a trabajar como generadores devolviendo la energía a la red. En este sistema el peso es constante y está unido al cable de manera permanente, por lo que la profundidad del pozo determina la energía almacenada. Aumentar la capacidad energética del sistema requiere hacer el pozo más profundo.

$$h = \frac{E_{\text{útil}}}{m * g * \eta_{\text{descarga}}}$$

Para conseguir la mayor profundidad posible se aprovechará el ocaso de la minería en España para utilizar los pozos mineros abandonados como enormes sistemas de almacenamiento de energía limpia que contribuya a mejorar el medioambiente y a la sostenibilidad. Es evidente que también mediante esta decisión ahorraremos todos los costes derivados de la extrusión del hoyo pero no podemos olvidar que este orificio tendrá que tener unas características y dimensiones muy específicas. Esta idea puede dar una nueva vida a esas minas y a la población activa que vivían de ella.

Como objetivo principal del proyecto, a parte de lo comentado anteriormente, tendremos el diseño e implantación en territorio español. Diseñaremos primeramente el accionamiento de 5 kWh con sus parámetros atendiendo a longitudes óptimas para un ensayo a pequeña escala, para finalmente diseñar el prototipo real con el objetivo de tener una capacidad de 500kWh como premisa.

El conjunto estará compuesto por un motor con la capacidad de devolver energía a la red, una caja reductora, una polea, los cables que sujetarán y transmitirán fuerza de todo nuestro sistema y la masa que moveremos. Esta última tendrá forma de cilindro por lo que se buscará la relación óptima entre su altura y su diámetro fijándonos en los valores medios de profundidad y radio en los pozos mineros abandonados, sabiendo que en el peor de los casos estos se podrían aumentar, aunque se tratará de evitar los sobrecostes.

METODOLOGÍA

El proyecto constará de tres partes bien diferenciadas:

1. Elección y justificación social, medioambiental y económica de uno de los distintos prototipos de almacenamiento propuestos con el fin de obtener una instalación real en territorio español.
2. Elección de la zona de implantación de la instalación y diseño del accionamiento que almacenará nuestro objetivo de $E = 500$ kWh.
3. Análisis económico e inversión en el propio proyecto.

En cuanto al punto número uno, nuestro primer paso hacia la realización del proyecto será el de decidir con cual de las cuatro tecnologías (Clase A: Masas sólidas suspendidas de cables - Clase B: Transportadores de masas sólidas entre dos cotas – Clase C: Acumuladores eléctricos - Clase D: Plantas flotantes de almacenamiento energético) en el proyecto escogemos para realizar la implantación real. Para decantarnos por una de ella se ha considerado el nivel de madurez tecnológica (Technology Readiness Level o TRL) para evaluar su viabilidad técnica, una evaluación económico-financiera y una evaluación sobre el impacto social. Una vez dilucidados estos aspectos trataremos de optimizar la tecnología con el estudio de la eficiencia del ciclo, la duración y tiempos de descarga y los rangos de potencia. Trataremos de obtener una energía limpia por lo tanto de cada una de nuestra clases haremos una evaluación del impacto medioambiental en el que se indicarán los aspectos a tener en cuenta que serán evaluados de forma particular y en su conjunto en una escala del 0 al 10, siendo 0 una tecnología con impacto negativo en el medio ambiente y 10 con impacto positivo. Los aspectos a tener en cuenta y que serán determinantes serán la modificación del régimen, fauna y flora, la transformación del territorio y construcción, la extracción de recursos y las alteraciones del terreno. Este primer punto tendrá sus propias conclusiones en las que finalmente se escogerá la tecnología que vamos a diseñar eléctricamente.

En el segundo punto buscaremos información sobre el dictaminado como pozo más profundo de España (Pozo de San Vicente, Linares) viendo el estado actual del pozo, el

impacto social que supondría su utilización concreta y los posibles recursos eléctricos disponible a fin de abaratar costes. Una vez determinada la profundidad que tenemos disponible se procederá a diseñar el accionamiento con los siguientes pasos:

1. Elección de la capacidad a almacenar, previsiblemente 500 kWh (5 kWh en el caso del prototipo a pequeña escala)
2. Evaluación y elección de la relación profundidad/peso del sistema.
3. Atendiendo a la densidad del material que escojamos, la capacidad de nuestro sistema y la relación profundidad/masa, obtendremos un volumen específico para nuestro cilindro. Con ello podremos ir variando la relación altura/diámetro según las limitaciones de nuestro pozo, pues como ya hemos dicho, trataremos de realizar los menores cambios estructurales posibles.
4. Una vez establecida la masa fijándonos como objetivo las potencias tratadas anteriormente, se calculará la velocidad a la que trabajará el sistema.
5. Atendiendo a rendimientos aproximados de motor y reductora, obtendremos la potencia que debería proporcionar el motor. Si esta potencia excediera la nominal máxima de motores actualmente en uso en implantaciones como trenes o metros se optaría por emplear diversos motores con una potencia equivalente a la total necesaria para hacer el diseño lo más real posible.
6. Con este último cálculo seleccionaríamos también los pares de polos que tendrá nuestro motor atendiendo a que queremos tenerlo conectado a la red y a las especificaciones del fabricante.
7. Una vez conocidos la velocidad angular en el motor y la velocidad lineal a la que cae el accionamiento determinaremos el radio de la polea, así como la utilización de reductora o no y en su caso la elección de la relación de reducción.

Por último en el apartado de análisis económico trataremos de averiguar y poner un coste a los recursos que vamos a utilizar, empezando por un listado de materiales, con su posterior precio unitario. Después de esto estimaremos un coste general de la instalación con una serie de consideraciones previas pero obteniendo un resultado que será el sumatorio de los costes directos, los indirectos y los gastos generales. Este lo compararemos con el coste real estimado por los desarrolladores de Gavitricity en el Reino Unido para ver si es un presupuesto coherente.

CONCLUSIONES Y RESULTADOS

El apartado de conclusiones y resultados también me gustaría dividirlo en dos partes puesto que por una parte tenemos las conclusiones de por qué se escoge el tipo de prototipo Clase A- Masas sólidas sostenidas de cables por delante de los otros tres tipos, y por otra parte tenemos las conclusiones del diseño de nuestro propio accionamiento y su presupuesto.

En cuanto a la decisión de fijarnos en el prototipo Gavitricity por delante del resto cabe destacar que nuestros principales objetivos era poder implantarlo en España y con el menor coste posible. Las tecnologías de movimiento de masas entre dos cotas (ARES) eran descartadas en un primer momento por razones medioambientales y sociales, es de sobra conocida la oposición social que hay en España a cualquier tipo de infraestructura eléctrica. A día de hoy es prácticamente imposible encontrar un terreno de fácil acceso con una pendiente relativamente baja pero constante (menor del 10%) que no transite por ninguna zona de interés paisajístico nacional y que no afecte a ningún tipo de fauna y flora como necesitan las tecnologías de clase B. ARES es un prototipo mucho más viable en países con EEUU donde existen grandes zonas de terreno inhabitadas que se prestan a estas tecnologías. Los prototipos de clase D también son descartados en primera instancia debido su bajo TRL o grado de madurez tecnológica. Una vez llegados a este punto solo nos quedan las propuestas de masas en movimiento en un eje vertical, bien en un fluido líquido (Clase C) o bien en el aire (Clase A). Ambas se pueden implantar en antiguos pozos mineros abandonados pero fijándonos en nuestro segundo objetivo podemos observar que la inmersión de nuestra masa en un fluido líquido tendría un coste unitario 10 veces superior a hacerlo en el aire, lo cual acaba siendo clave para inclinarnos por desarrollar los Clase A.

Centrándonos en las conclusiones económicas y las derivadas del diseño podemos ver que obtendríamos un coste total de 1.089.467 €. Parece un coste razonable si lo comparamos con el prototipo real de próxima implantación en Reino Unido. En ese caso la inversión asciende aproximadamente a 650000 libras, o lo que es lo mismo unos 760000 €.. Si bien no podemos olvidar que este coste viene del supuesto ideal de que el pozo este totalmente acondicionado para la operación.

GRAVITATORY ENERGY'S STORAGE BY USE OF SOLID ELEMENTS.

ABSTRACT

INTRODUCTION

The gravitatory energy's storage by the use of solid elements is a proposal which rises up by the need of providing technological solutions to the challenges that confront actually the electric system. The main objective of this project is to improve the entirety and intermittence of the renewable energy, accumulating the energy in the hours with the highest generation and the lowest demand, when surplus are produced. Gravitational storage is still an incipient technology but with a great usage's potential with a lot of advantages in comparison with other energy accumulation's technologies.

Our technology will be based on the displacement of a big mass in the vertical axis with slow speed with the purpose of getting an acumulating energy of 500 kWh. We will take as role model Gavitricity's prototype in order to design our installation, refusing other proposal such as ARES or Gravity Power.

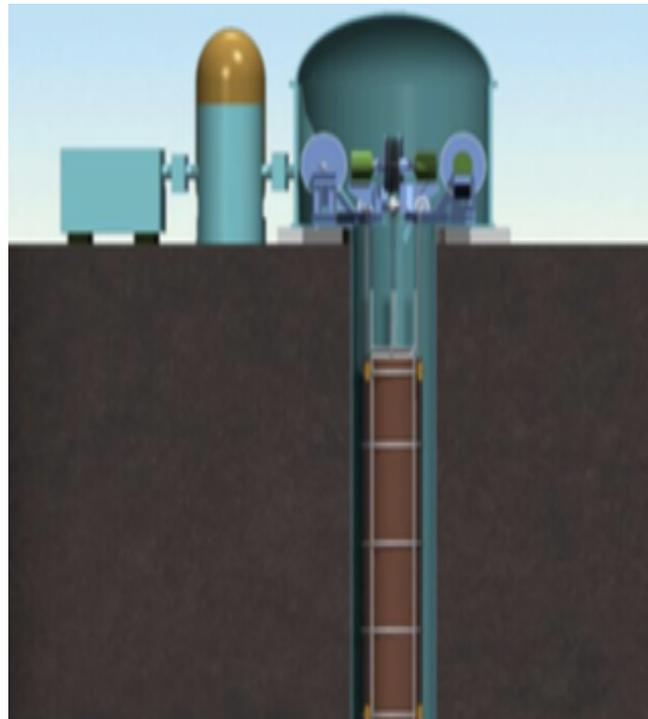


Ilustración 2-Prototipo Gavitricity

The cylindrical weight, made of tons of Steel, is hanged inside of a deep well held by resistant cables. Cable's system are useful because they serve as guiding in order to prevent the swinging of the mass. While descending this mass, the engines being working as generator of energy, giving back this energy to the electricity grid. In this system we use constant weight joined to this strong cables permanently, so the parameter which defines the amount of energy that we can store is the depth of our well. Increasing the depth of the well implies directly increasing the energy with this relation:

$$h = \frac{E_{useful}}{m * g * \eta_d}$$

For the purpose of achieving the most depth possible, we will benefit from the decline of the mining in Spain. We want to use abandoned mining wells as huge storage systems of clean energy that contributes to improve the environment and the sostenibility. It is obvious that with this decision we will also save all the costs related to the extrusion of the hole, however, we can not forget that this orifice will have quite specific characteristics and dimensions. This idea could give a new life to this mines and the active and working population that lived from its.

As the main objective of this project, apart from the ones mentioned before, we will have to realise the design and implementation in spanish territory. We will firstly design the installation to get 5 kW as a prototype in a small-scale, in order to get a real prototype with which we want to earn 500 kWh as a premise.

The set of components will be composed by an engine with the capability of giving back energy to the electrical grid, a precision gearbox, a pulley, the cables to hold it and to transmit the force of the entire system and the mass that we will move. This last part will have cylindrical shape so we will search the optimal relation between its height and its diameter checking out the average value of depth and diameter of the spanish abandoned wells, being aware of that in the worst case we could expand them both. Although is possible, we will try to avoid this additional costs.

METHODOLOGY

This will consist of three fairly differentiated parts:

1. Choice and social, technological, environmental and economical justification of one of the varying prototypes proposed with the aim of obtaining a real installation in Spanish territory.
2. Choice of the implementation's zone and design of the electrical engine that will store our 500 kWh objective.
3. Economical analysis and inversion in the mentioned project.

Talking about the first point, our first step towards the realization of the project will be taking the decision of which of the four proposed technologies (Class A: Solid masses hanged by cables - Class B: Solid Mass' Conveyors between two different heights- Class C: Electrical accumulator - Class D: Floater facilities of electrical) will be chosen by us in order to realise the project's real implementation. In order to choose either one of these options we have considered the Technology Readiness Level or TRL of each one to evaluate its technical viability, a financial/economical evaluation and an evaluation of its environmental impact. Once these aspects are clarified we will try to optimize the technology by studying the efficiency of the cycle, the duration and the periods of discharge and of power ranges. We have the aim of obtaining clean energy, therefore we will do a complete evaluation of the environmental impact of each prototype in which we will indicate the aspects that should be evaluated in particular and altogether in a scale between 0 and 10, being 0 a technology with really negative impact in the environment and 10 one with positive impact. The aspects that will be determining will be the modification of the ecosystem, wildlife and flora, the transformation of the land and the visual disturbances of the field. This first point will have its own conclusion in which finally we will choose the technology that we will design electrically.

In the second point we will search for information about the known as the deepest well in Spain (Pozo San Vicente, Linares), seeing which is the actual status of it, the social

impact that will suppose its concrete use and the posible electrical resources availabes with the aim of cheapening costs. Once the depth is determined we can already design the engine following the next steps:

1. Choice of the storage energy that it is required, presumably 500 kWh (5kWh in the small-scale prototype)
2. Evaluation and election of the relation depth/weigth in the system
3. Seeing the density of the material that we choose, the capacity of our system and the relation between depth and weigth, we will obtain the specific volume to our cylinder. With that fact, we could vary the relation between the height and the diameter attending to the different limitations of our well, so as we have said, we will try to do the less changes possible.
4. Once the mass is established and focused on the power objetives specified before, we will calculate the speed which the system will work.
5. Attending to the approximated outputs of the engine and the gearbox, we will obtain the power that should be provided by the motor. If this power exceded the nominal highest of the engines in the market we could use more than one in order to move the system, provided that the sum of the nominal power of each engine was higher than the required one.
6. With this last calculation we would set also the number of pairs of poles that our engine will have, attending that it will be conected to the electrical grid and the producer specifications.
7. Once we know the angular speed in the motor and the lineal speed in the mass we are available to design te radius of the polley, as well the requirements and dimensions of the gearbox.

In our last point, the economical analysis, we will try to find out and establish a cost of the resources that will be involved in our system, beginning with a list of the materials, with its unitary prize. After that we will estimate a general cost of the installation with a serie of previous conditions but obtaining a final result that will be the summatory of the direct costs, the indirect costs and the general expenditures. This cost will be compared with the real cost estimated by the Gavitrlicity prototype's developers in the United Kingdom to see if our budget is coherent.

CONCLUSIONS AND RESULTS

I would like also to split out the conclusions and results' section in two parts because on the one hand we have the conclusions about the decision of why taking the prototype of Class A: Solid masses hanged by cables above from the other ones, and on the other hand we have the conclusions and results about the design of our own engine and its budget.

Talking about the decision of marking the prototype Gavitricity past from the others, we have to highlight that our main objective were implementing it in Spain territory with the less cost possible. Solid Mass' Conveyors between two differnet heights technologies (ARES) were excluded from the beginning for environmental and social reasons. It is well-known the social opposition in Spain to any electrical infrastructure. Nowadays is fairly impossible to find an area with easy access and with a relatively low slope (lower than 10 %) which does not traverse throught any national landscape value and which does not affect any type of wildlife or flora as is needed in technologies of B Class. ARES is a prototype quite much more useful in countries such as United States where there are extends pockets of land uninhabitated that are available for this inversions. Prototypes of Class D are also discarded in first instance due to their low TRL or Technology Readiness Level. Once in this point, we just have the approachs that involve the movement in a vertical axis of a mass, it could be under the wing of a liquid fluid (Class B) or it could be under the wing of the air (Class A) . Both could be implemented in the abandonated mining wells that we talked before pero looking at our second objective we could observe that the immersion of our mass in a liquid fluid implies an unitary overcost 10 times bigger than with the air sustain. That fact will be finally determinating our decisionof developing Class A.

Focusing ourselves in the economical conclusions and the ones derived from the design we can see that the total cost of our system is 1.089.467 €. It looks like a reasonable cost if we compare it with the real implementation project's prototype in United Kingdom. In that case the inversion ascend to aproximately 650000 pounds. 760000 €. While it is also important that we can not forget that this cost comes from the ideal suppose that our well is totally conditioned for the immediate operation.

Contenido

1. Introducción	21
2. Estado del arte	23
2.1 Tecnologías en uso	23
2.2 Tecnologías disponibles para el almacenamiento con cuerpos sólidos.....	24
3. Evaluación de las distintas tecnologías disponibles	27
3.1 Evaluación de viabilidad técnica:	27
3.2 Optimización de la tecnología.....	37
3.2.1 Tiempos de descarga y duración de descarga	37
3.2.2 Rango de potencia.....	39
3.3 Evaluación de viabilidad económica:	40
3.4 Evaluación del impacto medioambiental y social.....	43
3.4.1 Evaluación del impacto medioambiental.....	43
3.4.2 Evaluación del impacto social.....	44
3.4.3 Evaluación de cada prototipo	44
4. Elección de la tecnología a implantar	53
4.1 Conclusiones respecto a la viabilidad técnica:.....	53
4.2 Conclusiones económicas:	54
4.3 Conclusiones respecto al impacto medioambiental:	55
4.4 Conclusiones respecto al impacto social:.....	55
4.5 Conclusión final:.....	56
5.Emplazamiento de la instalación	59
5.1 Elección del pozo abandonado	59
5.2 Estado actual del pozo	59
5.3. Impacto social y recursos eléctricos disponibles.....	60
5.4. Integración con energías renovables	61
5.4.1 Parque eólico.....	61
5.4.2 Parque solar.....	62
5.4.3 Parque fotovoltaico	63
6. Diseño del accionamiento	65
6.1 Prototipo de 5 kWh :	68
6.2 Prototipo de 500 kWh :	69
6.3 Diseño para P= 500 kW :.....	69

6.4 Elección del motor :	70
6.5 Cálculo de la reductora :	72
6.6 Característica par-velocidad angular del accionamiento :	73
6.7 Tablas resumen del diseño del accionamiento:	74
6.7.1 Datos previos	74
6.7.2. Cálculos de la masa a desplazar	74
6.7.3. Diseño para una potencia de 500 kW	75
6.7.4. Elección del motor	75
6.7.5. Diseño del motor	75
6.7.6 Características nominales del motor	76
7. Presupuesto	77
7.1 Consideraciones previas	77
7.2 Recursos a emplear	77
7.3 Costes directos	82
7.3.1 Precios Unitarios	82
7.3.2 Sumas parciales.....	83
7.4 Costes indirectos	86
7.5 Gastos generales	86
7.6 Presupuesto	87
8. Conclusiones generales	89
9. Recursos externos	91
10. Bibliografía	93
11. ANEXO - Integración de un sistema de almacenamiento de energía gravitatoria con aplicación real. Prototipo MGH	97
11.1. Caso de estudio	97
11.2. Valoración de la sostenibilidad	98
11.2.1 Variación de capitales	99
11.2.1.1 Capital económico	100
11.2.1.2 Capital natural.....	104
11.2.1.3 Capital humano y social	105
11.2.2 Cercanía a niveles críticos	106
11.3. Propuestas para mejorar la sostenibilidad	108

Índice de figuras

ILUSTRACIÓN 1.1- RELACIÓN MASA-ALTURA PARA E = 500 kWh.....	21
ILUSTRACIÓN 3.1- PROTOTIPO GRAVITRICITY.....	27
ILUSTRACIÓN 3.2- PROTOTIPO ARES.....	29
ILUSTRACIÓN 3.3-ALTERNATIVA PARA PENDIENTES MAYORES DEL 10%	31
ILUSTRACIÓN 3.4-FERROCARRIL DE CREMALLERA DE GORNERGRAT (SUIZA).....	32
ILUSTRACIÓN 3.5- PROTOTIPO GRAVITY POWER.....	33
ILUSTRACIÓN 3.6 -DIMENSIONES DEL PROTOTIPO.....	34
ILUSTRACIÓN 3.7 - % POTENCIA NOMINAL FRENTE A RENDIMIENTO EN TURBINAS	35
ILUSTRACIÓN 3.8- PROTOTIPO UNIVERSIDAD INNSBRUCK	36
ILUSTRACIÓN 3.9- COSTE DE INVERSIÓN VS. POTENCIA PARA SISTEMA GRAVITY POWER	40
ILUSTRACIÓN 3.10- COSTE DE INVERSIÓN VS. ENERGÍA PARA SISTEMA GRAVITY POWER.....	41
ILUSTRACIÓN 3.11- LCOE, INVERSIÓN Y COSTES DE INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS DISTINTAS PROPUESTAS.	42
ILUSTRACIÓN 5.1 - POZO DE SAN VICENTE, LINARES	60
ILUSTRACIÓN 5.2 -DISTANCIA AL NÚCLEO URBANO MÁS PRÓXIMO	61
ILUSTRACIÓN 5.3- PARQUE EÓLICO SIERRA DEL TRIGO.....	62
ILUSTRACIÓN 5.4- PARQUE SOLAR LOS OLIVARES.....	62
ILUSTRACIÓN 5.5- PARQUE FOTOVOLTAICO ALCAUDETE	63
ILUSTRACIÓN 6.1- PROTOTIPO GAVITRICITY	66
ILUSTRACIÓN 6.2 CATÁLOGO DE MOTORES	71
ILUSTRACIÓN 6.3- ESQUEMA DEL ACCIONAMIENTO.....	72
ILUSTRACIÓN 6.4 - CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD ANGULAR DEL ACCIONAMIENTO	73
ILUSTRACIÓN 7.1 - PRECIO ACERO EN USD/TONELADA.....	78
ILUSTRACIÓN 7.2 CABLES DE ELEVACIÓN DE ACERO GALVANIZADO.....	79
ILUSTRACIÓN 7.3 CATÁLOGO DE POLEAS	80
ILUSTRACIÓN 7.4 ESQUEMA POLEA SIMPLE.....	81
ILUSTRACIÓN 7.5- CATÁLOGO DE MOTORES.....	81

Índice de tablas

TABLA 3.1- PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE OBJETIVOS DE PROPUESTAS TECNOLÓGICAS DE ALMACENAMIENTO GRAVITACIONAL	39
TABLA 4.1- COMPARATIVA DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO EN EFICIENCIA, VIDA ÚTIL Y COSTE DE INVERSIÓN.	54
TABLA 6.1 DATOS PREVIOS	74
TABLA 6.2 CARACTERÍSTICAS DEL CILINDRO	74
TABLA 6.3 POTENCIA 500 kW	75
TABLA 6.4 NECESIDADES DE ALMACENAMIENTO	75
TABLA 6.5 REQUISITOS MÍNIMOS DEL MOTOR	75
TABLA 6.6 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR.....	76
TABLA 7.1 PRECIOS UNITARIOS DE NUESTROS RECURSOS.....	83
TABLA 7.2 COSTE PARCIAL DEL ACERO	84
TABLA 7.3 COSTE PARCIAL DE LA APARAMENTA	85
TABLA 7.4 COSTE PARCIAL DE LA MANO DE OBRA	86

1. Introducción

En este trabajo se evaluará la utilización de la energía gravitatoria como fuente de almacenamiento de energía eléctrica, mediante la utilización de cuerpos sólidos. El fundamento físico consiste en la variación de energía potencial gravitatoria de una masa.

Esta energía viene definida por la expresión: $E_p = m \cdot g \cdot (h_s - h_i)$ donde

m es la masa

g es la constante de aceleración de la gravedad, igual a $9,81 \text{ m/s}^2$

h_s como cota superior y h_i como cota inferior entre las que se desplazará el centro de masas del cuerpo, siendo máxima su energía en el más elevado y nula en el más bajo.

La energía almacenada, por tanto, es directamente proporcional a la masa que se está desplazando y a la diferencia entre las cotas de alturas entre las que va a evolucionar el sistema en su ciclo de carga-descarga. El principal escollo es conseguir las orografías necesarias para provocar los desniveles requeridos que supongan una cantidad de energía sustancial.

A modo de ejemplo, se muestra en la siguiente gráfica la relación masa-altura que necesitaríamos para conseguir almacenar 500kWh.

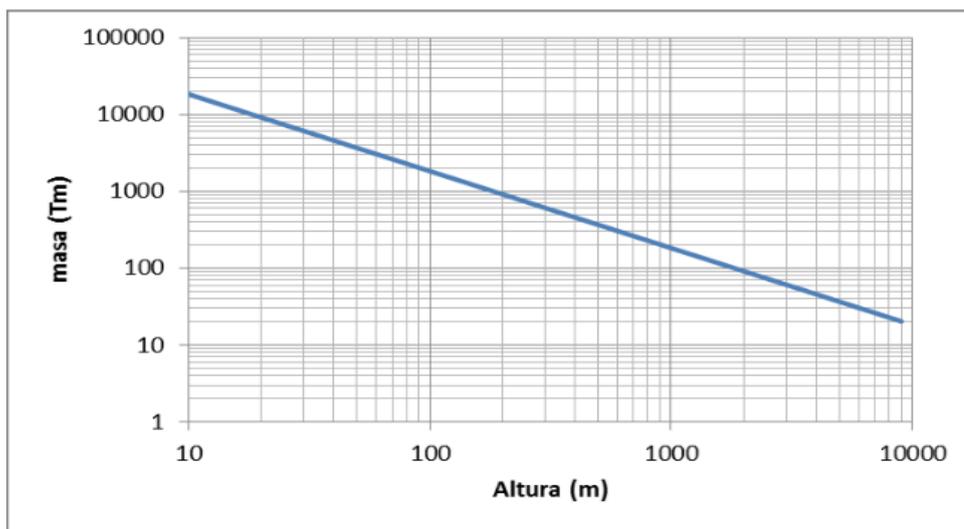


Ilustración 3.1- Relación masa-altura para E = 500 kWh

Otro factor a tener en cuenta, será la densidad energética. El uso de un material u otro para fabricar los cuerpos sólidos que se utilizarán en el almacenamiento establece unos límites para la citada densidad energética dependiente únicamente de la diferencia de cotas. Viniendo regida como: $DE_m = \frac{E_p}{m} = g \cdot (h_s - h_i)$

También influirá si se trata de carga libre o se utilizan sistemas que utilicen técnicas hidráulicas, de compresión u otras.

En términos de potencia, la fórmula será dependiente del tiempo y se podría simplificar como: $P(t) = g \cdot p_z(t)$

p_z será la componente vertical de la cantidad de movimiento (o momento lineal) del conjunto de masas, lo que nos lleva a una conclusión inmediata, para aumentar la potencia requerida tenemos dos opciones:

1. Aumentar la velocidad vertical del sistema
2. Aumentar la masa que estamos moviendo en el ciclo carga-descarga

Con la matemática enunciada anteriormente se buscará realizar el diseño de prueba piloto y demostrativo de almacenamiento de energía gravitatoria con la utilización de una de las alternativas de las que hablaremos posteriormente.

El prototipo de una potencia de aproximadamente 5 kW y el demostrativo de > 250 kW.

2. Estado del arte

2.1 Tecnologías en uso

En la actualidad el almacenamiento de energía en las redes eléctricas es una realidad sustanciada en base a distintos tipos de tecnologías, como pueden ser:

- Centrales de bombeo hidráulico: El principio de las centrales de bombeo se basa en dos embalses situados a distintas alturas que sirven de almacenes de energía. Lo más común es que tengamos centrales reversibles, que quiere decir que las turbinas de bombeo son capaces de llevar el agua en diferentes sentidos. Su objetivo principal es el de bombear el agua del embalse inferior al superior en las horas de valle (noche) y hacer el sentido contrario haciendo caer el agua hasta el generador a modo de central hidroeléctrica durante el día cuando la demanda eléctrica es mayor.

- Baterías: La base científica de las baterías son procesos electroquímicos que permiten almacenar y devolver la energía prácticamente en su totalidad y de forma cíclica. El principio de funcionamiento está basado básicamente en un proceso reversible de reducción-oxidación donde un componente gana electrones (reducción) y el otro los pierde (oxidación). La vida útil de estas baterías vendrá definida por sus ciclos de carga/descarga principalmente porque con cada carga o descarga la batería pierde calidad y por tanto eficiencia y rendimiento.

- Volantes de inercia: Esta tecnología se fundamenta en la aceleración de una gran masa que nos permitirá almacenar energía cinética gracias a su inercia. Esta energía cinética se puede utilizar como energía eléctrica en el momento que se requiera con capacidad de proporcionar grandes picos de potencia. Su funcionalidad se basa en proporcionar estabilidad del sistema eléctrico frente a perturbaciones de frecuencia.

2.2 Tecnologías disponibles para el almacenamiento con cuerpos sólidos

El almacenamiento de energía mediante cuerpos sólidos que nos ocupa en el presente proyecto, se agrupa principalmente en cuatro categorías diferenciadas por la forma en la que consiguen almacenar esa energía:

1. Masas sólidas suspendidas de cables (Clase A): Son sistemas que se basan en la subida (carga) y bajada (descarga) de grandes masas directamente en el aire, como podría ser en un pozo o en el agua como podría ser en una plataforma marina. El cable que sujeta la masa está directamente conectado mediante un cabrestante a una máquina eléctrica rotativa. En esta primera categoría tendríamos proyectos como “Gravitricity” que plantea la elevación de un peso cilíndrico de hasta 3.000 toneladas en el entorno de un eje de gran profundidad, sujeto por cables guía que evitarían que el sistema se balanceara y se dañase. Serían instalaciones enterradas, que en España, se podrían implantar en los grandes pozos mineros actualmente en desuso. Otra posible variante sería el llamado almacenamiento mediante inmersión de boyas donde los procesos se invierten gracias a su gran flotabilidad, es decir, se aporta energía al descender la boya (carga) y se recupera cuando ésta sube por su propio principio de flotabilidad (descarga) a la superficie marina. En la actualidad, hay proyectos como el “Ocean Gravity Energy Storage (OGRES)” o MGH, su principal ventaja es la fácil integración con parques de aerogeneradores off-shore. Almacenarían la energía sobrante en los picos de producción y aportarían a la red la cantidad restante en los momentos en los que la energía eólica no fuera la suficiente.

2. Transportadores de masas sólidas entre dos cotas (Clase B): En este caso tendremos grandes masas sólidas transportadas entre dos alturas diferentes. El grado de carga viene directamente determinado por la masa acumulada. El medio de transporte más popular son vagones sobre raíles, propulsados por motores eléctricos con la indispensable capacidad de devolver la energía a la red al descender haciendo uso de su frenado regenerativo. El proyecto que se encuentra en su fase de desarrollo más avanzada es “ARES”, que promueve la elevación de bloques de hormigón en vagones equipados con un motor/generador eléctrico. Este conjunto de vagones realizaría un continuo

proceso de subida, aumentando su energía potencial, y bajada en sentido contrario disminuyendo su altura. Se apoyaría en el frenado regenerativo de los motores para generar la electricidad, así como de la posible carga y descarga de bloques al final del recorrido, consiguiendo un sistema de masas variable. Su principal inconveniente conocido es la necesidad de una particular orografía con una instalación que disponga de un desnivel de unos 300 m con una pronunciada pendiente (se indica el 10%).

3. Acumuladores eléctricos (Clase C): Su idea se fundamenta en dispositivos ya utilizados en la actualidad para almacenar energía en forma de presión en un líquido. Acumulan energía bombeando dicho líquido en el interior de un depósito de volumen variable gracias a un émbolo. Hablar de este tipo de dispositivos en nuestro trabajo se justifica únicamente cuando ese émbolo es una gran masa que se está desplazando verticalmente en el seno de ese fluido. La devolución de energía a la red se da al hacer pasar el líquido a presión por una turbina. Como siempre, cuanto mayor sea la altura del émbolo, mayor será la capacidad del sistema. En esta parte tenemos prototipos como el proyecto “Gravity Power Modules (GPM)” que es un método de almacenamiento de energía gravitacional en el que se eleva una gran masa de hormigón en forma de cilindro en el interior de un pozo mediante bombeo de agua en su parte inferior. Para devolver la energía almacenada, se abre la válvula y dejando descender el cilindro de hormigón, se obtiene la energía del fluido mediante una turbina. Sus inconvenientes en este caso serían mecánicos dada la dificultad de obtener un sellado óptimo entre paredes y pistón que eviten fugas. Este sistema presenta el inconveniente de ser difícilmente escalable en energías (se presenta como un sistema modular: para mayor capacidad, hay que hacer más pozos).

4. Plantas flotantes de almacenamiento energético (Clase D): Son tratadas como depósitos flotantes sobre el agua, al poner masa sobre ellos, la línea de flotación asciende mientras que esta desciende al retirar masa. El llenado de los depósitos puede hacerse bombeando o turbinando agua del exterior y, a la inversa para el vaciado. Sólo se ha identificado a la Universidad de Innsbruck que se encuentre actualmente trabajando en este tipo de prototipos con el

proyecto “Buoyant Energy”. Como todo proyecto en alta mar habrá que valorar las conducciones eléctricas a través de mares u océanos y la posible alteración de la fauna marítima.

3. Evaluación de las distintas tecnologías disponibles

Una vez expuestas las distintas categorías de almacenamiento, nos centraremos en las tres que están en un grado de desarrollo mayor puesto que nuestro objetivo es proporcionar la información necesaria para el desarrollo de un demostrativo, por tanto se ha de seleccionar una alternativa de almacenamiento por gravedad que en la actualidad sea técnicamente viable, adecuada para una capacidad de almacenamiento de 500 kWh y en rangos de potencia de 5, 50 y 500 kW.

Nos centraremos en la vertiente tecnológica más avanzada dentro de cada uno de las clases primeras clases, excluyendo en su conjunto la clase D₂ puesto que hoy en día su análisis desarrollo es deficiente. Se adjunta a continuación el resumen justificativo en cada caso.

Para la realización del estudio se ha considerado el nivel de madurez tecnológica (Technology Readiness Level o TRL) para evaluar su viabilidad técnica, una evaluación económico-financiera y una evaluación sobre el impacto socio-medioambiental que tiene, a fin de obtener una evaluación y conclusiones razonadas.

3.1 Evaluación de viabilidad técnica:

- a) Clase A: Masas sólidas suspendidas de cables.

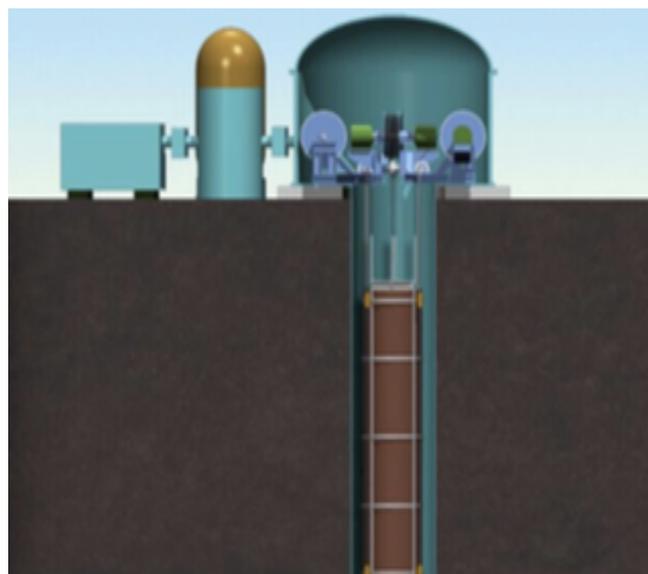


Ilustración 3.1- Prototipo Gravitricity

El peso cilíndrico, constituido por varias toneladas de acero, se suspende en el interior de un pozo de gran profundidad colgado de cables. Un sistema de cables guía evita que se balancee. Al descender la masa los motores pasan a trabajar como generadores devolviendo la energía a la red. En este sistema el peso es constante y está unido al cable de manera permanente, por lo que la profundidad del pozo determina la energía almacenada. Aumentar la capacidad energética del sistema requiere hacer el pozo más profundo.

Como hemos comentado anteriormente esta metodología tendría la gran ventaja de las ya extruidas cuencas mineras españolas actualmente en desuso, por lo tanto, a la hora de dimensionar el primer criterio restrictivo será la profundidad del pozo. Tras fijar una altura determinada habrá que ajustar el peso y material del cilindro, variando esto según la energía que se quiera almacenar. Por último, habrá que dimensionar los motores/generadores y los cabrestantes en función de la potencia objetivo.

La altura vendrá regida por la fórmula:
$$h = \frac{E_{\text{útil}}}{m \cdot g \cdot \eta_{\text{descarga}}}$$

En un primer análisis para un E=500 kWh como nos hemos propuesto para un rendimiento aproximado del 90% necesitaríamos una masa de peso aproximadamente 410400 kg suspendida a 500m, a esto habría que añadirle la mitad de la longitud que tenga el cilindro y que dependerá de su masa y de su densidad. En España el pozo minero más profundo se encuentra en Linares con 1008 m.

Tras dimensionar los elementos dependientes de la capacidad de almacenamiento energético, habría que diseñar los que determinan la potencia. Al cargar el sistema podríamos decir que trabaja con par constante. Dadas las bajas velocidades a las que va a trabajar nuestro sistema podemos despreciar la resistencia aerodinámica del dispositivo en movimiento (que depende de la velocidad al cuadrado). También despreciaremos la variación del cable desenrollado por su insignificante peso en comparación con el cilindro total. En cualquier caso, si queremos que el sistema pueda operar a distintos niveles de potencia constante se requiere trabajar a distintas velocidades de ascenso/descenso, y por tanto es necesaria la utilización de convertidores electrónicos de frecuencia.

Además habría que dimensionar cuidadosamente el sistema de frenado, tanto el de funcionamiento normal para acumular energía como el de elemento de seguridad en caso de pérdida de tensión en caso de pérdida de tensión de la red durante las fases de carga y descarga.

En cuanto al mantenimiento, habría que disponer elementos mecánicos robusto dado el riesgo que tendría la caída de una masa tan pesada, por lo tanto el mantenimiento de cables y guías es crítico. Se estima que la vida útil de este sistema está en torno a los 50 años.

Como resultado se indica que esta tecnología se encuentra en un TRL 3 con una probable disponibilidad en menos de 5 años.

b) Clase B. Transportadores de masas sólidas entre dos cotas



Ilustración 3.2- Prototipo ARES

El sistema se desplaza sobre raíles de una cota inferior a una superior aumentando su energía potencial. Una vez se necesite esa energía acumulada, se desplaza en sentido contrario disminuyendo su altura y utilizando el freno regenerativo.

En este caso hay que tener en cuenta que el sistema puede trabajar con una masa variable, lo que daría flexibilidad a la hora de cubrir las demandas de la red y lo que le hace una tecnología mucho más escalable tanto en energía como en potencia.

La energía dependerá del número de bloques de hormigón a transportar que quedará limitado por el espacio de almacenamiento en las estaciones superior e inferior.

Vendrá regido por la siguiente ecuación:

$$\Delta h = \frac{E_{almacenada}}{m_{almacenada} * g * \eta_{descarga}}$$

La potencia por otra parte podremos incrementarla de varias formas:

- Aumentando la velocidad de los trenes y manteniendo su composición (carga y número de locomotoras). Es decir, masa constante pero velocidad variable.
- Manteniendo la velocidad de los trenes (idealmente, con los motores en sincronismo con la red, minimizando pérdidas), y variando su composición (más carga y/o más locomotoras).

Asumiendo que se tiene una inclinación constante en el terreno de valor α :

$$v = \frac{P_{\acute{u}til}}{m_{tren} * g * \eta_{descarga} * \text{sen } \alpha}$$

Comparando estas fórmulas con las utilizadas en el prototipo anterior de Gravitricity, podemos concluir que transportar las masas por un terreno inclinado equivale a reducir el peso o lo que es lo mismo a disminuir la potencia y la energía almacenada, es decir, que para conseguir igualar estos parámetros a los de Gravitricity tendríamos que recorrer una mayor distancia a una mayor velocidad.

Si analizamos la pendiente, nos encontramos varios problemas:

- En términos de recursos materiales, un sistema es menos eficiente cuanto menor es la pendiente.
- Cuanto menor es la pendiente, mayor debe ser el módulo de la velocidad para mantener una potencia constante.

En vista de estas premisas, vemos que interesa trabajar con una pendiente lo mayor posible, pero aumentar la pendiente necesitaría tener una orografía muy específica que además no alterase el entorno.

Por otra parte no podemos olvidar que las ruedas pierden tracción a partir de una determinada inclinación, es decir, si decidimos aumentar la pendiente a partir de una determinada inclinación tendremos que utilizar otros sistemas como ferrocarriles de cremallera o incluso funiculares.



Ilustración 3.3-Alternativa para pendientes mayores del 10%

En cuanto a la alimentación se usaría una alimentación trifásica pues ya hay pequeños trenes de transporte que operan a bajas velocidades y con grandes desniveles durante cortos recorridos, es decir, condiciones similares a las de ARES.



Ilustración 3.4-Ferrocarril de cremallera de Gornergrat (Suiza)

Al igual que la alimentación, su mantenimiento tampoco sería un gran reto pues ARES no deja de ser una línea de ferrocarril eléctrico con estaciones de carga y descarga que se podría beneficiar de la amplia experiencia operativa en este aspecto.

En cualquier caso habría que prestar especial atención a los fallos en el asilamiento de la línea, los esfuerzos mecánicos sobre los aisladores o la rotura de cables, así como la formación de manguitos de hielo en la catenaria si el tren discurriera por zonas de alta altitud (Zonas B o C).

Para evitar este tipo de averías habría que realizar revisiones periódicas para limpiar los aisladores y verificar que no tienen fisuras. La vida útil con un correcto mantenimiento suele estar en los 40 años.

Como resultado se indica que esta tecnología se encuentra en un TRL 7, con una muy probable implantación en los próximos 5 años.

c) Clase C. Acumuladores hidráulicos.

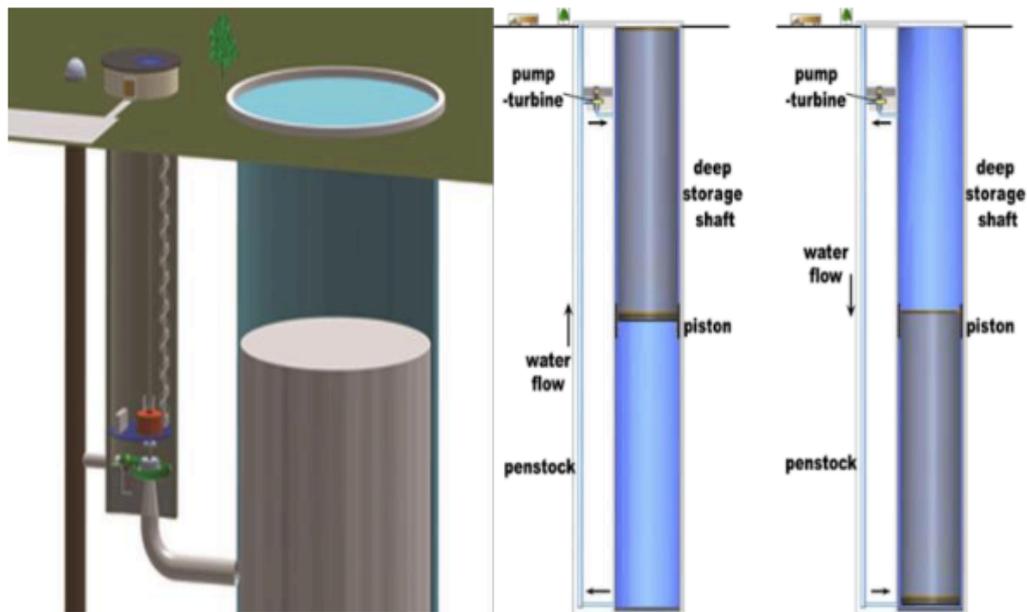


Ilustración 14 – Gravity Power Module

Ilustración 3.5- Prototipo Gravity Power

Con este sistema de almacenamiento de energía gravitacional, también consiste en elevar una gran masa de hormigón en el interior de un pozo. La principal diferencia es que en este caso, el cilindro actúa como un pistón empujando el agua y moviendo una turbina de tal forma que se evita el paso de agua de un lado al otro.

Para almacenar la energía se llena el pozo de agua, esta se bombea de la parte superior a la inferior por medio de conducción paralela, causando la elevación del pistón. Si queremos devolver la energía almacenada, se abre la válvula y se hace operar a la bomba, de tipo reversible, como turbina, descendiendo el cilindro e impulsando el agua de nuevo a la parte superior.

Si tomamos como referencia el émbolo en su posición más alta, lo cual consideramos como sistema cargado, la energía entregada a la red vendrá determinada por:

$$E = (\rho - \rho_w) \cdot g \cdot S \cdot h \cdot (H - h) \cdot \eta$$

Siendo ρ = densidad del pistón; ρ_w = densidad del agua (1.000 kg/m^3);

S = sección del pozo; g = aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$);

h = altura del émbolo; H = profundidad del pozo; η =eficiencia de descarga.

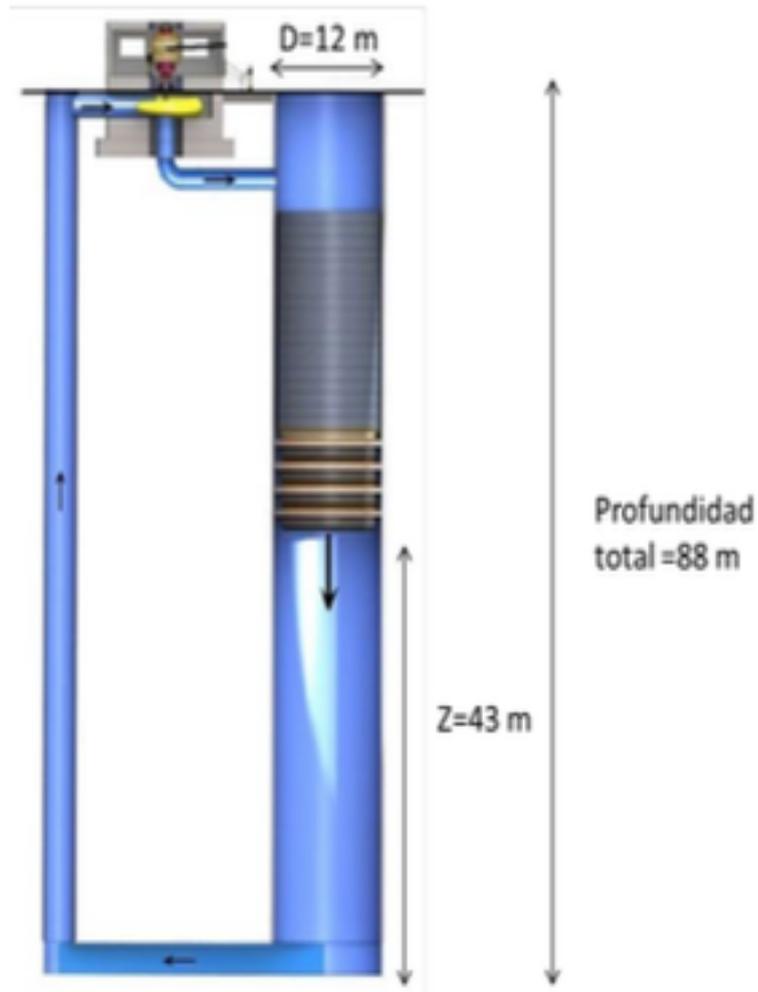


Ilustración 3.6 -Dimensiones del prototipo

Si como hemos dicho anteriormente nos fijamos el objetivo de $E=500\text{kWh}$, necesitaríamos un diámetro de 12 m, una longitud de pistón de 45m y un pozo de al menos, 88m. Debemos sobredimensionar la estructura debido a los rendimientos de eficiencia de descarga que serán menores del 100% y en previsión de las pérdidas por rozamiento al sellar el pistón para evitar el paso de agua de un lado al otro y en la válvula de admisión.

En términos de potencia, dado que el agua transcurre de un al al otro de la turbina se considera que se mantiene constante la presión entre salida y entrada, así que si tenemos caudal constante, según la siguiente fórmula, también tendremos potencia constante:

$$P = \eta \cdot Q \cdot g \cdot (\rho - \rho_w) \cdot h$$

con Q = caudal circulante por la turbina

Una vez fijada la potencia que se propone, que deberá variar entre 5 y 500 kW, hay que elegir el tipo de turbina con la que operar. El principal problema de trabajar con una única turbina reversible en un rango tan amplio de potencias es que como se puede ver en su curva de rendimiento se muestra que este cae notablemente al operar por debajo del 50% de la potencia nominal en turbinas como la Francis o la hélice.

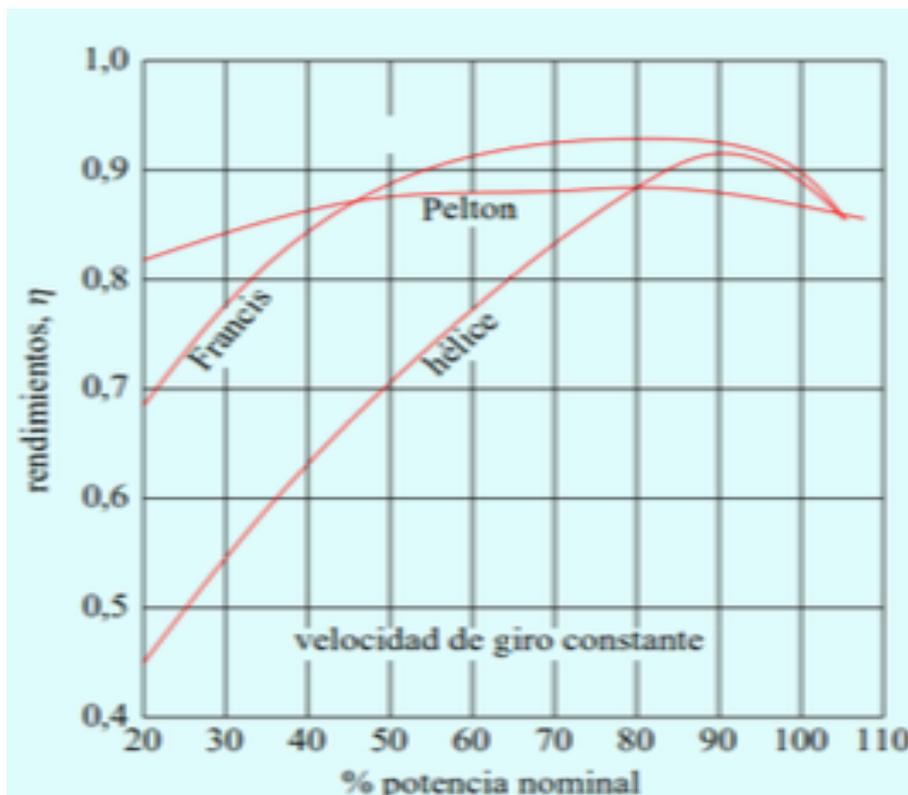


Ilustración 3.7 - % potencia nominal frente a rendimiento en turbinas

Los pares de polos dependerán de la potencia a la que estemos trabajando, otra opción es utilizar electrónica de potencia para poder operar la turbina a velocidades diferentes

de la de sincronismo, lo que permite regular el caudal y la potencia en un margen más amplio y con mejores rendimientos que utilizando válvulas de control de admisión.

En cuanto al mantenimiento, Gravity Power es la que presenta de las tres la tecnología menos probada. Su punto más crítico es el sello hidráulico entre émbolo y pozo, que además incluye pérdidas por rozamiento considerables. No se conocen suficientes tecnologías concretas para ello, por lo que es un factor importante que puede condicionar su viabilidad técnica.

Como resultado se indica que esta tecnología se encuentra en un TRL 4.

d) Clase D. Plantas flotantes de almacenamiento energético.

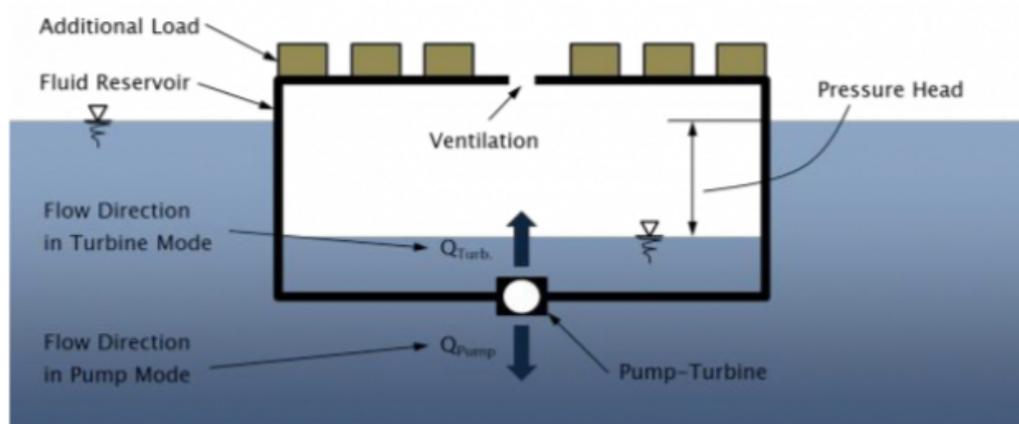


Ilustración 3.8- Prototipo Universidad Innsbruck

Sólo se ha identificado un grupo de trabajo (Universidad de Innsbruck) trabajando en este tipo de propuestas. También aquí se presenta un amplio rango de posibilidades, con sistemas cuya flotabilidad se modifica en función del agua que encierran en su interior, en depósitos cerrados o abiertos al exterior y que se ven complementados por posibles incrementadores de presión, como cámaras de aire, u otros elementos como boyas conectadas con cables a la planta. En este momento las propuestas carecen de la concreción necesaria en términos de masa o tamaño para una evaluación, más allá de señalar la necesidad de una conexión eléctrica a un elemento flotante en una gran masa de agua.

Como resultado se indica que esta tecnología se encuentra en un TRL 1, lo que hace muy improbable su implementación en menos de 5 años.

3.2 Optimización de la tecnología

A la hora de elegir nuestro prototipo final no podemos olvidar cuatro parámetros básicos que debemos optimizar como son eficiencia del ciclo, tiempo de respuesta y duración de descarga y el rango de potencia.

3.2.1 Tiempos de descarga y duración de descarga

Los tiempos de descarga y su duración condicionará en gran medida que nos decantemos por un prototipo pues cada aplicación requiere que la descarga se pueda prolongar durante un periodo de tiempo diferente. De acuerdo con esto se enumeran una serie de aplicaciones dependientes del tiempo de descarga:

- Tiempos de descargas de horas. Necesario para:
 - Equilibrado de cargas y mejoras de factores de carga.
 - Almacenamiento para sistemas de cogeneración, mejorando la eficiencia global ofreciendo una división óptima entre energía térmica y electricidad independientemente de la demanda.
 - Reducción de consumo de combustibles fósiles y utilización de las energías renovables.
 - Almacenamiento para vehículos eléctricos.

- Tiempos de descargas de minutos

Este rango es útil para unidades industriales móviles, para proporcionar mejores condiciones de trabajo y para mejorar la fiabilidad de suministro en unidades de alimentación ininterrumpida.

- Tiempo de descargas de segundos y de milisegundos
 - Suavizado de la potencia de salida de generadores diésel y eólicos
 - Mejora de la estabilidad mediante un servicio que tiene como objetivo mantener la estabilidad de frecuencia ayudando a evitar el deslastre de

carga mediante una respuesta muy rápida de los sistemas distribuidos de almacenamiento de energía

- Estabilización de tensión
 - Control de tensión primario: Control automático local que mantiene la tensión en un bus dado en su punto de consigna.
 - Control de tensión secundario: Control automático centralizado que coordina las acciones de los reguladores locales para gestionar la inyección de potencia reactiva dentro de una zona de tensión regional.
 - Control de tensión terciario: optimización manual de los flujos de potencia reactiva a través del sistema de potencia.

- Contramedida frente a apagones (blackout): Uso de almacenamiento de energía para restaurar el sistema o una planta de energía después de un apagón, ya que se necesita electricidad que no se puede extraer en la red.

- Regulación de frecuencia
 - Primaria: mantiene un equilibrio entre la generación y el consumo (demanda) dentro del área síncrona. Su objetivo es estabilizar la frecuencia del sistema a un valor estacionario después de una perturbación o incidencia de duración del orden de segundos, pero sin restablecer la frecuencia del sistema y los intercambios de potencia a sus valores de referencia. Tradicionalmente, los proveedores de este servicio disponen de 30 segundos para desplegar su plena potencia. Algunas tecnologías de almacenamiento de energía se pueden desplegar en una fracción de segundo.
 - Secundaria: control automático centralizado que ajusta la producción de energía activa de las unidades generadoras para restablecer la frecuencia y los intercambios con otros sistemas a sus valores objetivo después de un

desequilibrio. Mientras el control primario limita y detiene las excursiones de frecuencia, el control secundario vuelve a la frecuencia a su valor objetivo.

- Terciaria: Utilizado para restaurar las reservas de control de frecuencia primaria y secundaria, para gestionar las congestiones en la red de transmisión y para devolver la frecuencia y los intercambios a su valor objetivo cuando el control de frecuencia secundario no puede realizar esta última tarea.

3.2.2 Rango de potencia

En este apartado nos referimos a las distintas potencias a las que se prevé que pueda operar nuestro sistema.

Comparando a modo de tabla los últimos parámetros obtenemos los siguientes resultados:

PROYECTO	TIPO	Rango de Potencia	Tiempo de respuesta	Duración de descarga
Gravitricity	A	0,5-16 MW	0,5 segundos	30 min -2 h
ARES	B	100-1000 MW	25 segundos	4-8 h
Gravity Power	C	1200 MW	15 segundos	10 min-4 h

Tabla 3.1- Parámetros de evaluación de objetivos de propuestas tecnológicas de almacenamiento gravitacional

Si bien, no dejan de ser prestaciones establecidas por los proponentes de cada alternativa como objetivo futuro, nos sirven como orientación de que podemos esperar de cada alternativa.

3.3 Evaluación de viabilidad económica:

Aunque posteriormente se realizará un informe de costes con la tecnología finalmente elegida, tenemos que estimar el coste aproximado de la energía producida por cada una de ellas para obtener cual es la más económica.

Al tratarse de nuevas tecnologías, la estimación de estos costes tiene un alto grado de incertidumbre, más aún en este caso pues ninguna de las tecnologías anteriormente comentadas ha llegado a la fase de prototipo operativo. Simplemente se tienen cálculos y estimaciones proporcionadas por sus impulsores.

Además, al requerir todas las tecnologías una infraestructura con características muy concretas en el terreno, tendremos una parte muy significativa de coste variable y dependiente de la localización final del proyecto. En este aspecto tanto como Gravitricity Power toman una gran ventaja con respecto a ARES pues las dos primeras podrían aprovechar pozos mineros abandonados, lo cual reduciría considerablemente el coste total, mientras que ARES necesita un terreno muy determinado por una pendiente no demasiado pronunciada y además mantenida durante varios kilómetros.

Dentro de la incertidumbre, Gravity Power ha proporcionado información sobre la inversión necesaria para plantas de distintos tamaños, a partir de la cual se pueden estimar los ratios de €/kW y €/kWh para plantas de otras potencias y capacidades.

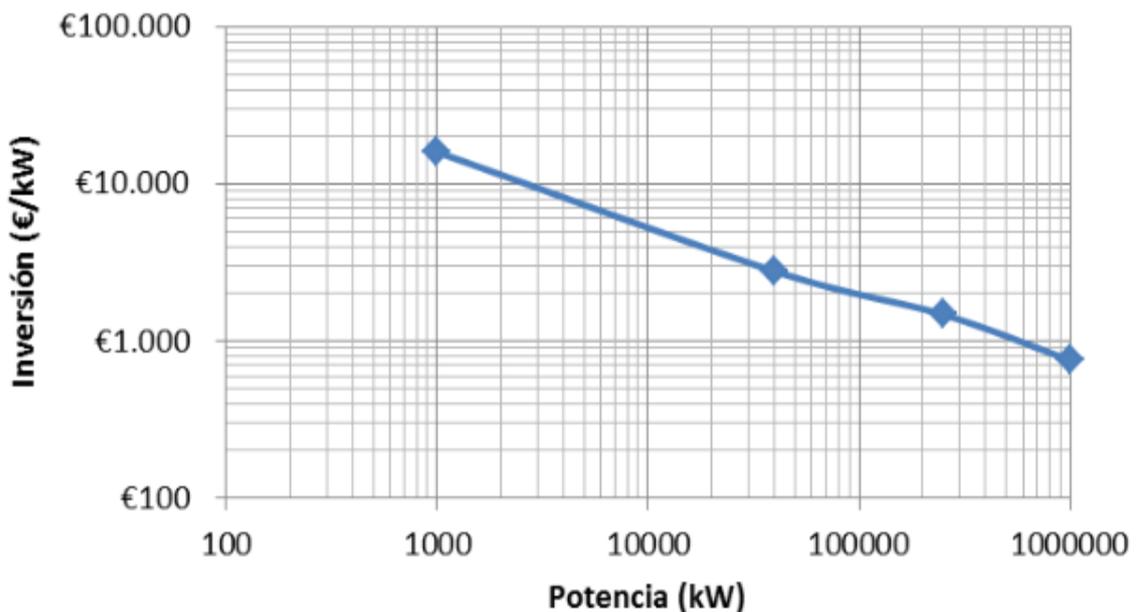


Ilustración 3.9- Coste de inversión vs. potencia para sistema Gravity Power

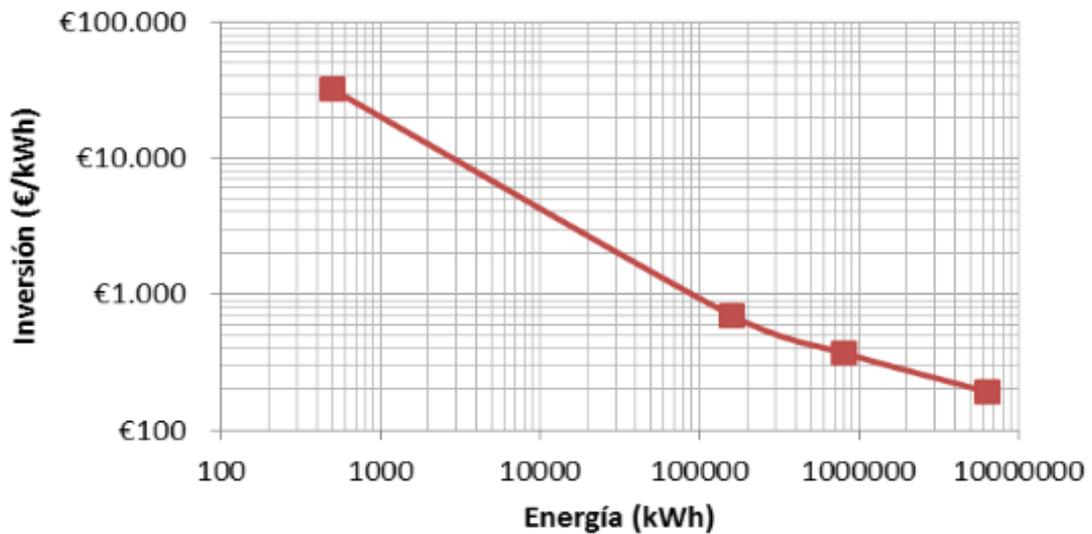


Ilustración 3.10- Coste de inversión vs. energía para sistema Gravity Power

Como se observa, ambos ratios crecen muy rápidamente al disminuir el tamaño de la planta, por lo que realizar extrapolaciones a partir de los mismos resulta muy arriesgado. Además, hay que tener en cuenta los costes de operación previstos y los altos costes de mantenimiento del sello hidráulico.

Desafortunadamente menos información se dispone de las propuestas de ARES y Gravitricity. Para la primera los datos de costes e inversiones disponibles se refieren a una instalación mucho mayor, de la cual resulta muy arriesgado inferir ratios aproximados. En el caso de Gravitricity se dispone de ratios de inversión, pero es dudoso a qué capacidad y potencia de planta corresponden. Además, los costes de operación son desconocidos. A pesar de todo, se han calculado las inversiones y los valores del LCOE (Levelized Cost of Electricity) con los ratios de inversión disponibles, y asumiendo como costes de operación y mantenimiento para Gravitricity costes inferiores que para Gravity Power, pues Gravitricity no necesitaría el comentado sello hidráulico.-

En la siguiente tabla se resumen los datos disponibles y los resultados obtenidos, aunque sólo son relativamente fiables los correspondientes a Gravity Power. Para Gravitricity y ARES, sólo se puede afirmar que coste e inversión superarán los valores indicados.

Parámetro	Unidad	ARES (Nevada)	GPM (Weilheim)	Gravitri- city	ARES
Potencia instalada	kW	44100	1000	500	500
Capacidad energética	MWh	12,5	0,5	0,5	0,5
Ratio inversión/potencia	€/kW instalado	957	16.000	984	1.334
Ratio inversión/energía instalada	€/MWh instalado	3.828.000	32.000.000	984.000	1.334.000
Vida de la instalación	años	40	40	50	40
Coste variable operación	€/MWh entregado	13,92	8,7	8,7	13,92
Horas equivalentes/año	horas/año	3000	3000	3000	3000
Rendimiento ciclo	%	76	80	0,9	0,76
Precio energía	€/MWh	57	57	57	57
Energía descargada	MWh/año	132300	3000	1500	1500
Energía perdida	MWh/año	41778	750	166,7	473,7
Energía cargada	MWh/año	174078	3750	1666,7	1973,7
Inversión	€	42.203.700	16.000.000	492.000	667.000
Retorno (amortización)	%	2,5	2,5	2	2,5
Coste financiero inversión	€/MWh entregado	7,975	133,33	6,56	11,12
Coste operación y mantenimiento	€/MWh entregado	13,92	8,7	8,7	13,92
Coste pérdidas	€/MWh entregado	18	14,25	6,33	18
Coste energía entregada	€/MWh entregado	57	57	57	57
LCOE	€/MWh	96,895	213,28	78,59	100,04

Ilustración 3.11- LCOE, inversión y costes de inversión y mantenimiento de las distintas propuestas.

3.4 Evaluación del impacto medioambiental y social

Actualmente y tras revisar la normativa, se observa que la regulación y la legislación española no menciona ningún sistema de almacenamiento de energía a excepción del bombeo hidráulico y del almacenamiento térmico en plantas solares termoeléctricas. Ninguna otra tecnología de almacenamiento posee una normativa de impacto ambiental asociada específica según la Ley del Sector Eléctrico.

3.4.1 Evaluación del impacto medioambiental

Se indican los aspectos a tener en cuenta que serán evaluados de forma particular y en su conjunto en una escala del 0 al 10, siendo 0 una tecnología con impacto negativo en el medio ambiente y 10 con impacto positivo.

- **Modificación del régimen:** Se valorará si el proyecto provocará una alteración crítica para la flora y fauna, un cambio biológico, cambios en el hábitat o una alteración en la cubierta terrestre. Además, se valorarán las consecuencias en la hidrología, citando posibles consecuencias en canalizaciones, instalaciones de riego, ríos o embalses. Se puede comentar en este apartado el riesgo de incendios o aumento de ruido y vibraciones en el entorno.
- **Transformación del territorio y construcción:** Se valorará si la instalación requiere de edificios anexos, almacenamientos de agua al aire libre adicionales, estructuras en alta mar, construcción de túneles o estructuras subterráneas. También se valorará la incorporación de instalaciones complementarias requeridas para cada tecnología.
- **Extracción de recursos:** Hace referencia a la necesidad de perforaciones, excavaciones superficiales, excavaciones subterráneas y explotación forestal.
- **Alteraciones del terreno:** Referido al control de la erosión, cultivos, sellados de minas y control de residuos. Además, se valorarán cambios producidos en el paisaje.

3.4.2 Evaluación del impacto social

Es algo complejo de valorar, en muchas ocasiones los riesgos sociales encarecen los proyectos o incluso a hacen fracasar algunos de ellos. Todas las propuestas plantean una forma de almacenamiento de energía sin sustancias peligrosas, gases a presión, ni grandes riesgos de accidentes, siendo tecnologías limpias (libres de emisiones de gases contaminantes o de efecto invernadero). Su utilidad como estabilizador de generación no gestionable puede impulsar la implantación de instalaciones generadoras de energías renovables, por lo que su aceptación social vendrá en dichos casos ligada a promover proyectos de generación renovable. Se evaluará según escala del 0 al 10 respecto a su idoneidad, siendo 0 una tecnología con impacto negativo y gran oposición y 10 con impacto positivo y promovido por la sociedad.

- **Cambios de tráfico:** Considerando instalaciones de acceso, como por ejemplo: ferrocarril, carreteras o caminos.
- **Riesgo de accidentes:** Se evaluarán posibles accidentes como por ejemplo: explosiones, escapes, fugas y fallos de funcionamiento.

Una vez expuestos los criterios de evaluación legales, medioambientales sociales y dada la complejidad de nuestras tecnologías y que cada una de ellas puede influir de una forma diferente por su tipo de construcción y la transformación visual del terreno, se opta por discutir cada una de ellas individualmente.

3.4.3 Evaluación de cada prototipo

a) Clase A – Gravitricity

Gravitricity en lo que a su construcción respecta es básicamente una perforación en el suelo mediante una grúa que puede excavar a propósito o ser un pozo preexistente y/o abandonado (como podrían ser los antiguos pozo mineros del territorio español). El impacto ambiental de dicha tecnología cambia sustancialmente si hablamos de algo ya construido y en este caso, abandonado y sin ningún interés comercial o natural, pues si esto ya existe la afección es mínima.

En cuanto a los parámetros medioambientales comentados anteriormente:

- **Modificación del régimen:** Como hemos dicho el impacto medioambiental de esta tecnología cambia mucho si partimos de un supuesto ideal como sería la utilización de una mina en desuso o si por el contrario tuviéramos que emplazarla en una parcela con mucha vegetación y fauna. En cualquier caso, el pozo sería estrecho y el impacto en la superficie de terreno afectada por el mismo es muy reducida. No podemos olvidar que durante la operación se pueden causar vibraciones y ruidos que habría que amortiguar con el diseño de una tapa para el pozo. Por lo tanto, podemos considerar que tendría un impacto de 8 si no hay que perforar el agujero, ya que aprovechamos algo sin uso para un fin limpio y no contaminante, y de 4 si tenemos que utilizar una zona no acondicionada.

- **Transformación del territorio y construcción:** Se necesitaría un edificio para cubrir el pozo y alojar la maquinaria, los cabrestantes, los elementos de control y la infraestructura necesaria para su posterior conexión a la red eléctrica. Tratándose de un émbolo tan pesado, aproximadamente 400 toneladas, en las primeras fases de implantación podría llegar a un impacto 4, debido a los desplazamientos de esas masas y su montaje. Una vez instalado la afección es mínima.

- **Extracción de recursos:** En el caso de que el pozo sea de nueva excavación será necesario evacuar y realizar el vertido de los materiales extraídos en una localización donde no produzcan una afectación ambiental importante, en este caso y dependiendo del terreno en el que excavemos podemos llegar a un impacto medio sobre el medioambiente. Las características específicas de la ubicación pueden condicionar este vertido. Si por el contrario utilizamos un terreno ya acondicionado únicamente tendríamos que desechar material si necesitáramos de una profundidad mayor, pudiendo tener incluso un impacto nulo en este aspecto.

- **Alteraciones del terreno:** A nivel superficial las alteraciones del terreno son mínimas puesto que la mayor parte de la infraestructura se encuentra bajo tierra.
- **Cambios de tráfico:** Utilizando instalaciones antiguas no requerirá de nuevos accesos a no ser que los anteriores hayan quedado obsoletos ante lo cual habrá que realizar nuevos viales de acceso a la estructura.
- **Riesgo de accidentes:** Por sus características y su simpleza podemos decir que esta instalación no es propensa a explosiones, vertidos ni desastres ambientales de ese ámbito. Sin embargo, como todo sistema que acumula energía es susceptible de causar un accidente si la energía que almacena se libera de manera rápida e incontrolada. En nuestro caso, el máximo peligro sería la caída de esa gran masa desde su cota máxima, esto podría traer una pequeña sacudida sísmica muy localizada que no debería tener graves consecuencias. En vistas a estas premisas podemos considerar que esta es una instalación con impacto positivo para la sociedad.

Desde el punto de vista social, una instalación de este tipo no genera un número importante de nuevos puestos de trabajo más allá de su periodo de construcción. Su asociación a la generación renovable como elemento facilitador de su integración en la red puede ser percibido positivamente por la población, y la escasa afectación visual y acústica son también factores positivos. En el caso de utilizar pozos mineros es importante que la población tenga asimilada la situación de dichas explotaciones como definitivamente abandonadas. En caso contrario, podría considerar su utilización para almacenamiento energético como un obstáculo casi definitivo para una posible futura reapertura que permitiría reactivar la economía local, por ello puntuamos este impacto con un 7 siempre a expensas de posibles críticas por la falta de conocimiento del desuso actual de la zona.

b) Clase B – ARES

A todos los efectos de viabilidad legal y medioambiental, ARES se puede aproximar a un proyecto ferroviario. Por esta razón, es posible aplicar la normativa de impacto ambiental de ferrocarril y otro tipo de proyecto. (Real Decreto Legislativo 1/2008 de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos consolidada en 26/03/2010). Para cada proyecto se debe realizar una evaluación de impacto medioambiental.

A diferencia de las otras dos alternativas analizadas, ARES requiere la ocupación de una franja importante de terreno, por lo que la afectación a distintos elementos es mayor y muy dependiente de las características concretas de la región donde se vaya a realizar el proyecto. Idealmente se trata de zonas de montaña, con un desnivel importante pero accesible mediante una pendiente moderada y uniforme. Aunque es menos probable que en las otras alternativas, sería también posible localizar un tramo de ferrocarril de montaña con las características orográficas y de trazado adecuadas para ser utilizado. Como se ha visto, para un demostrador a la escala propuesta basta un trazado de unos pocos kilómetros.

A continuación se analizan los distintos parámetros medioambientales orientados a este proyecto:

- **Modificación del régimen:** Las afectaciones de este tipo de tecnología variarán considerablemente dependiendo del trazado de la línea. Pueden producirse modificaciones en la fauna local (atropellos, migración de poblaciones o cambios de sendas), a la hidrología o a las redes de suministro. Además, como se dijo anteriormente, convendría que fuera una línea electrificada con catenaria trifásica como originariamente propone el prototipo ARES (aunque en este punto se podrían hacer cambios y ver otras opciones posibles como catenaria simple o incluso sin catenaria). Todo ello y considerando las innumerables zonas patrimonio histórico y nacional en España, tratamos este prototipo como impacto 2, pues altera muy considerablemente el paisaje y sería un elemento visible desde varios kilómetros. El ruido en este caso no sería un gran impedimento pues si bien, los convoyes por las vías producen un ruido moderado, dada la baja velocidad a la que se operarían.

- **Transformación del territorio y construcción:** Además de la infraestructura ferroviaria y la correspondiente eléctrica necesitaríamos la implementación de medios de carga y descarga de los vagones de los bloques de hormigón transportados, tanto en la estación superior como en la inferior. Si por el contrario, se optara por un sistema con carga constante haría falta un espacio para que estos quedasen estacionados. De una forma u otra, se requieren espacios de almacenamiento suficientemente amplios (según la capacidad energética deseada) en ambos extremos de la línea. De esta forma es posible aprovechar la mayor flexibilidad del sistema ARES frente a los otros, y su mejor capacidad de escalado tanto en energía como en potencia. No obstante, dichas estaciones incrementan el impacto ambiental del sistema, sobre todo en el aspecto visual, teniendo que llevarlo a zonas alejadas de los núcleos urbanos para no tener impactos demasiado negativos.

- **Extracción de recursos:** En un principio sería similar al de las infraestructuras ferroviarias. No requeriría grandes perforaciones subterráneas pues no se prevé ninguna zona soterrada, aunque dependiendo de la zona de implantación si que puede necesitar de una zona de explotación forestal.

- **Alteraciones del terreno:** La primera premisa sería no afectar zonas protegidas medioambientalmente. Se puede valorar la instalación de medidas correctoras para la contaminación paisajística mediante barreras de vegetación, pero en cualquier caso tendría al menos un impacto de 4 en el entorno, sin contabilizar su posible adhesión a algún nuevo parque eólico.

- **Cambios de tráfico:** En función del trazado de la línea se haría necesaria la construcción de nuevos viales de acceso a la instalación. En cuanto a las carreteras ya construidas, se procurará buscar un terreno que no afecte a su normal desarrollo y que no requiera una obra de adecuación demasiado compleja, dado que estamos hablando de unos 10 km de recorrido no será fácil tener una fácil afectación social e incluso política.

- **Riesgo de accidentes:** Los trenes circulan a una velocidad moderada, lo que limita el riesgo de accidentes. No obstante, al tratarse de vehículos sin conductor deben preverse los elementos de seguridad adecuados (limitación de accesos, señalización, sistemas de control o sensores de movimiento). Se prevé un impacto de 2 dado que, como hemos dicho, serían dispositivo sin conductor, lo cual de cara a la sociedad aumenta el impacto negativo considerablemente.

Desde el punto de vista social, ARES parte con la gran desventaja respecto a sus competidoras del mayor impacto paisajístico. ARES es una tecnología ideal para países con grandes extensiones de territorio como podría ser EEUU, donde de hecho se están realizando los primeros prototipos, pero con mucho más compleja implantación en países como España. Además, dependiendo de la proximidad a núcleos urbanos el ruido generado por los trenes puede influir negativamente en su aceptación social. Al igual que Gravitricity, no produciría mucho empleo más allá de su construcción, pero sí que tiene un punto positivo al tratarse de una energía verde.

c) Clase C – Gravity Power

En cuanto al impacto medioambiental, legal y social Gravity Power tiene bastantes características comunes con Gravitricity. Al igual que en esta última, es posible utilizar para su implementación antiguos pozos mineros abandonados, no siendo necesarias profundidades tan grandes. Por contra, el pozo debe ser cuidadosamente acondicionado, impermeabilizado para contener el agua en su interior y revestido adecuadamente para permitir el deslizamiento del émbolo en su interior. La utilización o no de estos pozos tiene repercusiones sobre su impacto ambiental y su aceptación social.

A continuación se analizan los distintos parámetros medioambientales orientados a este proyecto:

- **Modificación del régimen:** Al igual que Gravitricity, las consecuencias en el medioambiente dependerán en gran medida de si la instalación parte de una excavación en desuso o de una parcela con vegetación. Si se parte de una

excavación ya realizada, el impacto será mínimo en la fase de construcción. Durante la operación, pueden causarse vibraciones y ruidos, debidos a la fricción del émbolo y la operación de las bombas/turbinas, pero el hecho de encontrarse en el subsuelo contribuye a su amortiguamiento.

- **Transformación del territorio y construcción:** Dado su sellado hidráulico, la instalación del prototipo requiere de una canalización paralela que también se tiene que tener en cuenta. La sala de la turbina se sitúa también bajo tierra y también es necesario un recinto para los elementos de control y la infraestructura necesaria para la conexión a la red eléctrica.

- **Extracción de recursos:** En el caso de que el pozo sea de nueva excavación será necesario evacuar y realizar el vertido de los materiales extraídos en una localización donde no produzcan una afectación ambiental importante. Por otra parte, es necesario llenar el cilindro de agua, esta agua funcionaría en circuito cerrado con lo que una vez lleno no necesitaría nuevos aportes, este último aspecto quizás podría hacer aumentar un punto su impacto negativo con respecto a los comentados en Gavitrlicity dada la escasez de esta en los últimos tiempos.

- **Alteraciones del terreno:** Al encontrarse la mayor parte bajo tierra, el entorno no sufre grandes alteraciones a nivel superficial.

- **Cambios de tráfico:** Utilizando instalaciones antiguas no requerirá de nuevos accesos a no ser que los anteriores hayan quedado obsoletos ante lo cual habrá que realizar nuevos viales de acceso a la estructura.

- **Riesgo de accidentes:** El sistema se podría considerar una tecnología segura. La rotura del cilindro o de la conducción paralela implicaría la liberación del agua en el subsuelo, en una cantidad limitada y con un caudal también contenido por el terreno circundante. Al contrario de Gravitricity, la caída del émbolo no tendría ninguna consecuencia grave debido al amortiguamiento del agua que evitaría un desplome y posterior impacto violento.

En el apartado de viabilidad social cabe destacar las mismas consideraciones que con Gravitricity sin olvidar el sobradamente conocido factor de oposición social a cualquier infraestructura eléctrica común a todas las alternativas que se han analizado.

4. Elección de la tecnología a implantar

Una vez evaluadas las opciones tecnológicas existentes respecto a su viabilidad técnica, económica, medioambiental y social se procedería a desarrollar la conclusión razonada y elección de una tecnología concreta para el diseño de un demostrativo de implantación en España. Al análisis anterior añadiremos un posicionamiento estratégico respecto a su potencial de desarrollo de estos sistemas en un futuro, vinculado a la sinergia con la integración de energías renovables previstas en territorio español.

4.1 Conclusiones respecto a la viabilidad técnica:

Para la implementación del demostrador de 500 kWh propuesto, ninguna de las tres alternativas analizadas ha resultado claramente inviable desde el punto de vista técnico, pero aquellas en las que la totalidad de la energía se concentra en un único sólido (Gravity Power y Gravitricity) presentan graves problemas para poder operar eficientemente a 5 y 50 kW. Tiempos de descarga tan largos (de más de una hora) junto con la limitación de realizar pozos de gran profundidad implica desplazamientos de masa excesivamente lentos (Gravitricity).

En el caso de Gravity Power la dificultad viene del rango limitado de potencias dentro del cual una única turbina/bomba puede trabajar eficientemente.

El sistema ARES es el más flexible de todos los analizados al utilizar varias masas independientes, lo que le proporciona más grados de libertad: varios trenes, con varias locomotoras por tren, con cargas variables por tren, operando a velocidades variables. Por ello puede operar a las tres potencias propuestas con mayor facilidad. Por su carácter modular, es también el que más fácilmente permite incrementar tanto la potencia como la energía de una instalación preexistente. Además es el más maduro y no plantea ningún reto tecnológico excesivamente ambicioso. Presenta la ventaja de una construcción más sencilla, al no requerir excavación, pero tiene como inconvenientes el necesitar un terreno determinado (pendientes) y ocasionar un impacto paisajístico mayor que las otras dos opciones.

A la hora de mirar su implantación a corto/medio plazo podemos observar que su desarrollo se encuentra en etapas bastantes similares. Si nos fijamos en sus niveles de madurez podemos ver que ARES se encuentra en un TRL (*Technology Readiness Levels*) de 6 lo que implica un sistema/prototipo validado en un entorno simulado con una muy probable disponibilidad en menos de 5 años. Por su parte Gravity Power y Gravitricity se encuentran en fases 3-4 que implican desarrollos a pequeña escala en laboratorio pero con una probable disponibilidad en unos 5 años.

4.2 Conclusiones económicas:

Si nos centramos en comparar económica nuestras tres tecnologías fijándonos en parámetros claves como su eficiencia, vida útil y coste de inversión obtenemos la siguiente tabla para nuestros objetivos fijados de E=500kWh y P= 500kW:

Proyecto	Potencia	Capacidad	Eficiencia	Vida útil	Coste de inversión
Gravitricity	500 kW	500 kWh	90%	50 años	984 €/kW
ARES	500 kW	500 kWh	76%	> 40 años	1334 €/kW
Gravity Power	500 kW	500 kWh	80%	> 40 años	16000 €/kW

Tabla 4.1- Comparativa de sistemas de almacenamiento en eficiencia, vida útil y coste de inversión

4.3 Conclusiones respecto al impacto medioambiental:

Gravity Power y Gravitricity tienen en común el no generar apenas impacto paisajístico ni requerir una orografía determinada, pudiendo construirse en terrenos llanos. Además, ofrecen una posibilidad para reutilización de pozos mineros abandonados, lo que permite reducir notablemente sus costes de construcción. El mayor riesgo tecnológico de las tres tecnologías lo presenta Gravity Power, fundamentalmente por el sellado que se requiere entre el émbolo y las paredes del pozo, que es crítico para la viabilidad técnica y económica del sistema.

Llegados a este punto dentro de nuestros tres prototipos podemos hacer dos subgrupos bien diferenciados. Por un lado, tenemos ARES, una tecnología que no supondría un reto a nivel técnico pero con una alta afectación paisajística y medioambiental. Por el otro, las tecnologías tanto de Gravitricity y Gravity Power a las que las ocurre lo contrario, tendrían una mínima afectación al medioambiente si utilizamos antiguas.

Centrándonos en nuestros primeros objetivos muchas de las propuestas de almacenamiento energético por gravedad han sido inicialmente pensadas para dar servicios de integración de renovables. ARES realiza sus demostradores asociados a campos eólicos y solares y Gravitricity sería una opción también viable siempre que hablemos de integración de generación renovable en red con periodos de operación algo más reducidos.

Con todo esto, y a modo de resumen, podemos englobar a Gravitricity y Gravity Power como tecnologías con un impacto medio o positivo ya que aprovechamos zonas totalmente inutilizadas, mientras que ARES se inclina más hacia la zona de impacto negativo con un valor de impacto de 3, que hace muy complicada su implantación real.

4.4 Conclusiones respecto al impacto social:

Respecto al impacto social, es de sobra conocida la oposición social que hay en España a cualquier tipo de infraestructura eléctrica. Aquí, nuestros dos subgrupos anteriormente citados quedan claramente restringidos pues a día de hoy es prácticamente imposible encontrar un terreno de fácil acceso con una pendiente relativamente baja pero constante (menor del 10%) que no transite por ninguna zona de interés paisajístico nacional y que no afecte a ningún tipo de fauna y flora. ARES es un prototipo mucho

más viable en países con EEUU donde existen grandes zonas de terreno inhabitadas que se prestan a estas tecnologías. En cuanto a la generación de riqueza todos tendrían una alta carga monetaria en sus primeras etapas de construcción, las cuales generarían numerosos puestos de trabajo tanto cualificados como no cualificados, pero que una vez finalizados no irían más allá. La riqueza asociada a estas instalaciones podría venir ligada a la construcción de parques de energías renovables, véase eólica, en sus proximidades.

4.5 Conclusión final:

Discutidos en los puntos anteriores la viabilidad técnica, el impacto económico y el impacto medioambiental y social tenemos que decidir cual de las tres propuestas elegimos para la implantación real. Fijándonos en el apartado de impacto social podemos darnos cuenta de que ARES es una propuesta prácticamente inviable en un país como España. No generaría los suficientes ingresos ni puesto de trabajo como para que fuera justificable su inversión.

Llegados a este punto, nos queda el segundo subgrupo, Gravitricity y Gravity Power. Dada la gran similitud entre estos dos prototipos nuestra elección la determinará su coste pues este será nuestro parámetro a minimizar. Como se puede apreciar en la Tabla 4.1, Gravity Power tiene un coste unitario de 10 veces más que Gravitricity. Esto viene fundamentado por los complejos sistemas de sellado que requeriría el émbolo para evitar que ese agua estancada pase de un lado a otro.

Además, al tratarse de un sistema de volumen variable pero con una cantidad de agua constante que pasará por la turbina, sabemos que es una tecnología que tiene un escalado muy complicado, es decir, una vez montemos toda la instalación no podremos variar su capacidad. Por contra, la capacidad y potencia de Gravitricity dependerá de la profundidad del pozo y de la masa del émbolo, a parte de la electrónica de potencia que se diseñe. Ambos son parámetros variables y adaptables en mayor o menor medida pues, la profundidad podemos aumentarla o incluso diseñar el accionamiento para dejar metros suficientes y sobrantes en el pozo para futuros almacenamientos superiores y la masa la podemos aumentar reforzando el sistema como sobrepesos o platabandas.

En cuanto a la profundidad que necesitaremos en uno u otro caso, es cierto que Gravitricity requerirá mayores alturas, esto no es problema pues en España podemos encontrar pozos abandonados con hasta 1000m de profundidad, además como hemos dicho admite la posibilidad de tener una profundidad “variable” mientras que Gravity Power nos muestra un sistema más compacto e irreversible.

Por último, atendiendo a los parámetros de evaluación de objetivos de propuestas tecnológicas de almacenamiento gravitacional podemos ver que aunque tienen tiempos de descargas muy similares, entre 10 minutos y 4 horas, Gravitricity posee un tiempo de respuesta de menos de 1 segundo mientras que el de nuestra segunda tecnología en discusión no bajarías de los 15 segundos.

5. Emplazamiento de la instalación

5.1 Elección del pozo abandonado

Una vez elegido y razonado el tipo de tecnología nuestro siguiente paso hacia su implantación real es la elección del lugar donde situarla. Como ya hemos dicho, para recortar en materia de costes se intentará utilizar un pozo abandonado. Desde principios del siglo XVIII y durante casi doscientos años, la explotación carbonífera en las cuencas mineras representó uno de los pilares fundamentales del desarrollo de nuestro país. A pesar de que durante los años 80 y 90, la crisis industrial eliminó prácticamente todas estas minas, aún quedan yacimientos aprovechables para nuestro fin.

Atendiendo a la fórmula de la energía que buscamos almacenar vemos que esta es directamente proporcional a la profundidad que tenga el pozo, por lo tanto, en nuestra búsqueda queremos que el pozo sea en la medida de lo posible el más profundo de España. En vista a estas premisas encontramos que el pozo con más profundo en España es el Pozo de San Vicente en Linares que cuenta con 1008 m.

5.2 Estado actual del pozo

La construcción del Pozo de San Vicente data de 1844, siendo explotado en sus primeros años por la sociedad La Vigilancia para posteriormente ser propiedad de la Sociedad Minero-metalúrgica de Peñarroya y la Compañía Minera de Linares. Estas dos sociedades fueron entre 1918 y 1967 las responsables de encargarse de las labores del propio pozo minero. Durante estos años se fue realizando paulatinamente la ampliación de la profundidad del pozo. En 1910 se realizaban trabajos hasta una profundidad de 600 m, años más tarde, en 1939 los trabajos extractivos llegaron a los 658 m. A partir de este punto se comienzan a realizar trabajos de investigación para sopesar la posibilidad de ampliar el filón de esta mina. Se profundizó en 1967 hasta los 1008 m definitivos pero paradójicamente este hecho fue el que hizo que la mina no progresará llegando a darse su paralización total debido a los numerosos resultados negativos.

5.3. Impacto social y recursos eléctricos disponibles

En cuanto al impacto social específico derivado de la elección de esta mina cabe destacar que el pozo permanece cerrado y sin actividad desde el 21 de Mayo de 1967, día en el que se dio la conocida como “Tragedia del Pozo de Linares”. En el último viaje de retirada de materiales para la paralización total de la mina, se produjo la rotura del cable de la máquina, ocasionando la muerte de seis mineros que circulaban por el pozo.

Puede parecer un hecho aislado pero en efecto este suceso se sigue recordando a día de hoy en los diarios locales como podemos ver en una publicación de 2017 en el Ideal de Jaén “50 años de la tragedia que marcó la minería” donde citando textualmente dicho artículo versa:

«Siempre ha estado en el recuerdo de toda la gente y fue un golpe duro que perdieran la vida los seis de una vez... siempre hay flores de los familiares o de gente vinculada a la minería»

Por todos estos factores habrá que sopesar más aún si cabe una posible reticencia contra la habilitación de este pozo como sistema de almacenamiento que puede llegar a dificultar en gran medida el proceso gubernativo.

En cuanto a los recursos eléctricos disponibles sabemos como ya hemos dicho que el pozo tiene unas medidas de 1008 m con una anchura de aproximadamente 2 m y una casa anexa para emplazar una máquina de bombeo y una máquina eléctrica de bobinado.



Ilustración 5.1 - Pozo de San Vicente, Linares



Ilustración 5.3- Parque eólico Sierra del Trigo

5.4.2 Parque solar

En cuanto a energía solar nos encontramos con el parque solar de Los Olivares, emplazado al norte de la ciudad de Jaén. Ocupa una superficie de 18 hectáreas para un total de 18000 módulos. Está construido en varios niveles para reducir su impacto visual y estimamos que genera unos 756 MW/año.



Ilustración 5.4- Parque solar Los Olivares

5.4.3 Parque fotovoltaico

Encontramos una planta fotovoltaica de 5400 kW en la localidad de Alcahuete. En este caso comparándola con las otras dos fuentes de energía estaríamos hablando de la más alejada ya que se encuentra a 50 km al suroeste de Jaén. Ocupa una superficie de 14000 m² con un total de 20000 paneles o lo que es lo mismo, el abastecimiento de 1500 viviendas convencionales durante aproximadamente 25 años.



Ilustración 5.5- Parque fotovoltaico Alcaudete

6. Diseño del accionamiento

Una vez evaluadas las características y el impacto medioambiental, legal y social de nuestros tres prototipos, hemos descartado ARES y posteriormente Gravity Power para quedarnos con Gaviticity como única tecnología para analizar y diseñar su implantación real. En este estudio se tratará de calcular los apartados mecánicos y sobretodo eléctricos para un prototipo de 5 kW con un objetivo de proyecto final de 5, 50 y 500 kW escalable.

Diseñaremos primeramente el accionamiento de 5 kW con sus parámetros atendiendo a longitudes óptimas para un ensayo a pequeña escala, para finalmente diseñar el prototipo real con el objetivo de tener una capacidad de 500kWh como premisa.

El conjunto estará compuesto por los siguiente elementos:

- Motor (1) con la capacidad de devolver energía a la red para desplazar nuestra gran masa en un movimiento de subida y bajada en el eje vertical.
- Caja reductora (2) de engranajes (utilizable o no dependiendo de unos criterios que comentaremos posteriormente) para conseguir las velocidades necesarias tanto en el motor como en la masa.
- Polea (3): Dispositivo mecánico que sirve para transmitir fuerza y potencia. En nuestro diseño será un elemento fundamental ya que dependiendo de su diámetro tendremos una velocidad angular resultante de la velocidad lineal a la que haremos caer el accionamiento.
- Cables (4): Conectarán nuestros motores con nuestra masa. El número de cables dependerá de los requerimientos a tracción que tenga nuestro accionamiento y del tipo de cable ya que dependiendo de la carga unitaria a rotura necesitaremos más o menos.
- Masa (5): Presumiblemente tendrá forma de cilindro por lo que habrá que buscar la relación óptima entre su altura y su diámetro fijándonos en los valores medios de profundidad y radio en los pozos mineros abandonados, sabiendo que en el peor de los casos estos se podrían aumentar, aunque se tratará de evitar los sobrecostes.

Dado que tenemos varios grados de libertad será muy importante fijar una altura y un peso del cilindro pues estas van directamente relacionadas a su capacidad, para después con ese peso diseñar la potencia nominal de esos motores y a su vez la velocidad a la que trabajará la tecnología.

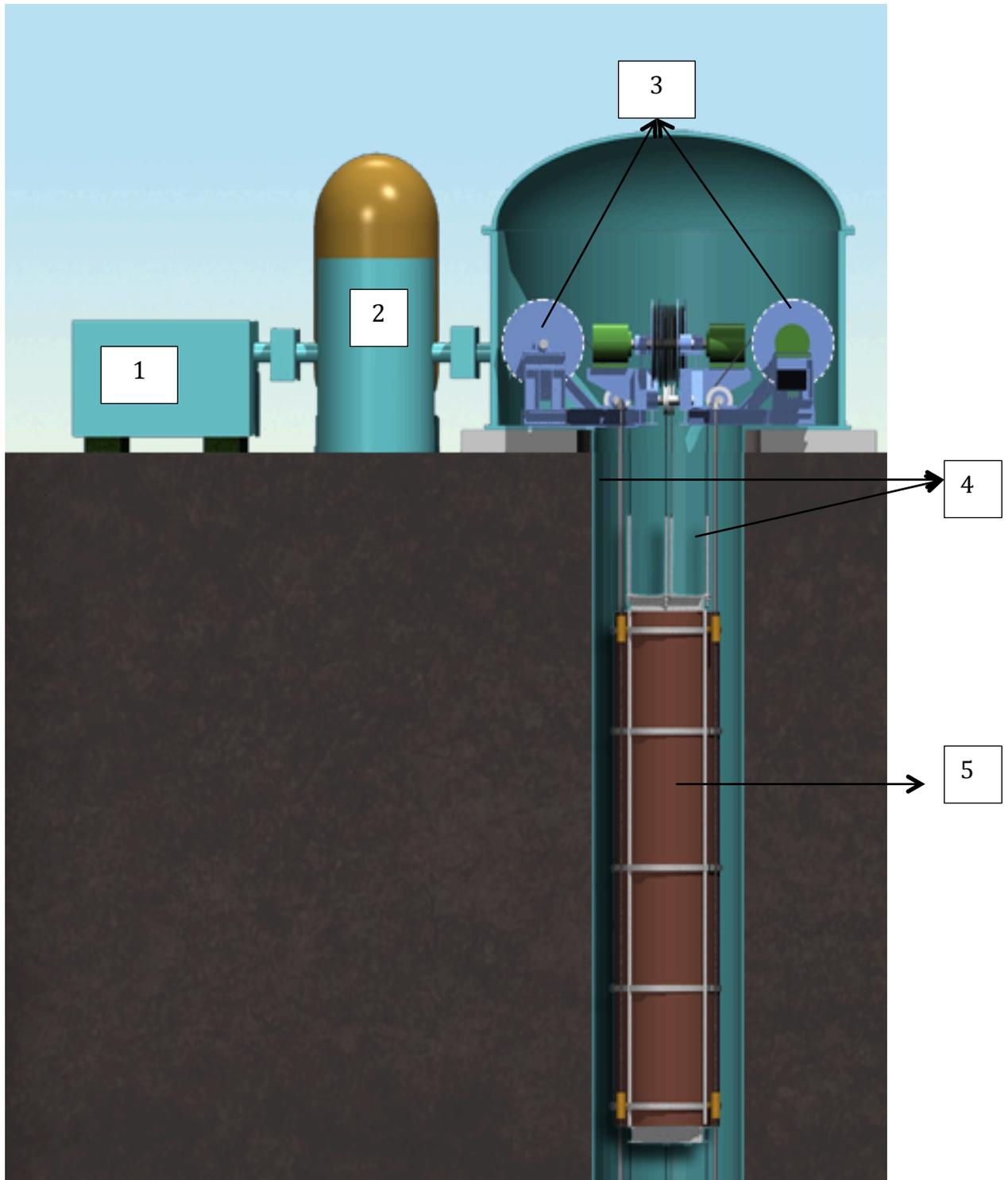


Ilustración 6.1- Prototipo Gavitricity

Nuestro estudio por tanto tendrá los siguientes pasos comunes tanto para el prototipo a pequeña escala como para el prototipo final:

1. Requerimiento de la capacidad a almacenar, de aproximadamente 500 kWh (5 kWh en el caso del prototipo a pequeña escala)
2. Evaluación y elección de la relación profundidad/peso del sistema. En el primer prototipo tomaremos unos valores que consideremos óptimos y cómodos para su ensayo mientras que para el definitivo, estudiaremos más detalladamente las zonas de implantación y pozos disponibles para cuantificar el proyecto de la forma más próxima a la realidad y con la afección mínima.
3. Atendiendo a la densidad del material que escojamos, la capacidad de nuestro sistema y la relación profundidad/masa, obtendremos un volumen específico para nuestro cilindro. Con ello podremos ir variando la relación altura/diámetro según las limitaciones de nuestro pozo, pues como ya hemos dicho, trataremos de realizar los menores cambios estructurales posibles.
4. Una vez establecida la masa fijándonos como objetivo las potencias tratadas anteriormente, se calculará la velocidad a la que trabajará el sistema.
5. Atendiendo a rendimientos aproximados de motor y reductora, obtendremos la potencia que debería proporcionar el motor. Si esta potencia excediera la nominal máxima de motores actualmente en uso en implantaciones como trenes o metros se optaría por emplear diversos motores con una potencia equivalente a la total necesaria para hacer el diseño lo más real posible.
6. Con este último cálculo seleccionaríamos también los pares de polos que tendrá nuestro motor atendiendo a que queremos tenerlo conectado a la red y a las especificaciones del fabricante.

7. Una vez conocidos la velocidad angular en el motor y la velocidad lineal a la que cae el accionamiento determinaremos el radio de la polea, así como la utilización de reductora o no y en su caso la elección de la relación de reducción, ya que como sabemos en el lado de la masa tendremos una velocidad reducida con una gran carga frente a la parte motora donde se trabajará a altas revoluciones por minuto con poco par a fin de que la potencia a un lado y a otro sea la misma, sin contar los rendimientos.

Como ya venimos enunciando, la energía que podemos obtener será función de la masa, el rendimiento y la profundidad del orificio en el que se va a desplazar , dando por supuesto que la gravedad es una constante.

$$E = f(m, g, h, \eta_{descarga})$$

En base a esta premisa y fijando la relación masa por altura como variable obtendríamos la siguiente ecuación:

$$m * h = \frac{E_{\text{útil}}}{g * \eta_{descarga}}$$

6.1 Prototipo de 5 kWh :

Para $E_{\text{útil}} = 5 \text{ kWh} = 18 * 10^3 \text{ kWs}$ con un rendimiento del 90% obtenemos una relación $m * h = 20408016$.

Si, por disminuir ciertos costes, lo ensayamos en el mismo pozo de $h = 1000 \text{ m}$ necesitaríamos 20409 kg de material. Llegados a este punto habría que escoger el material con el que queremos realizar el cilindro. Aunque en la propuesta de Gavitricity se emplea acero nosotros diseñaremos para una masa de acero y otra de hormigón. Utilizando acero para confeccionarlo, $\rho_{\text{acero}} = 7850 \text{ kg/m}^3$, nos resultaría un volumen

necesario de 2.6 m^3 . Dado que el volumen del cilindro sería $V=\pi*r^2*h$ tendríamos una relación entre la altura del pistón y su radio de aproximadamente $h_p * r^2 = 0.82$.

Utilizando hormigón, $\rho_{\text{horm}}=2400 \text{ kg/m}^3$, nos resultaría un volumen necesario de 8.5 m^3 . Dado que el volumen del cilindro sería $V=\pi*r^2*h$ tendríamos una relación entre la altura del pistón y su radio de aproximadamente $h_p * r^2 = 2.7$.

6.2 Prototipo de 500 kWh :

Suponiendo de nuevo $\eta_{\text{descarga}} = 90\%$ y para un $E_{\text{útil}}=500\text{kWh}=18*10^5 \text{ kWs}$ obtenemos una relación $m*h= 204081632$. En este caso y al tratarse del prototipo real lo que haremos será maximizar la profundidad del pozo hasta 1 km pues tal y como sabemos existen pozos en España de esas dimensiones que siempre podrían ser ampliables, con esto lo que conseguimos es minimizar el peso y por tanto la cantidad de material y el coste.

Para una $h=1000 \text{ m}$ obtenemos una masa de $204.62*10^3 \text{ kg}$. El volumen necesario usando acero, sería de 26.1 m^3 lo cual implicaría en este caso una relación $h_p*r^2 = 8.31$. Si por el contrario utilizamos hormigón necesitaríamos un volumen de 85 m^3 con una relación de aproximadamente $h_p * r^2 = 27$.

Sabiendo que h_p va a ser en cualquier caso despreciable frente a la profundidad del pozo, optamos por dimensionar conforme a un radio aceptable para un pozo minero abandonado, en vista a no tener que ampliarlo con maquinaria altamente costosa.

Si suponemos un radio razonable de $r=1\text{m}$ necesitaríamos una $h_p=8.31\text{m}$ en el caso del acero y $h_p= 27 \text{ m}$ en el caso del hormigón. Cualquiera de los dos es válido ya que ambos valores son mucho menores y por tanto despreciables frente a 1000.

6.3 Diseño para $P= 500 \text{ kW}$:

Una vez diseñado físicamente el cilindro y el pozo necesitamos saber tanto la potencia necesaria en los motores como la velocidad a la que operará el sistema.

Para determinar la velocidad de operación nos centraremos en que queremos conseguir 500 kW. Sabemos que $P = m*g*v*\eta_{\text{sistema}}$, con lo que despejando la velocidad:

$$v = \frac{P}{m * g * \eta_{sistema}}$$

En este caso , suponiendo un rendimiento del sistema completo del 85%, conocemos todos los parámetros gracias al objetivo fijado de 500 kW y al diseño de la masa con la energía que buscamos almacenar. Sustituyendo podemos saber que necesitamos una velocidad de aproximadamente 0.3 m/s en el régimen permanente.

6.4 Elección del motor :

Para ver que potencia nominal elegimos para el motor sabemos que $P_n = F * v = M * w$. Para sobredimensionar la potencia consideramos que en el sistema de reductora-motor perderemos un 15% de potencia es decir que a nuestro efectos:

$$P_n = \frac{F * v}{\eta}$$

La fuerza a la que debemos vencer la tomamos como puramente vertical y corresponde a la del peso que como sabemos será masa del cilindro por gravedad. La velocidad que cogeremos será la de régimen permanente que será presumiblemente la máxima en el proceso continuo de subida y bajada.

Con todos estos valores obtenemos una $P_n = 705.6$ kW, es decir, necesitaríamos un motor que fuera capaz de dar esa potencia. Por motivos de seguridad y con el fin de equilibrar de la mejor forma posible la gran masa se opta por utilizar dos motores uno a cada lado del pozo. En vista a eso necesitaríamos dos motores de al menos 352.8 kW cada uno.

A la hora de acudir al mercado a por un motor no tenemos a priori más limitaciones que como hemos dicho $P_n > 352.8$ kW. Presentamos el siguiente catálogo de mercado:

P ₀ - tencia kw	IE1 Eficiencia estándar			IE2 Alta eficiencia			IE3 Eficiencia premium		
	2 polos	4 polos	6 polos	2 polos	4 polos	6 polos	2 polos	4 polos	6 polos
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87,6	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94,0	93,7	94,7	95,0	94,6
90	93,0	93,0	92,9	94,1	94,2	94,0	95,0	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,7	93,8	93,8	94,8	94,9	94,8	95,6	95,8	95,6
200	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
250	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
315	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
355	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
375	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8

Ilustración 6.2 Catálogo de motores

Atendiendo a nuestro catálogo de mercado mostrado, solo podríamos utilizar los dos últimos motores, optaremos por sobredimensionar nuestros cálculos en este punto y utilizar dos motores de P_n=375 kW, para resultarnos el siguiente coeficientes de seguridad:

$$n = \frac{P_m}{P_{necesaria}} = \frac{750}{705.6} = 1.06$$

Los pares de polos nos fijarán la velocidad angular nominal de nuestro motor, aunque lo discutiremos posteriormente en el diseño de la reductora nos interesa tener la menor velocidad posible en el lado del motor para así conseguir la relación de la reductora lo mejor posible. En vista a estas premisas optamos por tanto por un motor con 3 pares de polos, que equivalen a 6 polos o en unidades de velocidad angular, 1000 rpm.

6.5 Cálculo de la reductora :

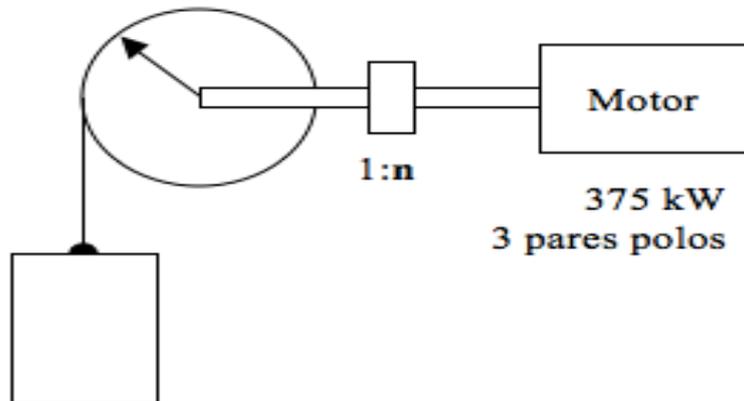


Ilustración 6.3- Esquema del accionamiento

Para diseñar la reductora simplificamos nuestro sistema a uno compuesto por masa, polea, reductora y motor.

Como ya sabemos tenemos 3 pares de polos, lo cual implica 1000 rpm equivalente a $w_m=104.72$ rad/s.

Por el otro lado de la reductora tenemos una velocidad de $v_c=0.3$ m/s .

La relación de la reductora, n , se define como el cociente entre las velocidades angulares a ambos lados. Sabemos que al lado derecho tenemos 104.72 rad/s, pero para determinar la velocidad del otro punto necesitamos dimensionar la polea ya que $w=v \cdot R$ de tal forma que:

$$n = \frac{w_m}{w_c} = \frac{104.72}{0.3 \cdot R}$$

En este punto el diseño reductora-polea dependerá de lo que queramos minimizar, si la polea o la reductora ya que son inversamente proporcionales. Si por ejemplo utilizamos un radio de polea de 1 m obtenemos un relación de $n=350$.

6.6 Característica par-velocidad angular del accionamiento :

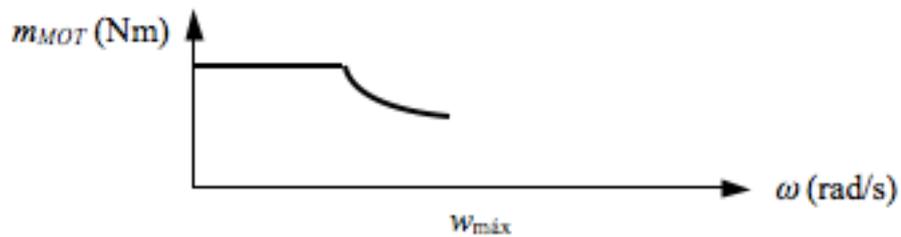


Ilustración 6.4 - Característica par-velocidad angular del accionamiento

Definimos el par nominal del motor como:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{375000}{104.72} = 3580.98 \text{ Nm}$$

El accionamiento trabajará a par nominal mientras se acelera hasta la velocidad angular nominal una vez llegados a este punto y si fuera necesario aumentar la velocidad entraríamos en la zona de par.

La zona en la que cae la curva la llamamos zona de debilitamiento del campo magnético. En ella el par nominal cae con una relación de:

$$M_{motor} = \frac{V_{lim} * M_n}{\omega_e}$$

Siendo V_{lim} el voltaje máximo que puede soportar nuestro motor y ω_e la velocidad que puede alcanzar el motor delimitada por su $\omega_{m\acute{a}x}$.

6.7 Tablas resumen del diseño del accionamiento:

6.7.1 Datos previos

	Prototipo de 5 kW	Prototipo de 500 kW
$E_{\text{útil}}$ (kWh)	5	500
η_{sist}	90	90
h_{pozo} (m)	1000	1000
ρ_{acero} (kg/m ³)	7850	7850
$\rho_{\text{hormigón}}$ (kg/m ³)	2400	2400

TABLA 6.1 DATOS PREVIOS

6.7.2. Cálculos de la masa a desplazar

	Prototipo de 5 kW	Prototipo de 500 kW
Masa (kg)	20409	$204.62 \cdot 10^3$
V_{acero} (m ³)	2.6	26.1
$V_{\text{hormigón}}$ (m ³)	8.5	85
$h_{\text{pozo}} \cdot r_{\text{pozo}}^2$ (acero)	0.82	8.31
$h_{\text{pozo}} \cdot r_{\text{pozo}}^2$ (hormigón)	2.7	27

TABLA 6.2 CARACTERÍSTICAS DEL CILINDRO

6.7.3. Diseño para una potencia de 500 kW

	Masa (kg)	η_{sistema}	Velocidad (m/s)
P= 500 (kW)	$204.62 \cdot 10^3$	85 %	0.3

TABLA 6.3 POTENCIA 500 kW

6.7.4. Elección del motor

	Fuerza a vencer (kN)	$\eta_{\text{acc-motor}}$
Requisitos	$205 \cdot 10^4$	85 %

TABLA 6.4 NECESIDADES DE ALMACENAMIENTO

6.7.5. Diseño del motor

	$P_{n\text{Min}}(\text{kW})$	N ^o motores	P_n por motor (kW)
Cálculos	>705.6	2	>352.8

TABLA 6.5 REQUISITOS MÍNIMOS DEL MOTOR

6.7.6 Características nominales del motor

	P_n (kW)	ω_n (rad/s)	Pares de polos	ω_n (rpm)	Rel. Reductora n:1	Radio Polea (m)	M_n (Nm)	Voltaje (V)
Motor	375	104.72	3	1000	350:1	1	3580.98	220

TABLA 6.6 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR

7. Presupuesto

Una vez elegido el tipo de prototipo, seleccionado la zona de implementación real y diseñados los parámetros eléctricos nos centraremos en la elaboración de un presupuesto para nuestro proyecto entendiendo por esto la descripción de los recursos que vamos a emplear (cantidades de los distintos componentes, servicios de terceros, recursos propios), sus precios unitarios, sus sumas parciales en las que recogeremos una tabla con tanto los recursos como los precios y el presupuesto general a gran escala.

7.1 Consideraciones previas

Todos estos datos serán analizados a gran escala atendiendo a los cálculos del diseño realizados anteriormente, sin entrar a evaluar el coste de la electrónica de potencia necesaria para que el sistema se desempeñe como deseamos, tampoco consideraremos los elementos de conexión eléctricos necesarios para una acoplamiento con la red eléctrica, véanse por ejemplo los transformadores de tensión o los cables de alta, media y baja tensión.

Dentro de este presupuesto y hablando desde la perspectiva más puramente económica vamos a considerar el supuesto ideal de que el pozo este totalmente acondicionado para la operación y no evaluaremos dentro de este proyecto sobrecostes derivados de la posible ampliación del pozo en términos de maniobrabilidad y otros elementos de seguridad.

Nos centraremos únicamente en el prototipo y su accionamiento, más concretamente en el coste de la masa a desplazar, el coste de los metros de cable que sostendrán el cilindro acumulador, el coste aproximado de las poleas , el coste de los motores a emplear y la mano de obra necesaria.

7.2 Recursos a emplear

En este apartado describiremos los principales materiales necesarios para la construcción y puesta en marcha de nuestro accionamiento.

Listado de materiales:

-En primer lugar tenemos que delimitar y caracterizar el cilindro. Atendiendo a los requisitos de almacenamiento de energía previos hemos podido conocer el volumen y la relación entre la altura y el diámetro que necesitamos. El criterio para elegir el material fue el de conseguir una densidad tal que nos permitiera obtener la mayor masa posible con el menor volumen ajustándose a un precio razonable. Atendiendo a estas premisas presentaremos dos materiales uno con mayor precio y mayor densidad y otro con menor densidad pero también mucho más barato. Utilizaremos acero con un $\rho_{\text{acero}}=7850 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{\text{hormigón}}=2400 \text{ kg/m}^3$. Dando por supuesto que compraríamos el material por toneladas necesitaríamos saber el precio de ambos materiales por tonelada para calcular el precio de la masa en movimiento.

Acero

Atendiendo a la siguiente gráfica:

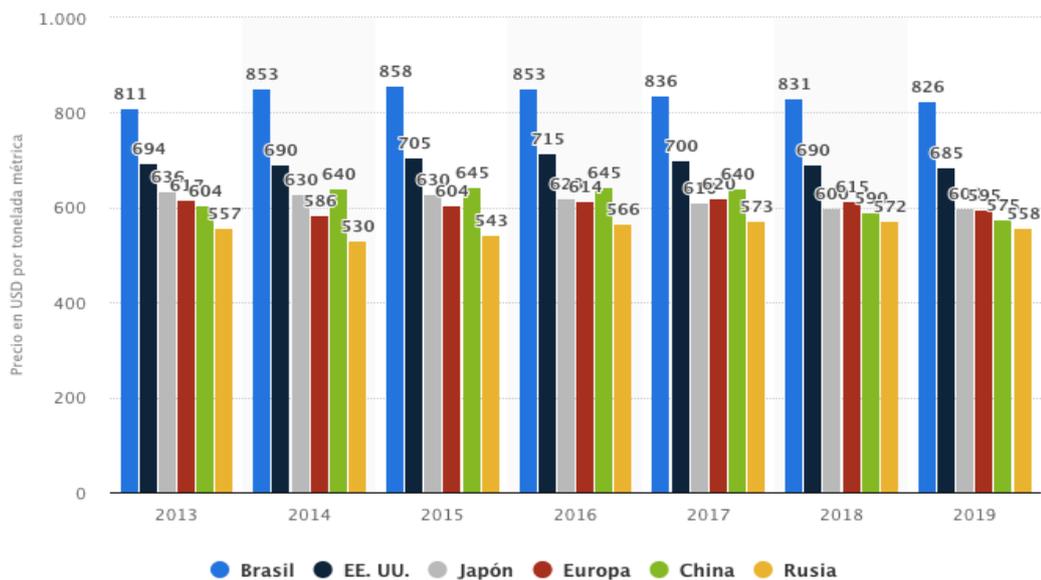


Ilustración 7.1 - Precio acero en USD/tonelada

Podemos ver que en España el precio del acero en 2018 ronda los 615 dólares, o lo que es lo mismo 552 € por tonelada.

Hormigón

En el caso del hormigón no hemos conseguido su precio unitario por tonelada ya que este se suele distribuir en metros cúbicos. Utilizando un hormigón de alta resistencia observamos que su coste asciende a 100 €/m³.

- Cables guía: Utilizaremos cables de acero galvanizado formados por un conjunto de alambres de acero enrollados con el objetivo de que trabajen como un cuerpo único. Además, cada alambre recibe un recubrimiento de zinc en caliente que al reaccionar químicamente con la base de acero, se obtiene una buena protección contra la oxidación. Son los más utilizados en instalaciones como ascensores o elevadores.

Este tipo de cables nos proporcionarán mayor resistencia a tracción que los convencionales. Necesitaremos aproximadamente 1000 m de este material y el número de cables que utilicemos así como su grosor vendrá determinada por la tensión admisible de los mismos a tracción y de el coeficiente de seguridad ante la rotura que usemos en nuestra instalación.

Si utilizamos un cable con las características del siguiente:



Cable de elevación

6x36+0 Galva	1770 N/mm ²	EN 12.385-4
Diametro Nominal (mm)	Peso Aprox. (kg)	Carga de rotura (Kg)
14	0,82	12 600
16	1,07	16 400
18	1,35	20 800
40	6,69	103 000
45	8,47	130 300
50	10,5	160 800
55	12,7	194 600
60	15,1	231 600

Ilustración 7.2 Cables de elevación de acero galvanizado

Dado que estimamos que el peso de nuestra masa cilíndrica serán unos 205000 kg y en vista a que buscamos utilizar dos cables, uno conectado a cada motor de los que moverán el accionamiento, podemos utilizar los cables de elevación con un diámetro nominal de 45 y carga de rotura de 13000 kg.

Al utilizar 2 tendríamos una carga de rotura admisible de 260000 kg, lo que nos dejaría con un coeficiente de seguridad de:

$$n = \frac{C_{adm}}{C} = 1.3$$

- Poleas: Este objeto será un elemento fundamental ya que servirá de guía para que los cables mantengan la estructura firme y sin balanceos, así como para transmitir la potencia y convertir la velocidad lineal de la bajada a velocidad angular. No podemos olvidar que dado que usaremos dos motores necesitaremos también dos poleas.

Se podría utilizar una polea simple del siguiente tipo:

PD ... XXH 300												
Código	Tipo	Nº dientes	R Ø (mm)	S Ø (mm)	U Ø (mm)	e Ø (mm)	W (mm)	H Ø (mm)	Y (mm)	Z (mm)	d Ø (mm)	
18 XXH 300F	1	18	181,91	178,86	-	186	94	150	110	16	-	
19 XXH 300F	1	19	192,02	188,97	-	200	94	150	110	16	-	
20 XXH 300F	1	20	202,13	199,08	-	209	94	150	110	16	-	
21 XXH 300F	1	21	212,23	209,18	-	216	94	150	110	16	-	
22 XXH 300F	1	22	222,34	219,29	-	232	94	150	110	16	-	
24 XXH 300F	1	24	242,55	239,50	-	261	94	150	110	16	-	
25 XXH 300	3	25	252,66	249,61	196	-	94	150	110	16	-	
26 XXH 300	3	26	262,76	259,71	207	-	94	150	110	16	-	
27 XXH 300	3	27	272,87	269,82	216	-	94	150	110	16	-	
30 XXH 300	3	30	303,19	300,14	247	-	94	170	110	16	-	
34 XXH 300	4	34	343,62	340,57	287	-	94	170	110	16	19	
40 XXH 300	4	40	404,25	401,20	348	-	94	170	110	16	19	
48 XXH 300	5	48	485,10	482,05	429	-	94	180	120	26	19	
60 XXH 300	5	60	606,38	603,33	547	-	94	180	120	26	19	
72 XXH 300	5	72	727,66	724,61	668	-	94	180	120	26	19	
90 XXH 300	5	90	909,57	906,52	850	-	94	180	120	26	19	

Ilustración 7.3 Catálogo de poleas

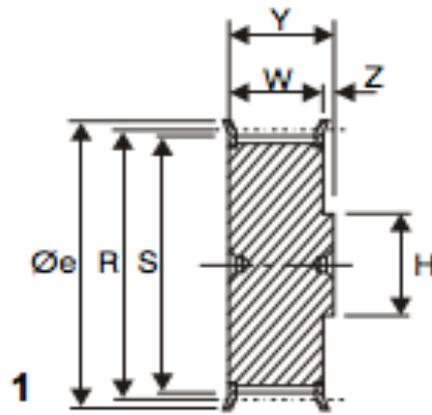


Ilustración 7.4 Esquema polea simple

Considerando que hemos tomado un radio de polea de $R=1$ m en el apartado de diseño de la reductora y que en este listado el diámetro máximo es 909.57 mm habría que sobredimensionar la relación de la reductora comentada anteriormente.

- Motores: Como ya se ha visto en el apartado de diseño del accionamiento necesitaremos dos motores de al menos 352.8 kW.

Atendiendo al siguiente catálogo:

P ₀ - tencia kw	IE1 Eficiencia estándar			IE2 Alta eficiencia			IE3 Eficiencia premium		
	2 polos	4 polos	6 polos	2 polos	4 polos	6 polos	2 polos	4 polos	6 polos
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87,6	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94,0	93,7	94,7	95,0	94,6
90	93,0	93,0	92,9	94,1	94,2	94,0	95,0	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,7	93,8	93,8	94,8	94,9	94,8	95,6	95,8	95,6
200	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
250	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
315	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
355	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8
375	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8

Ilustración 7.5- Catálogo de motores

Nos lleva a unos motores de $P_n=375$ kW a partir de los cuales tendremos que inferir el precio unitario, dado que al necesitar dos su precio se doblaría.

- Mano de obra. Consideraremos la mano de obra necesaria para la realización e implantación de este proyecto de tres tipos: Ingenieril, Supervisión y Técnica. Supondremos unos costes por hora de trabajo de cada uno de los especialistas grosso modo atendiendo a la naturaleza de las actividades desempeñadas por cada uno de ellos, tanto a nivel de desarrollo conceptual, como de diseño, como de montaje.

7.3 Costes directos

Los costes directos agruparán los gastos derivados de el material empleado en la construcción del cilindro (acero y hormigón), la aparatada de sujeción de la instalación y los recursos humanos tanto a nivel de diseño de ingeniería como realización e implantación técnica.

7.3.1 Precios Unitarios

En esta sección estimaremos los precios por unidad de cada uno de los objetos y materiales necesarios discutidos en el apartado anterior. Todos ellos son precios aproximados atendiendo a catálogos de los principales distribuidores, pudiendo estos variar a expensas de las necesidades y especificaciones del proyecto de implantación final, sobretodo en elementos tan necesitados de una precisa composición y resistencia como es el caso de las poleas.

	Coste
Acero	552 €/tonelada
Hormigón	100 €/m ³

Cable guía	50 € /metro
Polea	5000 € / unidad
Motor	20000€ / unidad
Mano Obra - Ingenieril	30 € /hora
Mano Obra – Supervisión	50 € /hora
Mano Obra - Técnica	15 € /hora

TABLA 7.1 PRECIOS UNITARIOS DE NUESTROS RECURSOS

7.3.2 Sumas parciales

Haremos tres grandes grupos a la hora de realizar las sumas parciales. El primero serán los materiales activos donde incluiremos el coste total del acero y el hormigón y los compararemos. El segundo englobará todo lo referente a la instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento del accionamiento. El tercero por último será la parte de coste aproximado que supondremos podría tener la mano de obra en conjunto.

Material activo

El principal material de coste no despreciable que tendremos en cuenta es el acero necesario para la construcción de nuestra gran masa sólida que estará en constante movimiento. El coste vendrá derivado de los kilogramos de material que utilicemos y del precio por tonelada o metro cúbico de estos.

	Cantidad	Coste unitario	Coste total (€)
Acero	204 toneladas	552 € /tonelada	106488
Hormigón	85 m ³	100 € /m ³	8500

TABLA 7.2 COSTE PARCIAL DEL ACERO

Como podemos observar el coste total del hormigón con respecto al acero es 10 veces menor. El único inconveniente del hormigón es que necesita más volumen y por tanto más altura del pistón. Como vimos en el apartado de diseño está altura es de 27 m que siguen siendo totalmente despreciables frente a los 1008 del pozo por lo cual decidiremos evaluar el coste total con la utilización de hormigón.

Aparamenta industrial

Al no tener datos concretos de los precios de los cables, las poleas o los motores supondremos los siguientes costes atendiendo a los principales distribuidores de estos elementos adaptando su precio al de componentes de similares dimensiones y características.

	Cantidad	Coste unitario	Coste total (€)
Cables guía	2x1000m	50 € /metro	100000
Poleas	2	5000 € / unidad	10000
Motor	2	20000€ / unidad	40000
			150000

TABLA 7.3 COSTE PARCIAL DE LA APARAMENTA

Mano de obra

El diseño del accionamiento contempla también el coste por la realización del mismo y el trabajo del ingeniero. Supondremos la cantidad de horas desempeñadas en la realización de la infraestructura teniendo como modelo otros ejemplos de proyectos de esta envergadura y poniendo un plazo máximo de un año. Propondremos una duración de 12 meses de proyecto diseño referido mano de obra ingenieril, 6 mes de supervisión que se comprenderán entre los de construcción y diseño y 6 meses de pura construcción e implantación. Consideraremos 3 operarios ingenieriles, 3 de supervisión y 20 de trabajo técnico con una jornada laboral de 8 h/día.

	Cantidad	Coste unitario	Coste total (€)
Ingenieril	1056 horas	30 € /hora	95040

Supervisión	1056 horas	50 € /hora	158400
Técnica	1056 horas	15 € /hora	316800
			570240

TABLA 7.4 COSTE PARCIAL DE LA MANO DE OBRA

Coste directo total

$$C_{directo} = C_m + C_A + C_O = 728740 \text{ €}$$

7.4 Costes indirectos

En este apartado consideramos los gastos que no se consideran parte física del accionamiento diseñado pero que igualmente están asociados al proyecto y son necesarios de evaluación. Estos gastos serán los servicios de comunes de luz, agua, electricidad y transporte. Tomamos como un valor razonable que estos costes pueden ser el 30% de los costes directos.

$$C_{indirectos} = C_{directo} * 0.3 = 728740 * 0.3 = 218622 \text{ €}$$

7.5 Gastos generales

Estos gastos son los considerados auxiliares para la realización del proyecto. Englobaremos en ellos todos los gastos de gestión de permisos con el ayuntamiento de la zona correspondiente a la implantación del sistema, compra y venta de equipos, administración y todos los servicios que no estén directamente relacionados con la construcción física del accionamiento. Consideraremos estos gastos relativos tanto a los

costes directos como los indirectos y supondremos que son aproximadamente un 15% de la suma de costes directos e indirectos.

$$C_{gastosGenerales} = 0.15 * (C_{directo} + C_{indirecto}) = 142104.3$$

7.6 Presupuesto

Por último y a modo de resumen calcularemos el coste total de nuestra instalación atendiendo al sumatorio de nuestros costes directos con los indirectos y los gastos generales. El presupuesto final que obtenemos resulta de despreciar precios de acople y montaje con la red así como posibles gastos derivados del sistema de prevención de riesgos y los sistemas de mantenimiento.

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 = 1.089.467 \text{ €}$$

Siendo

C_{total} = Coste final de nuestro accionamiento

C_1 = Costes directos (material activo - aparataje eléctrica – mano de obra)

C_2 = Costes indirectos

C_3 = Coste de los gastos generales

8. Conclusiones generales

Una vez discutida y razonada la elección de la tecnología de masas solidas suspendidas por cables por delante del resto de opciones de almacenamiento de energía nos hemos centrado en justificar el diseño, la zona de construcción y los costes de nuestra implantación.

Nuestro fin principal ha sido el de conseguir una energía almacenable que resulte apreciable de 500 kWh, teniendo en cuenta que para ello se requería como premisa unas profundidades lo más extensas posibles, por ello, la alternativa de estudio fue el uso de un pozo profundo del territorio español. La alternativa mostrada en el proyecto propone reconvertir un antiguo pozo minero en desuso en un sistema de almacenamiento de energía limpia.

En cuanto a los parámetros de diseño se ha llegado a la conclusión que se requería una profundidad de pozo de 1 km, razonable teniendo en cuenta el pozo seleccionado (Pozo de San Vicente, Linares), obtenemos una masa en movimiento de aproximadamente 204 toneladas. Este peso podría parecer suponer a priori un hándicap pero, como hemos visto en el desarrollo del proyecto, disponemos en el mercado de motores de gran potencia capaces de levantar dichas dimensiones, y en la comparativa con el estado del arte realizado, estaríamos muy por debajo incluso del prototipo actual de Gravitricity en el Reino Unido está pensado para mover una masa de 3000 toneladas.

En cuanto a su acople con la red, hemos supuesto un nivel de tensión en el motor coincidente con el de la misma, pero en cualquier caso si quisiéramos trabajar a menor tensión simplemente utilizaríamos un centro de transformación situado en las proximidades de nuestro accionamiento.

Quedaría fuera del objetivo de este proyecto el diseño de la electrónica de potencia del accionamiento y su velocidad de diseño con las correspondientes pendientes de aceleración y deceleración de la masa para conseguir la potencia objetivo, así como el diseño de los distintos sistema de seguridad y protección ante la rotura de los cables de sujeción o los sobre voltajes aunque como ya hemos razonado en el apartado de impacto medioambiental, la rotura de cables no produciría efectos negativos más allá de la caída

de la gran masa y pequeños seísmos locales.

En lo referente al coste total del proyecto situamos la inversión referente al material activo, a la principal aparatada eléctrica, a la mano de obra básica y a los costes indirectos y gastos generales en 1.089.467€. Parece un coste razonable si lo comparamos con el prototipo real de próxima implantación en Reino Unido. En ese caso la inversión asciende aproximadamente a 650.000 libras, o lo que es lo mismo unos 760.000 €. El coste en este caso es mayor probablemente debido a que en su caso la masa a desplazar son 3000 toneladas, con su consecuente aumento en el gasto en material activo. Si hablamos de la distinta aparatada eléctrica utilizada, los componentes más complicados de delimitar y calcular su coste han sido las poleas dado que habría que conseguir unas con unas características muy concretas para obtener la velocidad lineal necesaria con la velocidad angular nominal que nos aportaba el motor. De la misma forma tampoco se ha reflejado el coste de la reductora por no encontrar los datos suficientes para la delimitación de la misma. En cualquier caso y como ya discutimos en el diseño de reductora/polea, la relación de la reductora (n) y el radio de la polea (R) son parámetros que depende el uno del otro de forma inversamente proporcional, por lo que en cualquier caso podríamos tomar un valor lo más cómodo a las prestaciones que nos dé el mercado.

9. Recursos externos

Ilustración 1.1- Imagen propia

Ilustración 3.1- <https://www.gravitricity.com/#the-technology>

Ilustración 3.2- <https://www.aresnorthamerica.com/about-ares-north-america>

Ilustración 3.3- <http://sustainablemycology.blogspot.com/2016/09/sisyphus-railroad-renewable-energy.html>

Ilustración 3.4- https://en.wikipedia.org/wiki/Three-phase_AC_railway_electrification

Ilustración 3.5- <http://www.gravitypower.net/technology-gravity-power-energy-storage/>

Ilustración 3.6 - <http://www.gravitypower.net/technology-gravity-power-energy-storage/gpm-construction-plan/>

Ilustración 3.7 - <http://www.uco.es/termodinamica/ppt/pdf/fluidos%2013.pdf>

Ilustración 3.8- <http://www.buoyant-energy.com/>

Ilustración 3.9- Imagen Propia

Ilustración 3.10- Imagen propia

Ilustración 3.11- Imagen propia

Ilustración 5.1 - <https://lacontradejaen.com/ultimo-viaje-pozo-san-vicente/>

Ilustración 5.2 -

<https://www.google.com/maps/dir/Pozo+de+San+Vicente,+Linares/Ja%C3%A9n/@37.9546275,-3.8474738,11z/data=!3m1!4b1!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0xd6e9b01e2f8dcbd:0x486dab6a2c0bc4de!2m2!1d-3.6219149!2d38.1298638!1m5!1m1!1s0xd6dd713cb5302c7:0x9cfb2c858b405702!2m2!1d-3.7849057!2d37.7795941!3e0>

Ilustración 5.3 - <https://www.uja.es/departamentos/ingele/visita-al-parque-eolico-sierra-trigonoalejo-jaen>

Ilustración 5.4 -

<https://conociendojaen.wikispaces.com/Ja%C3%A9n+Capital?responseToken=03beda610909a48ad1448d3abfb1494c1>

Ilustración 5.5 - http://www.grupo-sanjose.com/p_PLANTA-FOTOVOLTAICA-DE-54-MW-EN-ALCAUDETE-JAEN_17

Ilustración 6.1- <https://www.gravitricity.com/#the-technology>

Ilustración 6.2- <http://motronic.es/upfiles//files/A3875.pdf>

Ilustración 6.3- Imagen propia

Ilustración 6.4 - Imagen propia

Ilustración 7.1 - <https://es.statista.com/estadisticas/634390/precios-de-materias-primas-en-el-mundo-acero/>

Ilustración 7.2 - <https://www.cablesestructurales.com/portfolio-item/6x360-galva/>

Ilustración 7.3 - <http://www.ducasse.cl/catalogos/correas-y-poleas.html>

Ilustración 7.4 -

<http://www.ducasse.cl/images/PDF%20CATALOGOS/CORREAS%20Y%20POLEAS/Poleas%20de%20Aluminio.pdf>

Ilustración 7.5- <http://motronic.es/upfiles//files/A3875.pdf>

10. Bibliografía

- [CAVA16] F. Cava, J. Kelly, W. Peitzke, M. Brown y S. Sullivan, «Advanced Rail Energy Storage: Green Energy Storage for Green Energy,» de *Storing Energy. With special reference to renewable energy sources*, Elsevier Science, 2016.
- [ESCO16] F. Escombe, «Novel Hydroelectric Storage Concepts,» de *Storing Energy. With special reference to renewable energy sources*, Elsevier Science, 2016
- [HAGH16] A. Vassel-Be-Hagh, R. Carriveau y D. S.-K. Ting, «Energy storage using weights hydraulically lifted above ground,» *International Journal of Environmental Studies*, vol. 70, no 5, 2013.
- [SANC16] A. Sánchez Muñoz, M. García y M. Gerlich, «Project SENSIBLE - Deliverable D2.1 - Overview of storage technologies,» 2016.
- [TER94] A. G. Ter-Gazarian, *Energy storage for power systems*, Londres: Peter Peregrinus Ltd., 1994.
- [TERC16] TERCESA S.L.- SERTEC Transmisiones, *Catálogo general de productos 2016*, Badalona (Barcelona), 2016.

- [GRAU16] A. Grauers, Synchronous generator and frequency converter in wind turbine applications: system design and efficiency, Göteborg: Chalmers University of Technology, 1994.
- [XING15] M. J. XingLuoJihongWang, «Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,» *ELSEVIER*, 2015.
- [CHEN08] T. N. C. W. Y. C. T. Y. L. Y. D. Haisheng Chen, «Progress in electrical energy storage system: A critical review,» *ELSEVIER*, 2008.
- [ITE17] Estudio de almacenamiento de energía gravitatoria con cuerpos sólidos. Instituto tecnológico de la energía. Junio 2017.
- [KYLE16] R. C. D. S.-K. T. Kyle Bassett, «Underwater energy storage through application of Archimedes principle,» *ELSEVIER*
- [ANEK16] M. Aneke, «Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review,» *Applied Energy*, no 179, pp. 350-377, 2016.

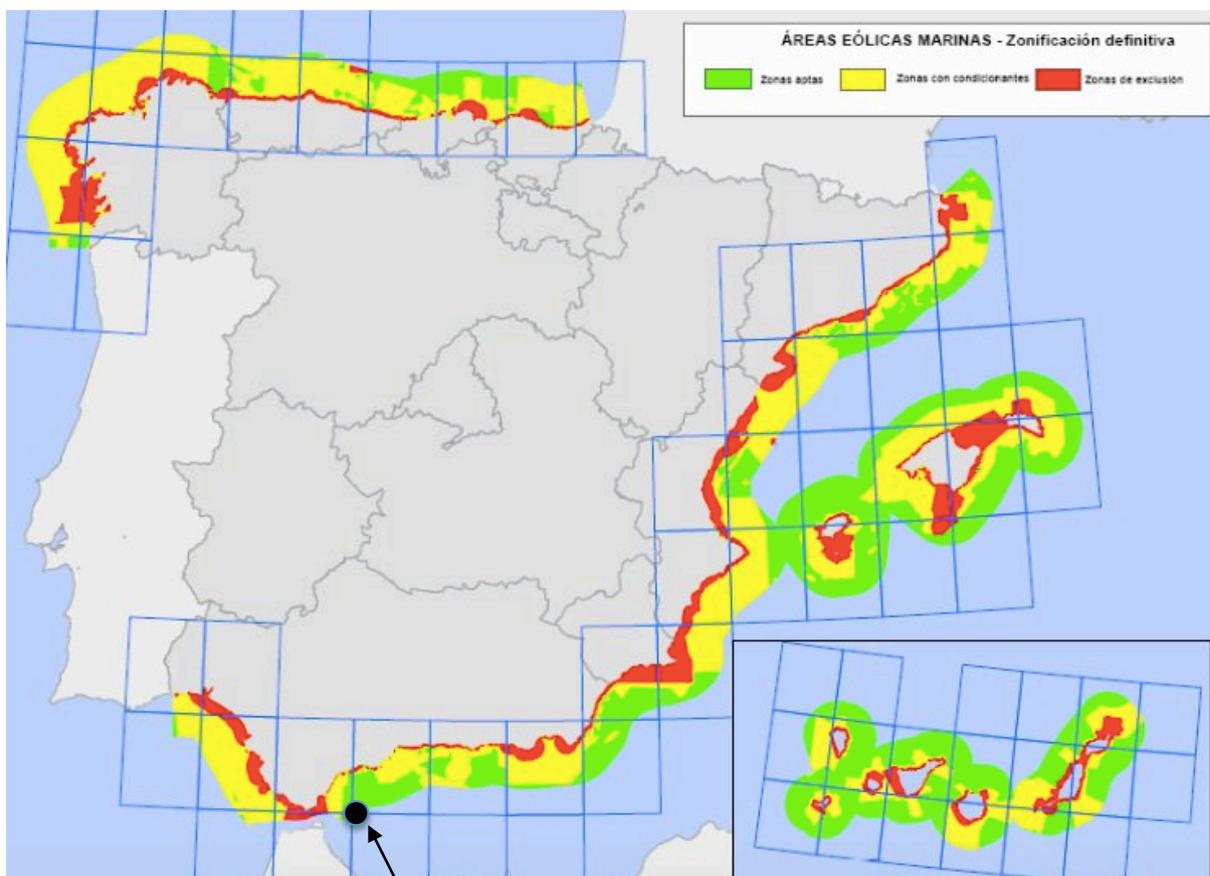
- [UNE17] UNE EN 58144-1 Aparatos de elevación de carga suspendida. Inspecciones Parte 1: Generalidades. 2017
- [NTP16] Normativa NTP 155: Cables de acero (Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo). 2016
- [LAZA16] *Lazard's levelizedcost of storage - Version 2.0*, Diciembre 2016.

11. ANEXO – Integración de un sistema de almacenamiento de energía gravitatoria con aplicación real. Prototipo MGH.

11.1. Caso de estudio

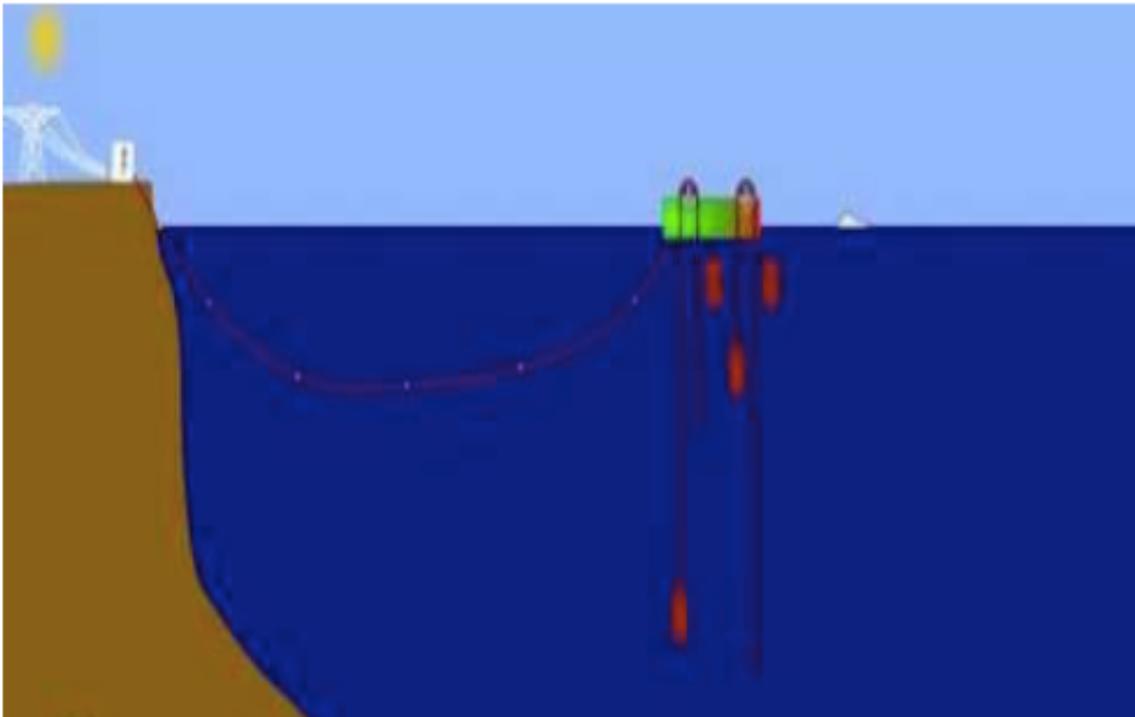
Se va a realizar un estudio conjunto de la viabilidad sostenible de una instalación de parque off-shore de aerogeneradores de producción de energía eléctrica, que no solo nos proporcione potencia mediante la energía eólica, sino que además sea capaz de almacenar los excedentes y suplir la intermitencia del viento mediante la innovadora técnica del almacenamiento con cuerpos sólidos.

En el presente informe se tiene como objetivo evaluar el desarrollo y justificación en términos de sostenibilidad de nuestro parque eólico situado entre las costas de Cádiz y Málaga, a unos 15 km de tierra, para reducir el impacto visual. La planta será un prototipo experimental a modo de estudio para analizar su viabilidad económica y medioambiental que utilizará 10 aerogeneradores para generar 50 MW de media.



Zona de implantación de la propuesta estudiada

En cuanto al método de almacenamiento se utilizará el prototipo MGH que almacena energía mediante la elevación de pesos desde el fondo marino hasta la superficie para su posterior recuperación de energía accionando el generador descendiendo los pesos al fondo marino de nuevo. El motor/generador se encuentra sobre una plataforma flotante, lo más cercana posible al aerogenerador, como se podría observar en la siguiente figura.



11.2. Valoración de la sostenibilidad

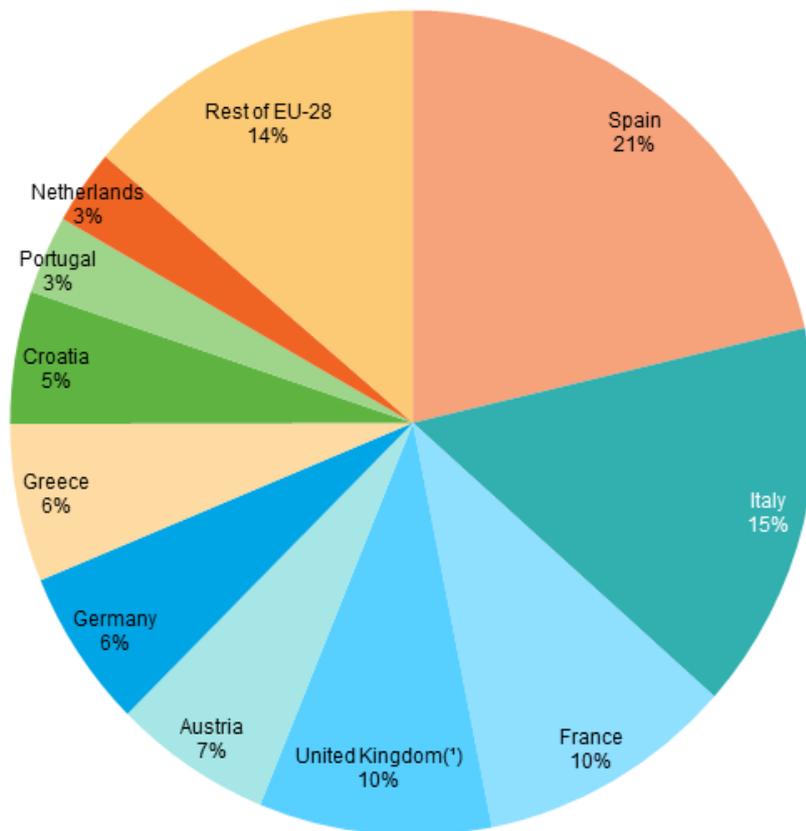
En esta sección se procederá a analizar el impacto del conjunto parque eólico-sistema de almacenamiento de energía del caso de estudio centrándonos fundamentalmente en tres capitales como son el económico, el natural y el social/humano para posteriormente tratar los posibles límites críticos a los que puede estar sometido. Concluiremos con un análisis de la distribución intrageneracional o sostenibilidad social de nuestra tecnología.

11.2.1 Variación de capitales

El sistema eléctrico español está fuertemente orientado a la utilización de combustibles fósiles (carbón, gas natural o petróleo) como medio de producción de energía eléctrica. Si bien es cierto que estos tienen una alta densidad energética, sus inconvenientes se ven día a día más claros con efectos como el calentamiento global o el cambio climático. A nivel de sostenibilidad no podemos ignorar estas consecuencias pues a largo plazo tienen grandes problemas intergeneracionales, que no solo afectan a las personas sino también al medio del que dependemos y nos rodea.

En este contexto surgen las energías renovables y las energías limpias. En nuestro estudio, haremos diferenciación de estas dos entendiéndose por renovable aquella tecnología que se apoyan en recursos inagotables (ya que el viento no tiene tasa de explotación ni de restablecimiento, no se puede tener menos viento, aunque en temas de calidad sí puede considerarse una tasa decreciente, pero esto no afecta a nuestro caso al estar en zonas de aire limpio como es el mar) y por limpia las que no tienen por qué ser fuentes inacabables, pero sí que poseen la característica de no emitir prácticamente contaminantes al ambiente, aumentando considerablemente la calidad del aire que respiramos.

De todas estas energías nos inclinamos por la energía eólica off-shore ya que en países con tanta costa como España tienen un enorme potencial debido a las excelentes condiciones de viento que se dan. Sin embargo, el proceso de mentalización de los gobiernos es un proceso lento al considerarse las costas un capital turístico muy relevante en España. El turismo supone un 21% de los ingresos anuales, convirtiéndolo en uno de los países de la Unión Europea con más recepción en este ámbito, como se puede observar en la siguiente figura.



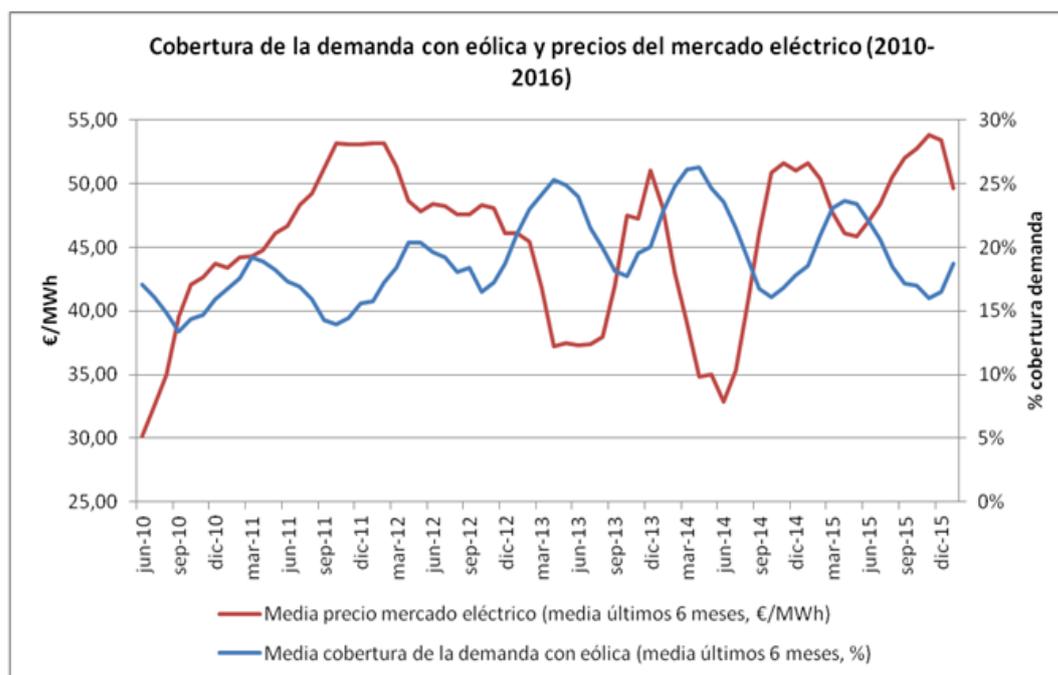
Al estar situado en la costa de Málaga las repercusiones sobre el turismo pueden llegar a ser notorias al ser una de las provincias con mayor flujo turístico del país. Para hacer una idea de ello: Málaga cerró el año 2017 con 1,3 millones de turistas, alcanzando el impacto económico de 1800 millones de euros en la ciudad. Por ello, y como se ha dicho anteriormente, optaremos por enfocar nuestro prototipo lo más alejado posible de las costas haciéndolos prácticamente invisibles al ojo humano.

A continuación, se hará un estudio individualizado de los tres capitales enunciados:

11.2.1.1 Capital económico

Desde el punto de vista económico, un parque de aerogeneradores de este tipo es una instalación muy rentable al tener únicamente costes fijos referentes al montaje y diseño, no teniendo costes variables asociados a combustible. Esto tiene la inmediata consecuencia de que a pesar de que produzcamos menos cantidad de energía, esta sea mucho más económica a nivel relativo si nos fijamos únicamente en los ingresos netos

que produce. Es más, gracias a este coste cero de producción de energía, los días de más viento se generará más energía eólica, lo cual es evidente, y esto se traduce en que pueden ofertar más energía a un precio más barato que otras como la nuclear o el carbón, reduciendo así los precios de la electricidad para la población. El siguiente gráfico nos muestra esta situación.



Como podemos comprobar, en los meses de más viento (invierno y principios de primavera), la producción eólica cubre más la demanda de electricidad, implicando a su vez una reducción de hasta al más del 35% en el precio de la electricidad.

Si combinamos estas ventajas con el almacenamiento del excedente de energía del viento producida en las primeras horas del día para venderla en los picos de demanda (entre cuatro y ocho de la tarde), garantizando así su reducción de precio.

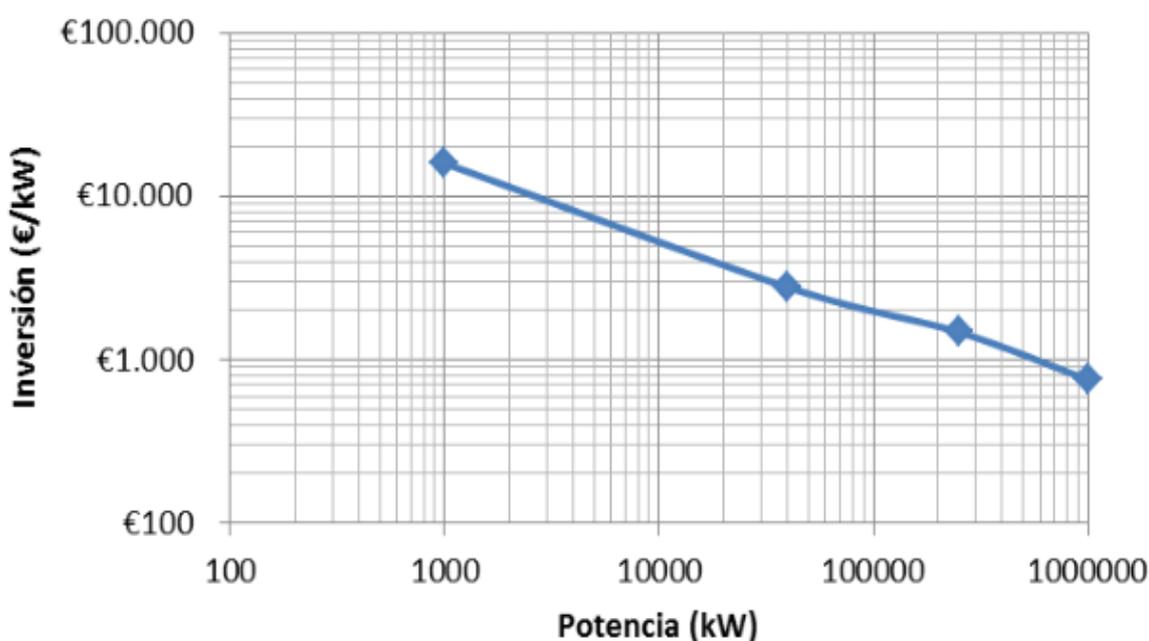
Centrándonos en aerogeneradores off-shore cabe destacar que desarrollar energía eólica marina es más costosa que desarrollarla en tierra pues necesita un anclaje de las torres al suelo marino el cual aumenta según la profundidad del agua. La infraestructura eléctrica de tendido debe implantarse debajo del agua para recoger la energía generada por estos aerogeneradores marinos. En cuanto al mantenimiento también es más costoso en el agua, así como la construcción de turbinas capaces de aguantar el severo entorno del mar y la fuerte corrosión salina. Aunque el incremento de esfuerzos mecánicos que ha de soportar la torre se reduce al emplazar el parque en Mediterráneo, ya que es un mar más tranquilo que el océano Atlántico.

Generación eléctrica:

En este apartado, vamos a hablar de indicadores propuestos como son el precio del mercado eléctrico, la capacidad de generación y la dependencia energética del país.

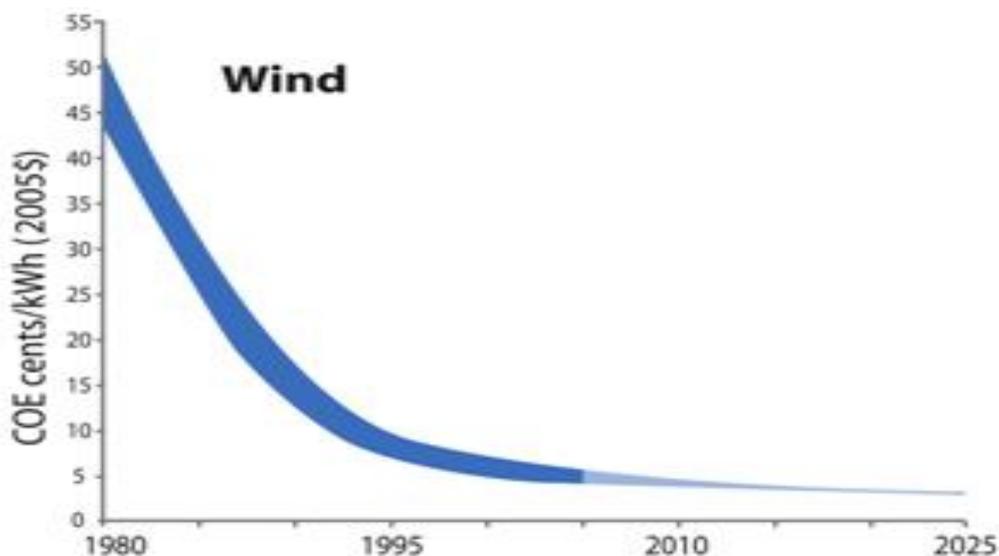
- **Precio del mercado eléctrico:** atendiendo a datos contrastados con la información aportada por red eléctrica española España tiene un precio medio de la electricidad de 0.11 €/kWh. Plasmando estos datos en nuestra instalación propuesta, vemos que podemos llegar a generar una potencia diaria equivalente a 5.500 €/h. Si consideremos un viento constante y suficiente durante 8 horas de funcionamiento, puede llegar a facturar 44.000 € diarios. Con todo ello, extrapolándolo anualmente se podrían conseguir unos 80 GWh, lo cual tiene un valor de mercado actual de unos 9 millones de euros. El principal inconveniente que puede alterar considerablemente este dato son las grandes alteraciones producidas por la gran intermitencia del viento.

Además si extrapolamos estos datos a nuestros acumuladores de energía se puede demostrar que cuanto mayor sea la capacidad que tengas menos costará nuestra instalación, como se puede ver en la siguiente gráfica.



- **Capacidad de generación:** Como se argumentó en el apartado de caso de estudio consideramos una instalación con capacidad para generar 50 MW de media, sin entrar demasiado en las intermitencias del viento. Esto equivale a unas 270.000 placas solares convencionales, a una pequeña central hidráulica o a una pequeña central térmica clásica. Si nos centramos en medidas como cuantas casas medias podría alimentar nos fijamos en que los 10 aerogeneradores de los que constaría la instalación serían capaces de alimentar unos 32.000 hogares.

- **Dependencia energética del país:** Definimos la dependencia energética como la cantidad de energía primaria que se debe de importar en un país para su abastecimiento en forma de calor, electricidad o transporte. A nivel de generación, España cuenta con una potencia instalada de 105.279 MW. A pesar de estos datos, España tiene una dependencia exterior de fuentes de energía del 73% centrándose estos datos en la importación de combustibles fósiles como el petróleo de otros países. Aunque nuestra instalación solo supondría el 0.05% de la potencia total instalada, es un primer paso para tratar de reducir esa fuerte dependencia de recursos, ya que cómo se puede ver en la siguiente gráfica, el coste por kWh de las tecnologías que llevan asociado el viento como motor de su producción de energía eléctrica está disminuyendo considerablemente con el paso del tiempo y las mejoras de la maquinaria.



Por último y para concluir nuestro apartado económico, no podemos olvidar las grandes subvenciones que tiene este tipo de energía, en mayor medida aun si dispone del almacenamiento anteriormente comentado, pues con ello lograríamos tener mayor eficiencia en el ciclo. En este sentido se encuentran ayudas como el Plan Nacional de Energías Renovables, [PER 2011-2020](#), elaborado con el propósito de garantizar la calidad del suministro eléctrico y el respeto al medio ambiente, cumpliendo con los compromisos adquiridos por España en el ámbito internacional en tratados como el Protocolo de Kioto, el Plan Nacional de Asignación o los que se derivan de la pertenencia a la Unión Europea.

11.2.1.2 Capital natural

Este capital cubre los impactos en la geología, suelo, fauna, flora y atmósfera del emplazamiento de la planta.

- **Terreno:** Al tener una instalación puramente implementada en el mar se considera que en todo momento el terreno que se ve afectado corresponde a lecho marino. Focalizándonos en el impacto natural no podemos dejar de lado la realización de un estudio previo para analizar las nuevas rutas de barcos alterados directamente por nuestra tecnología a fin de ver el terreno afectado. Cabe destacar también que dichas conexiones tendrían necesariamente que ser submarinas pudiendo llegar, en algunas zonas, a ir en contacto con el suelo implicando grandes levantamientos del terreno y movimiento de tierras.

- **Impacto en flora y fauna:** La afectación a la flora y fauna no viene únicamente reflejada en la instalación final. No podemos dejar de lado la fase de construcción ya que como dijimos nuestro parque está situado a 15 km de la costa y tendremos irremediablemente que llevar todos los materiales a la zona de obra. Durante este recorrido tendremos que evaluar los posibles entornos marinos, peces, algas y aves migratorias. Con estas últimas el riesgo es máximo pues estos animales no consideran el movimiento de las palas y la elevada velocidad de la punta de pala. Su cerebro simplemente evalúa el espacio que tiene entre pala y pala para pasar sin considerar el movimiento. En cuanto a los

peces, los dispositivos de almacenamiento suponen un mayor riesgo que los propios aerogeneradores en sí, pues la masa que se desplaza en un eje vertical hacia la profundidad marina supone un obstáculo directo en su recorrido. Sobre la flora no existe un impacto notorio ya que a esas distancias y en esta zona no contamos con arrecifes de coral, apareciendo únicamente arena en el fondo marino. Además, la necesaria conexión de nuestros dispositivos entre si y a la red puede traer derivaciones eléctricas al mar que en contacto con los peces migratorios pongan su vida gravemente en peligro.

- **Paisaje:** A diferencia de sus congéneres on-shore, los parques eólicos en el mar no afectan tanto desde el punto de vista de impacto paisajístico pues alejándolos a varios kilómetros de la costa ya conseguimos disminuir o incluso eliminar este efecto.

- **Atmósfera:** Como ya sabemos el comportamiento de nuestra atmósfera se ve directamente influenciado por emisiones de contaminantes como pueden ser el CO₂, el SO o el NO_x. Nuestra tecnología se considera limpia porque tiene emisión cero, más allá de la asociada al propio transporte y construcción. En concreto, la generación de energía del parque eólico propuesto será de unos 164.250.000 kWh/año. Esto evitará la emisión a la atmósfera al año de 132.200 toneladas de CO₂ considerando que la generación fuera a partir de gasoil.

11.2.1.3 Capital humano y social

En este apartado nos centraremos en el impacto de nuestra tecnología en dos aspectos humanistas. Por un lado, el capital humano hará referencia a los factores culturales como son la pérdida de conocimiento o en su parte positiva, el aumento del know-how de las ingenieras. Por otra parte, el capital social ira directamente ligado a la persona, su empeño laboral y su posible actuación tanto en contra como a favor en las instituciones políticas.

Es de sobra conocida la gran oposición social a cualquier tipo de nueva instalación eléctrica. Desde su comúnmente extendida visión egoísta e intrageneracional no pueden ver las enormes consecuencias positivas que va a tener el ahorro de las anteriormente

citadas toneladas de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Además, en nuestro caso concreto al ser en altamar, no requerirá de ningún tipo de desplazamiento de poblaciones ni siquiera existirá un contacto semi-directo con estos prototipos, no como ocurre con otro tipo de instalaciones eléctricas como pueden ser las subestaciones o las líneas eléctricas de alta tensión.

De cara a las instituciones, el papel del almacenamiento jugaría una baza bastante importante puesto que como hemos destacado en la parte económica, podemos sacar partido de ellos para amortizar parte del dinero invertido en la construcción de nuestro parque. Además del impulso requerido por parte del gobierno español, se requeriría el apoyo económico de grandes empresas del sector como pueden ser Red Eléctrica de España o Iberdrola que actuarían como stakeholders en el proyecto.

En cuanto al impacto directo para la población de las zonas adyacentes, podemos decir que la mayor consecuencia que tendrían sería la generación en primera instancia de numerosos puestos de trabajo tanto cualificados como no cualificados. Este es un arma de doble filo pues una vez hecha la construcción, instalación y transporte del parque eólico más el acumulador de energía, simplemente requerirían un par de ingenieros para controlar su correcto funcionamiento y mantenimiento en alta mar.

11.2.2 Cercanía a niveles críticos

Si consideramos la definición de cercanía a los límites críticos de nuestra instalación desde el enfoque de la sostenibilidad fuerte, es decir atendiendo a la no sustitución de los capitales, sino a su complementariedad, y a la existencia de unos límites físicos y críticos debemos de tener en cuenta el entorno que rodea a nuestra instalación y los recursos extraídos para su implantación. Generalmente se aplica al capital natural, pero se puede trasladar a otros capitales como son el social y económico. Con todo lo expuesto anteriormente, llegamos a la conclusión de que se respetan los límites mínimos que busca este paradigma de la sostenibilidad. En la zona de la instalación no hay constancia de especies de flora o fauna en peligro de extinción, tampoco es una zona con el terreno muy trabajado ni hay poblaciones en riesgo de movilización.

Al tratarse de una instalación energía renovable, no podemos dejar de lado los principios enunciados por Daly que nos servirán a modo de limitación crítica, estos son:

1. Las tasas de uso de recursos renovables no pueden exceder a sus tasas de regeneración
2. Las tasas de uso de los recursos no renovables no pueden exceder al desarrollo de sustitutos renovables
3. Las tasas de emisión de contaminantes no pueden exceder la capacidad de absorción del medio

En base a estos requisitos deberemos dimensionar nuestra instalación para que sean rentables tanto a nivel económico como medioambiental. Nuestro principal recurso para generar este tipo de energía es el viento. Optamos por pensar que no ejerce ningún límite crítico pues no se considera que el viento vaya a acabarse en las próximas generaciones.

A nivel de límite en términos de fauna, se conoce la costa de Cádiz por especies de alto valor económico y culinario como puede ser el atún rojo de almadraba que realiza un continuo viaje migratorio alrededor del estrecho de Gibraltar. Suele realizar dos viajes, uno de ida es el viaje que hacen en el mes de mayo o junio desde el Atlántico al Mediterráneo y de vuelta, al regreso en sentido inverso en los meses de septiembre u octubre. Nuestro prototipo quedaría altamente limitado si no pudiéramos evitar el paso de estas especies por nuestra zona de implantación.

Por último, se comentarán las repercusiones de nuestro parque eólico con algunos de los principales indicadores de impacto ambiental. En primer lugar, y el más representativo, está la Huella de Carbono. Este índice mide las emisiones de CO₂ totales debidas a la actividad individual o colectiva. Al no depender de fuentes contaminantes, la instalación supone un refuerzo muy positivo para este indicador al reducir las emisiones, destacando la enorme proyección que pueda tener de cara al futuro y aprovechar más esta fuente de energía. Nuestro parque no tendrá repercusiones sobre la Huella del Agua o la Huella Ecológica ya que no se abusa del empleo del agua ni genera residuos que el entorno sea incapaz de asimilar.

11.3. Propuestas para mejorar la sostenibilidad

Como hemos indicado durante todo el documento, los principales afectados por nuestra instalación serían las especies animales. Para ello traemos una serie de posibles soluciones que faciliten la integración de estas con el parque.

El ruido y la mortalidad de las aves pueden ser mitigados con una ubicación adecuada de las instalaciones eólicas; si bien la energía eólica no es del todo flexible en cuanto a su ubicación, dado que necesita las localizaciones y orientaciones más ventosas. El impacto estético no es sencillo de disminuir, ya que la energía eólica requiere de grandes estructuras que no son fáciles de esconder. Este impacto se ve considerablemente reducido cuanto mayor sea la distancia a la costa. La energía eólica marina es un recurso de energía renovable que, potencialmente, tiene menos externalidades negativas que los desarrollos en tierra.

Como fuente secundaria de energía para aprovechar en mayor medida el impacto de nuestra instalación podríamos utilizar dos tipos de energía: mareomotriz o solar.

En cuanto a la energía mareomotriz, haciendo un estudio detallado de las corrientes marítimas, podríamos diseñar nuestra plataforma de almacenamiento de tal forma que a la vez que guarda la energía del viento, aprovechase el movimiento de las olas para tener un sistema de apoyo de cogeneración. Las estrategias para aprovechar la energía mareomotriz incluyen dispositivos flotantes que suben y bajan con las olas y que, a su vez, generan energía mecánica que finalmente es convertida en electricidad.

En cuanto a la energía se podría evaluar la instalación de paneles fotovoltaicos en la superficie de la góndola del aerogenerador y en la carcasa de los sistemas de almacenamiento. En zonas como estas donde la irradiación del sol es tan constante durante todos los meses del año, podría suponer una gran iniciativa de cara a aumentar la capacidad de todo el parque haciéndolo más atractivo de cara a la sociedad.