

# DISPOSITIVO PARA APROVECHAR LA ENERGÍA DE CORRIENTES MARINAS EL PROYECTO GESMEY, UN CASO DE ÉXITO

**AMABLE LÓPEZ PIÑEIRO**

**JOSÉ ANDRÉS SOMOLINOS SÁNCHEZ**

**LUIS RAMÓN NUÑEZ RIVAS**

Grupo GITERM (ETSIN)  
Universidad Politécnica de Madrid

**EVA NOVOA ROJAS**

**ALFONSO CARNEROS LOZANO**

Fundación Centro Tecnológico SOERMAR

En este artículo se expone el proceso seguido en la definición y desarrollo de un generador, denominado GESMEY, para el aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas situadas a más de 40 metros de profundidad, lo que junto a sus características definitorias que le permiten evolucionar en el seno marino sólo utilizando fuerzas hidrodinámicas, le definen como un

dispositivo con mejores prestaciones que los existentes a la fecha. Por ello puede afirmarse que GESMEY es ya un dispositivo perteneciente a una segunda generación de convertidores.

Este proyecto, se ha llevado a cabo en dos amplias fases: la primera, por medio de un proyecto de investigación con financiación del entonces Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) dentro de la Convocatoria del año 2008 para proyectos de investigación aplicada del Plan Nacional de I+D+i 2007/2011, que ha sido desarrollado en colaboración por la E.T.S. de Ingenieros Navales (UPM) y la Fundación Centro Tecnológico SOERMAR. Y la segunda consistente en la construcción y ensayo de un prototipo de 10 Kw de potencia, en la forma de un segundo proyecto de I+D con financiación del Programa Actuaciones de I+D. Sector Naval, del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (MITyC) y desarrollado por la Fundación SOERMAR, el Grupo de Investigación GITERM de la E.T.S. de Ingenieros Navales (UPM) y Astilleros Balenciaga S.A.

La idea de partida se debe al catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid Amable López Piñeiro,

la cual fue patentada por dicha Universidad junto con la Fundación SOERMAR, que es la que posee los derechos de explotación industrial de la misma, y con el apoyo inicial de la Fundación INNOVAMAR, que mostró su apoyo sin reservas a este desarrollo y financió en parte esa primera patente a título gratuito.

Téngase en cuenta que las corrientes marinas, tanto inerciales como mareales, representan una fuente energética renovable de muy alto potencial que, al día de hoy, no ha sido cuantificado con exactitud pero hay estimaciones que afirman que pueden generar alrededor de los 800 TWh por año, lo que representa un 4% del consumo eléctrico mundial.

En aguas europeas de aprovechamiento económico exclusivo existen muchas localizaciones donde la velocidad de la corriente es suficientemente alta para considerar un potencial energético muy importante. Así sucede en la Costa Escocesa, la Costa Galesa y en otras zonas costeras del Reino Unido, en la Bretaña Francesa, en el Estrecho de Gibraltar en la Costa Española, en el Estrecho de Messina en Italia y en otras zonas de la costa atlántica europea. Pero una sustancial

parte de este ingente potencial energético está constituido por corrientes situadas a más de 40 metros de profundidad, por lo que no es posible su explotación con la tecnología existente hoy en día y solo podrá llevarse a cabo su aprovechamiento disponiendo de nuevos generadores, capaces de operar a esas y otras más altas profundidades.

Siendo el objetivo principal de este artículo el presentar el diseño conceptual y su validación de un nuevo y avanzado generador submarino de energía eléctrica, capaz de aprovechar el potencial energético de esas corrientes marinas situadas en aguas a esas profundidades, denominado GESMEY. Tiene, frente a los dispositivos de generación hoy en día existente, las siguientes ventajas: capacidad de maniobrar para la inmersión y la emersión solo mediante fuerzas hidrostáticas, poder ser remolcado a flote hasta la vertical de su emplazamiento y además puede aprovechar corrientes submarinas en lugares con más de 40 metros de profundidad. Todas estas características, junto con la sencillez, funcionalidad y robustez de su diseño así como la simplicidad de su fondeo, permiten considerar a GESMEY como un generador perteneciente a la segunda generación de dispositivos para el aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas.

Debe ponerse de manifiesto que, a día de hoy, la tecnología para aprovechamiento energético de las corrientes marinas se encuentra en los inicios de su vida, lo que se traduce en que los diseños y desarrollos de generadores que existen son usados más como elementos de ensayo y experimentación para avanzar en el conocimiento y logro de una mejora tecnológica, que para la generación y venta de electricidad. De los cerca de 70 diseños existentes, solo uno, el Sea Gen (de 1,2 MW de potencia, desarrollado por Marine Current Turbines Ltd.), está instalado en operación en el mar, en Strangford Narrows (Reino Unido) y conectado al Sistema Eléctrico de Potencia británico.

Hay otros dos. Uno el Hammerfest Strom, que es un generador de 1000 kW, fondeado mediante un trípode que apoya en el fondo y sostiene un pilar que es donde descansa el generador. La turbina dispone de tres palas y puede rotar 180° para aprovechar el flujo y refluo de la misma. Y será la base del parque de generación que se instalará en Sound of Island bajo el nombre de Proyecto Isla, en aguas escocesas, con 10 MW de potencia instalada. Y el otro generador es de Open Hydro, que dispone de una turbina montada sobre un conducto anular y que tiene un generador eléctrico sumergible de imanes permanentes. Se ha construido un prototipo de 2 MW que se ha probado en el European Marine Energy Centre (EMEC) y es la base del Proyecto Paimpol-Brehat, en Bretaña, donde se instalarán 4 de estas turbinas, cada una con un peso de 850 toneladas y 16 metros de diámetro.

Todos los demás conceptos tecnológicos se encuentran en diferentes niveles de desarrollo pero no en explotación industrial. Y todos ellos, salvo GESMEY, carecen de capacidad para explotar corrientes en lugares con más de 40 metros de profundidad.

## OBJETIVOS, ORGANIZACIÓN Y METODOLOGIA DEL PROYECTO †

En su origen, el generador GESMEY ha tenido como objetivo poder aprovechar la energía de las corrientes marinas existentes en el estrecho de Gibraltar. Como es sabido, este estrecho conforma el canal natural de unión entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo, siendo sus límites, la sección entre el Cabo Esparter, en África, y el Cabo Trafalgar, al Oeste en la costa española, y la sección entre Punta Europa y Punta Cires (África), al Este. La sección máxima tiene una anchura de 44 km y la mínima, situada en el lugar denominado Strait Narrows, entre Tarifa y Punta Cires, de sólo 14 km. Tiene una longitud de 60 km, discurrendo su eje sobre el paralelo 36° N y con un perfil batimétrico muy singular, con zonas donde la profundidad es de 960 m y otras donde solo de alcanzan los 90 m, siendo la profundidad media de 550 m.

El estrecho, además de poseer un altísimo valor tanto oceanográfico como ambiental, constituye una fuente energética renovable de sustancial interés, conformada por las dos grandes corrientes de agua que discurren a través del mismo. Una superficial, que desplaza agua atlántica hacia el Mediterráneo y otra que discurre por el fondo y que transporta agua mediterránea hasta el Atlántico.

Estas corrientes tienen su origen en la superposición de los siguientes efectos: diferente densidad entre el agua atlántica y la mediterránea y diferente nivel superficial entre el Atlántico y el Mediterráneo. Las mareas generadas en el atlántico y que penetran en el Mediterráneo y los vientos locales constituyen, en sus distintas ramificaciones, excelentes fuentes energéticas y determinan la existencia a lo largo del estrecho de excelentes localizaciones donde la velocidad máxima de corriente es igual o superior a 2 m/s, pero en un muchos casos estas corrientes discurren en zonas de más de 40 metros de profundidad, normalmente entre 80 y 100 metros.

Puede afirmarse, por tanto, que el principal objetivo de este proyecto es desarrollar un nuevo concepto de generador submarino, capaz de aprovechar energéticamente esas corrientes en lugares con más de 40 metros de profundidad, existentes en el estrecho y en otros lugares del mundo y que además posea un ciclo de vida de bajo coste.

A este nuevo generador se le ha denominado GESMEY y los parámetros básicos que han enmarcado su diseño son los siguientes:

- ✓ Una disposición estructural simple
- ✓ No tener ningún elemento estructural en la superficie durante la operación, minimizándose así el impacto de las olas
- ✓ Una estructura robusta y de fácil construcción
- ✓ Formas y palas de alta eficiencia hidrodinámica
- ✓ Integración de tecnologías COTS, ya maduras

- ✓ Mínimo impacto ambiental
- ✓ Fácil de transportar, instalar y remover al final de su vida útil
- ✓ Escalable en cuanto a potencia nominal
- ✓ Adaptable al perfil de la corriente tanto en velocidad como en dirección
- ✓ Utilizable en zonas con profundidad media o alta y fondo complejo

El punto de partida fue la idea del profesor López Piñeiro y, dentro de los objetivos anteriores, se diseñó el «Generador Eléctrico Submarino con Estructura en Y (GESMEY)» que, en síntesis, comprende un rotor o hélice con tres palas, que acciona un generador eléctrico situado en un domo central (POD), del que salen, en forma de estrella (radial), tres brazos o columnas, situadas en un plano perpendicular al eje del rotor, existiendo al final de cada brazo un flotador (torpedo) con un eje paralelo al del domo.

Todos estos elementos estructurales disponen de formas hidrodinámicamente adecuadas que reducen su resistencia, tanto viscosa como de presión. El conjunto está dotado de un sistema de fondeo sencillo que es capaz de soportar la fuerza de arrastre que provoca la corriente. El conjunto tiene equilibrio hidrostático con el centro de gravedad del peso por debajo del centro de empuje, siendo esta distribución de pesos y empujes modificable mediante un sistema de lastrado, para permitir el posicionamiento correcto de GESMEY, tanto en operación como en transporte y mantenimiento.

Para llevar a cabo el proyecto se estructuraron dos equipos de investigación. Uno, formado por miembros de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (UPM) y el otro, de la Fundación Centro Tecnológico SOERMAR. El primero, dedicado a desarrollos técnico-científicos y el segundo, a las componentes administrativo-organizativas y a la validación constructiva de los sistemas y componentes diseñados.

Sobre este concepto básico de GESMEY se elaboraron diversas alternativas de diseño conceptual y fue necesario establecer un proceso selectivo, tomando como parámetros de partida del diseño conceptual a los siguientes:

- ✓ Un solo rotor con tres palas y tres ramas o columnas en la estructura (mismo número de brazos que de palas)
- ✓ Disposición estructural en forma de Y
- ✓ Estructura con todos los conjuntos, brazos, torpedos y puntales, formados por elementos iguales en forma, tamaño y posición en cada rama
- ✓ Formas iniciales en los elementos estructurales cilíndrico-elipsoidal
- ✓ No disposición de tobera para acelerar el flujo
- ✓ Material para la construcción acero, sin descartar materiales compuestos o híbridos

- ✓ Hélice o rotor de paso fijo

- ✓ Tamaño del domo capaz de contener un tren convertidor, dotado de chumacera, multiplicador y generador síncrono

Para poder realizar el análisis crítico de las diferentes alternativas y conducente a la elección de la óptima, se estableció una metodología fundamentada en la ejecución de los cinco pasos siguientes:

**Paso 1.** Diseño conceptual, dimensionamiento previo y dibujo CAD de cada una de las alternativas

**Paso 2.** Cálculos básicos que modelizan el comportamiento global de cada alternativa

**Paso 3.** Análisis determinativo de las fortalezas y las debilidades de cada alternativa

**Paso 4.** Proceso selectivo de elección óptima de alternativa

**Paso 5.** Comprobación numérica del comportamiento en diversas situaciones de la alternativa seleccionada

Debe indicarse que, para poder realizar el proceso analítico de selección y así comparar las distintas alternativas que se propusieron entre sí, fue necesario adoptar los siguientes datos de partida para el análisis comparativo, que posteriormente se adaptaron para el desarrollo de cada modelo: potencia de salida del generador, 1 MW; velocidad máxima de corriente, 3 m/s; velocidad tangencial en la punta de pala, 15 m/s; profundidad del fondo marino, 60 m; profundidad de la localización del domo en operación, 30 m.

Para completar la descripción de todo el procedimiento metodológico seguido en el análisis crítico de todas las alternativas de diseño conceptual propuestas, se estableció una sistemática que lo conformó mediante la estructuración del análisis DAFO de cada alternativa y su viabilidad, así como el análisis cualitativo de riesgos, en el que se estudió en cada caso las soluciones posibles ante hipotéticos fallos que podrían llevar al deterioro o pérdida del generador.

## ALTERNATIVAS DE DISEÑO ¶

Se debe comenzar por poner de manifiesto que en todo el proceso de preselección de alternativas se ha tenido en cuenta el condicionante que representa la ecuación que relaciona la potencia a obtener con la velocidad del flujo, el área barrida por el rotor y los rendimientos de los distintos componentes, en particular el coeficiente de rendimiento hidrodinámico  $C_p$ .

Y la evolución de la potencia, según las pérdidas producidas, se representa mediante las expresiones analíticas de la potencia en cada caso, en función de la velocidad de corriente ( $V$ ), el área barrida por el

rotor (A), la densidad del agua ( $\rho$ ), y los distintos rendimientos del tren electromecánico de potencia ( $\mu_{PTO}$ ) del modo siguiente:

$$P_w = \text{Potencia hidrodinámica:} \\ P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad [1]$$

$$P_s = \text{Potencia al eje:} \\ P_s = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad [2]$$

$$P_e = \text{Potencia entregada a la red} \\ P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \mu_{PTO} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad [3]$$

Y teniendo en cuenta todos los condicionantes ya expuestos y después del proceso de preselección se adoptaron seis alternativas básicas de diseño, cuyas características básicas se expresan a continuación:

### Alternativa 1

- Flujo unidireccional con la hélice aguas arriba (barlovento).
- Tres cables primarios de sujeción (enganchados a proa de cada torpedo) mas otro principal, que va de su punto de unión al de distribución de las líneas de fondeo.
- El conjunto gira desde un punto de enganche común quedando siempre el rotor a barlovento de la estructura.
- Se requiere un tangón para impedir el giro libre de la estructura y el retorcimiento de los cables
- Cable auxiliar activo (de longitud variable con chigre sumergido), de menor sección, enganchado en la popa del torpedo inferior.

### Alternativa 2

- Rotor trabajando, tanto a barlovento como a sota-vento ,según el sentido de la corriente.
- Seis cables de sujeción enganchados a proa y popa de cada torpedo, que se unen 3 a 3 en dos puntos de enganche y de estos a un cable principal a proa y de otro a popa.
- El conjunto tiene una capacidad de giro limitada.

### Alternativa 3

- ✓ Rotor aguas arriba (barlovento)
- ✓ Cable de sujeción principal enganchado directamente en la proa del torpedo inferior
- ✓ El conjunto gira desde un punto de enganche común quedando siempre el rotor a barlovento de la estructura

✓ Se requiere un tangón para impedir el giro libre de la estructura y el retorcimiento de los cables

✓ Cable auxiliar activo (de longitud variable con chigre sumergido), de menor sección , enganchado en la popa del torpedo inferior.

### Alternativa 4

■ Diseño base igual al definido en la alternativa 1 , en cuanto a la disposición de la estructura y del sistema de fondeo.

■ Los torpedos están unidos por una estructura circular que forma una tobera que acelera ligeramente la velocidad del flujo de agua y confiere robustez estructural al conjunto.

### Alternativa 5

✓ Torpedo o flotador inferior de gran tamaño desmontable.

✓ Sistema de enganche similar al de la alternativa 2, pero con los cables principales saliendo directamente de los extremos del torpedo inferior.

✓ El cuerpo principal del torpedo permanece siempre sumergido.

✓ Para el mantenimiento se separan los dos cuerpos del torpedo.

✓ Podría hacerse una unión de tipo circular, pudiendo orientar el rotor como se hace en los aerogeneradores.

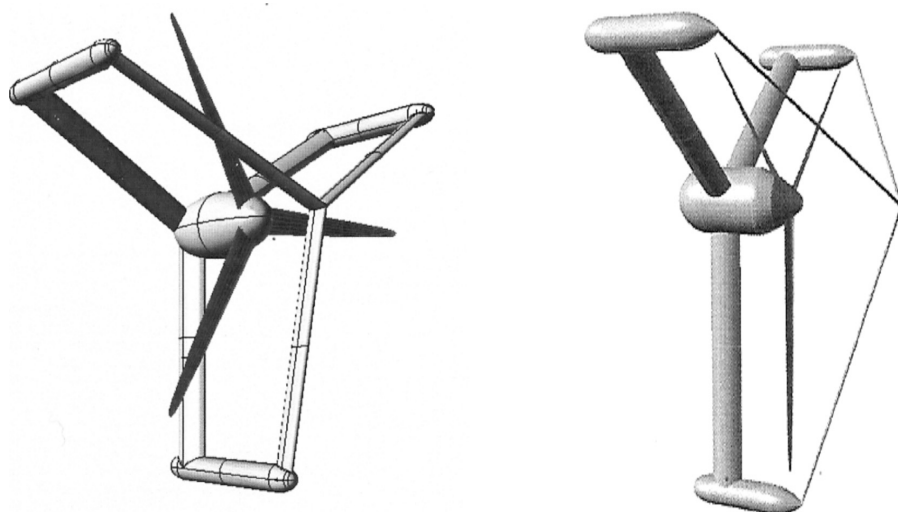
### Alternativa 6

• Estructura y fondeo similares a la alternativa 2, añadiendo tres tirantes que unen los extremos de proa de los torpedos con el del domo. La nariz o proa del domo no gira con el rotor

• Eliminación de los cables intermedios y colocación de un cable principal en el extremo de proa del domo y otro en el de popa

### DESCRIPCION DE LOS DISPOSITIVOS GSY-A6.5 PARA FLUJO BIDIRECCIONAL Y GSY-U1M PARA FLUJO UNIDIRECCIONAL ↓

Después de realizar el análisis comparativo de las seis alternativas de diseño antes descritas, y valorándose dentro del análisis el ciclo de vida como característica básica de GESMEY, la reducción al máximo de las posibilidades de fallo y de las tareas de mantenimiento, se eligieron como diseños para el desarrollo de los dos prototipos del Proyecto la alternativa 1 y la alternativa 6, dando lugar a los prototipos conceptuales GSY-A6.5



**FIGURA 1**  
**DISEÑOS**  
**CONCEPTUALES DEL**  
**GESMEY: PROTOTIPOS**  
**GSY-A6-5 Y GSY-U1M**

con 600 kW de potencia, considerado óptimo para localizaciones donde la corriente sea bidireccional y de muy baja velocidad y el GSY-U1M, con 1 MW de potencia idóneo para lugares donde el flujo de la corriente sea mayoritariamente unidireccional y de velocidad nominal del orden de 2 m/s.

Estos diseños conceptuales (figura 1) poseen como partes principales las siguientes:

**Rotor** conformado por palas de paso fijo para mejorar la fiabilidad y la eficiencia.

**Domo central** en forma elipsoidal, contenedor del tren de generación y contenedor de los sistemas auxiliares.

**Columnas** que constituyen elementos principales de la resistencia estructural y contenedores de los tanques auxiliares de lastre.

**Torpedos** en forma cilíndrico elipsoidal, contenedores de los tanques principales de lastre, que constituyen los elementos sustentadores, facilitando la estabilidad hidrostática en generación y a flote.

#### DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS Y COMPONENTES INTERNOS

Prácticamente el total de elementos internos que forman parte del generador GESMEY, como el tren de potencia electromecánico (PTO), el sistema general de control y otros varios elementos auxiliares, están ubicados en el interior del domo. Estos elementos son:

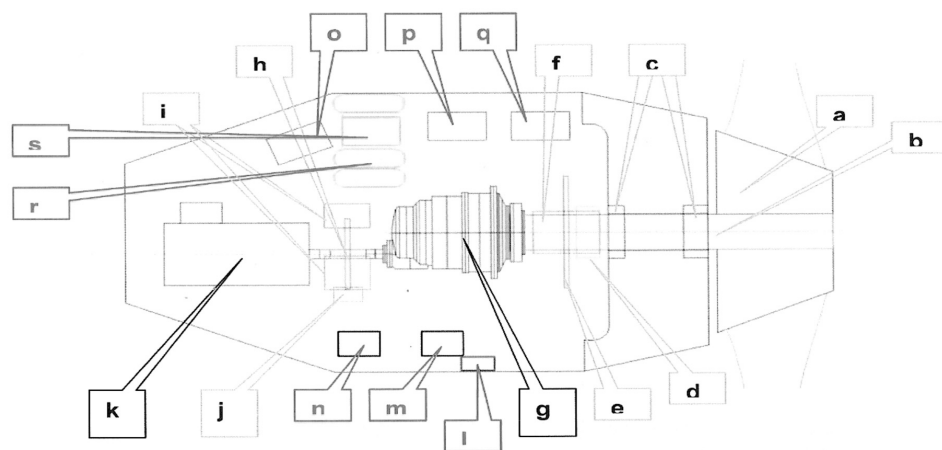
- Rotor, formado por el núcleo y tres palas, que está situado fuera de la parte estanca del domo
- El eje de baja velocidad
- La bocina con sus dos cierres
- La chumacera de empuje

- El disco de frenado de baja velocidad
- Los dos frenos de baja velocidad
- El multiplicador de velocidad, formado por un tren de engranajes planetarios
- El eje y disco de frenado de alta velocidad,
- Los tres frenos de alta velocidad
- La bomba de sentinas
- La bomba y auxiliares de refrigeración del multiplicador
- La bomba y auxiliares de refrigeración del alternador
- El interruptor de protección y conexión,
- El cuadro de 230 V
- El cuadro de control electrónico
- Las botellas de aire comprimido
- El cuadro de válvulas del sistema de lastres

El Domo tiene su cubierta exterior formada por una envolvente elipsoidal, de modo que sus formas sean hidrodinámicamente eficientes. En su estructura se integran los refuerzos de la proa, de la parte central y de popa, la escotilla de acceso y los polines de soporte del tren electromecánico. Entre la cubierta y la estructura se sitúan los intercambiadores de refrigeración de agua y aceite.

Como punto de partida, se ha elegido un alternador síncrono de imanes permanentes, refrigerado por agua, el cual no requiere de alimentación para la excitación ni requiere elementos auxiliares como rectificadores y posee en consecuencia un mantenimiento más sencillo y un mejor rendimiento.

Puede observarse que, por razones de empacho, los convertidores de electrónica de potencia irán fuera del domo (normalmente en una plataforma de concen-



**FIGURA 2**  
**DISPOSICIÓN DE**  
**ELEMENTOS EN EL**  
**DOMO**

tración de energía del parque). En su diseño habrá que tener en cuenta las especificaciones de salida de la energía obtenida, que vendrán impuestas por la normativa vigente en cada zona geográfica donde el generador sea instalado para la conexión a la red eléctrica de transporte. Pensado en el caso de España se han considerado los siguientes requerimientos: sistema trifásico, 50 Hz, potencia reactiva mínima, filtrado de armónicos, control de microcortes y tensión adecuada para la conexión a la red más cercana a través de la estación transformadora.

Por último, debe ponerse de manifiesto que el criterio general aplicado en la selección de los distintos componentes y equipos se compone de las siguientes premisas: existencia comercial de los componentes en la medida de lo posible, compatibilidad con los componentes a los que debe interconectarse y ajuste máximo a los valores reales de funcionamiento, evitando sobredimensionamientos innecesarios.

En cuanto al sistema de instrumentación y control, este se ha desarrollado considerando los siguientes procedimientos a los que debe atender: de emergencia, que impliquen la parada del sistema, de control de los distintos subsistemas y para los diferentes modos de funcionamiento del generador, y de monitorización de todas las variables del sistema

Además se ha definido y estructurado un Sistema de Señalización y Vigilancia constituido por los siguientes subsistemas: de señalización, cuya misión es indicar la presencia de los generadores a las embarcaciones y a la fauna marina que se acerquen a sus proximidades, al objeto de evitar colisiones y daños y subsistema de vigilancia (*security*), cuya misión es la protección del parque de generadores frente a intrusos. Se estructurara a través de un sistema de vigilancia de superficie y un otro de vigilancia submarina

## DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE LASTRADO Y FONDEO †

El sistema de Lastrado permite variar la posición del generador desde la superficie hasta la profundidad

de operación y allí situarlo de forma correcta. Asimismo, permite pasar de esta posición, mediante la emergencia del generador hasta situarlo a flote y allí posicionarse convenientemente para poder realizar las operaciones de mantenimiento y el transporte mediante remolque.

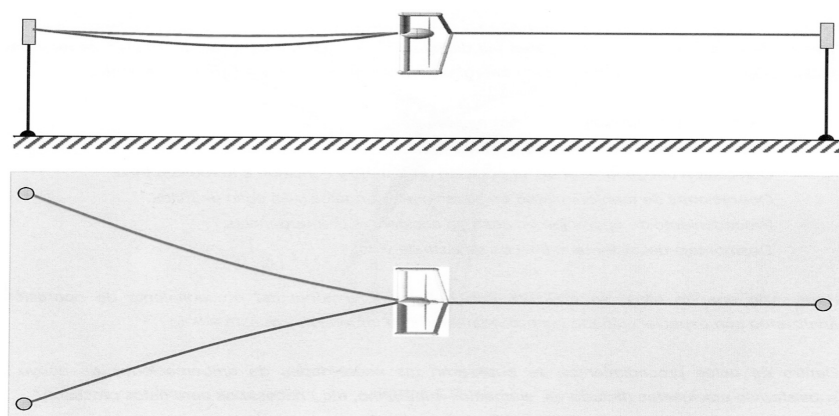
Los elementos principales de este sistema son: los tanques de lastre, que se situarán en el interior de los torpedos y de las columnas, las botellas de aire comprimido, el equipamiento para la carga del aire comprimido, las válvulas y el sistema electrónico de control.

El sistema de fondeo, que permitirá mantener el generador en la posición de trabajo frente a la corriente, está compuesto por los elementos siguientes: boyas sumergidas, líneas de amarre de las boyas sumergidas al generador, línea de fondeo desde la boya al fondo marino y anclaje de la línea de fondeo al suelo marino.

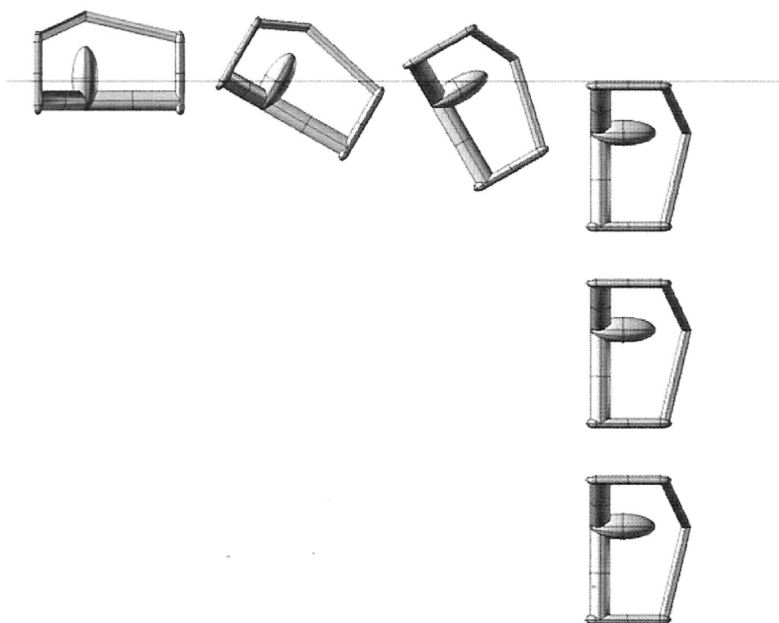
Con esta conformación, el sistema de fondeo es relativamente simple, fácil de instalar y de mínimo impacto sobre el ecosistema y consigue los siguientes objetivos:

- ✓ Independencia al máximo del sistema de fondeo del generador, siendo mínima la interacción entre ambos.
- ✓ Accesibilidad de los puntos de suelta y enganche.
- ✓ Seguridad y fiabilidad del sistema pues, permite soportar el fallo de una de las líneas.
- ✓ Unión a la estructura soporte de GESMEY sin imponer grandes cargas, para no desestabilizar el generador.
- ✓ Conformación de módulos que permiten mediante una combinación simple el fondeo de todo el parque de generación o el de un solo generador.

Por ejemplo, para el dispositivo GSY-U1M, el sistema de fondeo dispone, para cada generador, de tres boyas sumergidas, una por la parte de proa y dos por la de popa, siendo la longitud del cable de amarre



**FIGURA 3**  
DISPOSICIÓN DEL GESMEY FONDEADO PARA OPERAR CON LA CORRIENTE ENTRANDO POR LA PROA



**FIGURA 4**  
PROCESO DE INMERSIÓN DEL GENERADOR GESMEY

del generador a la boya de proa, de 94 metros, y la de cada uno de los de popa, de 101 metros. De este modo en el caso de configurar un parque los generadores estarían separados unos 70 metros en sentido transversal a la corriente y unos 200 metros en el sentido longitudinal alineándose este cable con la dirección predominante de la corriente de la corriente (figura 3).

El generador alcanza su posición de trabajo por sí mismo, mediante fuerzas hidrostáticas que provoca y controla el Sistema de Lastrado, realizándose la inmersión desde la flotación a la posición de operación (figura 4) de forma automática.

Cuando la emersión del generador es necesaria para realizar a flote las tareas de mantenimiento, se suelta el cable de fondeo a proa, mediante un gancho de disparo a distancia y el generador emerge en posición vertical y una vez en superficie, mediante el soplado del agua del tanque de lastre situado en el torpedo inferior, el generador se posiciona a flote con el rotor fuera de agua, tal como se indica en

la figura 5, en página siguiente, y de este modo se puede atender a las tareas que sean necesarias solo usando una pequeña embarcación auxiliar

Y en esta misma posición se realiza el transporte a flote del generador mediante el uso de una embarcación de remolque, cuando sea necesario su traslado a tierra o bien cuando se transporte desde tierra hasta la vertical del punto de operación.

#### DEFINICIÓN Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO DE 10 KW

Se trata de un modelo de 10 kW, GESMEY-ME10, diseñado y desarrollado de forma específica para la realización de estos ensayos. Dispone, en el interior del domo central, de todos los elementos necesarios para la generación de energía eléctrica, la medida de parámetros críticos de funcionamiento y operación, y la recepción y transmisión de datos. En el interior de los torpedos que se encuentran en los extremos de cada

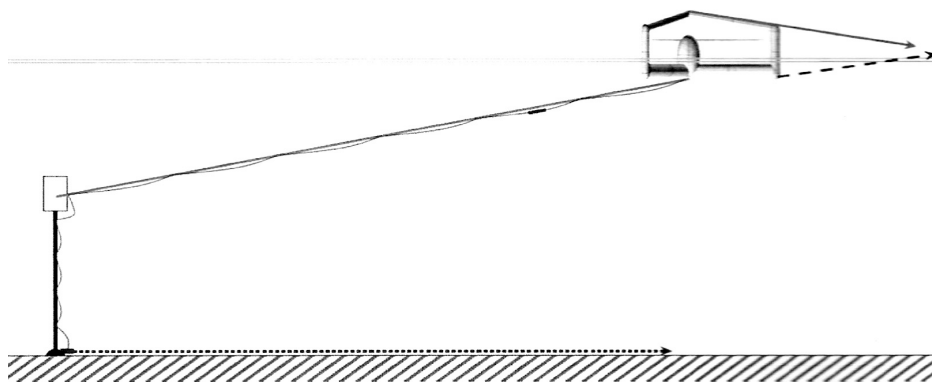


FIGURA 5

POSICIÓN A FLOTE  
DEL GENERADOR  
GESMEY PARA  
MANTENIMIENTO

brazo, existen tres tanques hinchables para el control de lastre, que se accionan mediante tres tubos de aire comprimido. Mediante el control del lastre de estos tanques, se realizarán las maniobras de giro e inmersión del generador.

Los planos básicos y el desarrollo constructivo del dispositivo, incluido el modelo tridimensional así como la gestión de compras, han sido realizados por la Fundación Centro Tecnológico SOERMAR, el sistema de control y potencia, así como el programa de control, han sido diseñados por el Laboratorio de Electricidad y Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Astilleros Balenciaga ha sido el responsable de aplicar la estrategia constructiva de los elementos que constituyen el dispositivo así como de su construcción y pruebas junto con la Fundación Centro Tecnológico SOERMAR. También ha realizado tareas de supervisión y de apoyo técnico al proceso el grupo GITERM, de la Universidad Politécnica de Madrid.

El generador dispone de tres puntos principales de enganche, uno en la zona central de la tapa del domo, donde se enganchará el cable de remolque del dispositivo que viene de la boya BOSCEM, y otros dos en los extremos del flotador superior para sendos cables de seguridad; uno, limitador de profundidad y otro, de frenado hidrostático.

La estructura externa del dispositivo es de acero inoxidable soldado, mientras que el rotor se compone de tres palas de fibra de carbono unidas a un núcleo de acero inoxidable, siendo éste el elemento más sensible a los posibles impactos. El generador no contiene ningún elemento que pudiese producir, ante un accidente, derrames contaminantes.

Junto al generador se ha desarrollado la construcción de la boya BOSCEM a la escala requerida, siendo este elemento fundamental, ya que sujeta el generador, lo mantiene estable a la profundidad de trabajo y permite el giro del dispositivo experimental.

La boya BOSCEM dispone de un perfil NACA 0040 y un peso de 300 kg en el ensayo de remolque, suficiente para que se mantenga a la profundidad de trabajo durante la operación. Para ello dispondrá de tres tanques interiores: un tanque central de unos 100 litros de

capacidad, cuyo volumen de agua de lastre sea controlable mediante la inyección de aire comprimido, dos tanques no estancos en cada extremo del perfil en los que se pueda añadir lastre sólido. Esta boya es un invento del profesor Lopez Piñeiro, de la Universidad Politécnica de Madrid, y está protegida mediante patente internacional. Sus dimensiones iniciales son 1 metro de eslora, por 0,8 metros de puntal y 0,4 metros de manga en su punto más ancho, lo que le otorga un desplazamiento aproximado de 0,220 m<sup>3</sup>.

Los planos básicos y el desarrollo constructivo del dispositivo, incluido el modelo tridimensional así como la gestión de compras, han sido realizados por la Fundación Centro Tecnológico SOERMAR, Astilleros Balenciaga ha sido el responsable de aplicar la estrategia constructiva de los elementos que constituyen la boya, así como de su construcción y pruebas, junto con la Fundación Centro Tecnológico SOERMAR, encargándose el grupo de investigación GITERM (UPM) de la supervisión técnica del proceso.

## DEFINICION DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS ↓

El conjunto del prototipo del generador y la boya, tal y como se ha descrito anteriormente, ha sido sometidos a los ensayos definidos en los protocolos que a tal efecto ha realizado la Fundación Centro Tecnológico SOERMAR. En los citados protocolos se pueden diferenciar entre dos tipos de pruebas:

### Pruebas de maniobra ↓

Se han realizado durante cuatro días en las instalaciones del astillero y en ellas han participado un equipo de trabajo formado por 6 personas directas y dos auxiliares. Este equipo de trabajo está formado por personal de Astilleros Balenciaga, Fundación Centro Tecnológico SOERMAR y Centro Tecnológico de los Medianos y Pequeños Astilleros SOERMAR.

Los objetivos de estas pruebas particulares han sido:

✓ Verificar el comportamiento del prototipo del generador, para lo que se han realizado una serie de ensayos contenidos en el protocolo, consistentes en la realiza-



ción de diversas maniobras. Particularmente detalladas han sido las efectuadas para el ajuste de los controles operativos del prototipo del generador mediante las cuales se han ajustado los automatismos de control del llenado de tanques de lastre, control de giro para inmersión, estabilización en inmersión, giro contrario para emersión y estabilización del mismo para llegar al punto de flotación libre.

✓ Verificación del comportamiento del prototipo de la boya, y las pruebas de anclaje y liberación semiautomática de la boya.

✓ Verificar el comportamiento del conjunto generador y boya para realizar simulaciones sobre maniobra conjuntas.

Durante la realización de las pruebas se realizaron los oportunos ajustes para la calibración de los elementos de control y se tomaron valores de las variables que definen en cada momento la posición de equilibrio de los elementos, resultando finalmente un éxito tras la comprobación de la similitud del comportamiento real con el simulado durante el desarrollo anterior del proyecto.

### Pruebas de remolque †

Con posterioridad a las pruebas mencionadas en el apartado anterior, el equipo de trabajo mencionado anteriormente desarrolló durante cinco días pruebas fijadas en los protocolos anteriormente mencionados. Para ello y para cada una de las tres longitudes de remolque: Remolque corto, 28,5 metros; remolque intermedio, 43,5 metros y remolque largo, 58,5 metros

Se fijaron recorridos dobles (ida y vuelta) para compensar los posibles efectos de corrientes sobre los resultados, a las siguientes gamas de velocidades de remolque: 3,0 m/s; 2,5 m/s; 2,0 m/s, y 1,0 m/s.

Dentro de estos ensayos se realizan dos series de toma de datos:

**Ensayos de potencia**, cuyo objetivo es poder medir la potencia máxima extraíble del dispositivo en función de la velocidad de corriente, obteniendo la curva de potencia eléctrica/velocidad de corriente.

**Ensayos de caracterización de la hélice**, cuyo objetivo es obtener las curvas de la hélice y los coeficientes reales de la hélice ( $k_T$ ,  $k_Q$ ,  $k_R$ )

Una vez finalizadas las pruebas y realizadas las elaboraciones de las curvas correspondientes puede afirmarse que los resultados han alcanzado los objetivos previstos, obteniéndose un rendimiento superior al 40% para la hélice y una capacidad de generación máxima de energía eléctrica muy próxima a la nominal de 10 Kw.

### CONCLUSIONES †

A la vista del trabajo realizado en las fases de definición del proyecto GESMEY, cuyos aspectos más sig-

nificativos se han reflejado en este trabajo, y de los resultados de las pruebas llevadas a efecto con el prototipo se concluye que se han logrado los objetivos de diseños propuestos ya que GESMEY:

✓ Representa un nuevo concepto de generador eléctrico submarino, que permite explotar la energía de las corrientes marinas situadas a profundidades superiores a los 40 metros.

✓ Puede considerarse como un primer ejemplo de lo que puede ser ya una segunda generación conceptual de dispositivos de generación.

✓ Tiene un diseño conceptual muy simple, lo que supone una estructura robusta y de fácil construcción.

✓ Tiene un impacto mínimo sobre el medio ambiente marino, ya que trabaja sumergido pero no requiere apoyo directo sobre el suelo marino.

✓ Al final de su vida útil puede ser removido de un modo sencillo y con muy poco coste, sin problema alguno para el ecosistema marino.

✓ Tiene la capacidad explotar corrientes con velocidad máxima inferior a los 2 m/s

✓ Requiere para su fijación en operación de un sistema de fondeo sencillo y de poco coste, además de suponer un mínimo impacto sobre el ecosistema marino

✓ No necesita disponer de buques especiales o de artefactos offshore complejos, ni para su transporte, ni para su posicionamiento en operación, ni para su mantenimiento

✓ Puede ser transportado en superficie mediante remolque en flotación por medio de un remolcador normal.

✓ Tendrá un ciclo de vida de menor coste ya que su mantenimiento será más barato que los de los generadores existentes, en base a la facilidad de emersión, transporte y remoción.

El prototipo de 10 Kw ha mostrado un comportamiento en cuanto a su evolución en el seno del mar mediante fuerzas hidrodinámicas exactamente como está previsto que lo haga GESMEY según las simulaciones teóricas. La capacidad de generación del prototipo es la prevista lo que hace garantizar que el generador GESMEY cumplirá sus expectativas de producción de energía eléctrica en la cuantía prevista

### BIBLIOGRAFÍA †

L.R. NÚÑEZ RIVAS; A. LOPEZ PIÑEIRO; JOSÉ A. SOMOLINOS SANCHEZ y E. NOVOA ROJAS: «The GESMEYProject. Design and development of a second generation TEC». Proceedinds of the EWEC2011 Southampton (U.K.) September 2011.

A. SAVAGE *et al.* (2007): «Tidal Technologies Overview», Sustainable Developments Commission ENTEC UK Limited, Bristol (UK).

A. LÓPEZ PIÑEIRO; L.R. NÚÑEZ RIVAS y J.M. JUANES GONZÁLEZ (2008): «Tecnologías para el aprovechamiento de las corrientes marinas», Proceedings 47º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima, Palma de Mallorca (Spain).

L.R. NÚÑEZ RIVAS y M.A. HERREROS SIERRA (2006): «Gibraltar's Strait a marine renewable energy source» Proceedings World Maritime Technology Conference WMTc 2006 London (UK).

L.R. NÚÑEZ RIVAS (2009): «Las energías renovables marinas», pp 7-12. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía de las olas y de las corrientes marinas ISBN-978-84-612-9269-1 Fundación INNOVAMAR Madrid (Spain)

A. LÓPEZ PIÑEIRO (2009): «Nuevos generadores para el

aprovechamiento de las corrientes marinas», pp 12-15. *Revista UPM*, Madrid (Spain).

A. LÓPEZ PIÑEIRO (2007): «Sistema sumergible para el aprovechamiento energético de las corrientes marinas» Patente P200700985/4 BOPI 16/07/08 (Spain).

J.M. JUANES GONZÁLEZ (2008): «El potencial energético de las corrientes marinas en el estrecho de Gibraltar». Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (Spain)

L.R. NÚÑEZ RIVAS, A. LÓPEZ PIÑEIRO, E. NOVOA ROJAS, y A. CARNEROS LOZANO (2010): «The GESMEY Ocean Current Turbine. A proposal for marine current energy extraction on deeper waters», Proceedings International Conference on Ocean Energy ICOE 2010 Bilbao (Spain).