

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Titulación: Máster Energías Renovables

Alumno/a: Antonio Ramón Grünwald

Directores: Blas Zamora Parra
Joaquín Fernández Perles

Cartagena, 27 de Septiembre de 2012

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	pág.2
2. TIPOS DE TURBINAS DE CORRIENTE MARINA	pág.8
3. PRINCIPIOS DE LAS CORRIENTES MARINAS	pág.42
4. EMPLAZAMIENTOS POTENCIALES PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE TURBINAS DE CORRIENTES MARINAS	pág.50
5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO A UTILIZAR EN EL DISEÑO DE LAS TURBINAS MARINAS	pág.62
6. PREDISEÑO DE UNA TURBINA DE CORRIENTE MARINA	pág.86
7. CONCLUSIONES	pág.99
8. BIBLIOGRAFÍA	pág.102

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

0. INTRODUCCIÓN

En estos últimos años se está reconociendo el amplio potencial de la generación de energía eléctrica mediante rotores instalados en el fondo marino para aprovechar las corrientes marinas existentes en los océanos. Numerosas empresas del sector energético renovable están haciendo grandes inversiones para la investigación del aprovechamiento de estas corrientes marinas, algunas de estas empresas como “OpenHydro” y “MarineTurbineCurrent” entre otras, están invirtiendo en proyectos tanto en Europa como en Estados Unidos.

Este tipo de energía renovable tiene una gran ventaja respecto a las otras renovables, que su generación puede ser casi ininterrumpida, puesto que siempre habrá una cierta corriente (si no es en un sentido será en el otro) y predecible (tablas de mareas de un lugar determinado).

Según los autores A.S. Bahaj y L.E. Myers [1], el inicio de este estudio más exhaustivo por la parte de las empresas europeas tiene como origen el compromiso de la UE de combatir el calentamiento global, uno de los pilares para hacer frente a este efecto es la generación de electricidad con energías renovables tendiendo a minimizar cada vez más el uso de los combustibles fósiles. El estudio de 106 localizaciones potenciales para el aprovechamiento de las corrientes nos calcula que se podría extraer alrededor de 50 TWh/año de las corrientes marinas.

El estudio de este tipo de turbinas va marcada principalmente por la aplicación de la tecnología a la conversión de la energía cinética de las corrientes marinas, esto lo podemos desarrollar gracias a toda la investigación previa en los campos de la energía eólica, las

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

hélices de embarcaciones rápidas y de turbinas hidráulicas. Pero no quiere decir que ya estén todos los problemas solucionados, quedan muchos campos por desarrollar e investigar como el duro ambiente marino, los fenómenos de cavitación y las tensiones que deben soportar estas estructuras.

La generación eléctrica por corrientes marinas tiene numerosas ventajas, a continuación se expondrán algunas de estas ventajas:

- Es un recurso predecible al depender de las mareas, gracias a esto se puede planear con cierta antelación la producción de energía de este sistema.
- Tiene un ligero impacto medioambiental, pero mucho menor que otros sistemas de generación eléctrica, tanto renovable como convencional.
- Una turbina de corriente marina con una velocidad de corriente de entre 2 y 3 m/s puede obtener unas cuatro veces más potencia anual que un aerogenerador equivalente. Entonces el aumento de coste tanto de instalación como de mantenimiento de los primeros se ve suplido sobradamente con el aumento de producción.

La potencia que podemos obtener de los rotores marinos tiene depende de una ecuación similar a la de los aerogeneradores, la ecuación que obedecen es la siguiente:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1.1)$$

Donde “ ρ ” es la densidad del fluido, “ A ” es el área barrida por el rotor y “ V ” es la velocidad de la corriente incidente del fluido. Sin embargo, las turbinas no pueden aprovechar toda esta potencia, el límite de aprovechamiento es el conocido como el límite de “Betz”, es un

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

coeficiente que tiene en cuenta las diversas pérdidas, un valor aproximado es alrededor de 0,3 si tenemos en cuenta pérdidas mecánicas leves. Entonces la ecuación queda de la siguiente forma:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1.2)$$

Los autores mencionados anteriormente hicieron la comparación de la envergadura de las palas de las turbinas marinas con las de los aerogeneradores, entonces tenemos que, para una turbina de viento de 2 MW, tomando una media de la velocidad de viento de 7 m/s y un diámetro de 60 m, la potencia media es de 600kW. Si asumimos una velocidad de corriente marina de 2 m/s con un 10% de pérdidas, nos queda unos 1,8 m/s, para la producción equivalente de energía con el rotor aéreo, tenemos un diámetro de 24 metros del rotor marino.

El ambiente marino es considerablemente más duro que en tierra donde se encuentran los aerogeneradores. Además deberemos de añadir la problemática de la corrosión por estar en un ambiente marino, el agua de mar es una solución salina que corroe cualquier superficie metálica si no está suficientemente protegida. Tanto la góndola, como la torre y las palas deberán estar pintadas, galvanizadas e incluso construirse de materiales no metálicos resistentes a la corrosión. Las estructuras metálicas se podrían construir con un espesor mayor al necesario para evitar una rotura por corrosión y deber hacer un mantenimiento tan continuo. Los rotores también pueden ser dañados por escombros que estén en el mar, golpeando las palas y deteriorándolas. Otro inconveniente es la vida marina que se pueda adherir a las turbinas, haciendo que se vaya reduciendo su efectividad a lo

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

largo del tiempo, esto se podría solucionar con pinturas con efectos anti-incrustantes similares a las empleadas en los cascos de los barcos.

Para el mantenimiento de estos rotores se deberá emplear embarcaciones especializadas, y será harán estas labores con mayores dificultades y peligro que con las aeroturbinas. Para reducir los viajes de estas embarcaciones sería importante tener una excelente automatización y toma de datos en todo momento, para poder asegurarnos a distancia del buen funcionamiento de los rotores.

La densidad del agua de mar suele estar alrededor de los 1025 kg/m^3 con lo cual el empuje axial en la turbina será de una magnitud elevada. El empuje es la fuerza que se genera en la dirección del fluido como resultado de la extracción de energía de la turbina. El cambio de energía del fluido se manifiesta con la reducción de velocidad de la corriente en ambos lados de las palas de las turbina y es esencialmente el cambio de "momentum" del fluido. La turbina y su anclaje al lecho marino deber de poder soportar estas fuerzas. En la ecuación siguiente se puede calcular grosso modo el empuje máximo ($T_{\text{máx}}$):

$$T_{\text{máx}} = \frac{1}{2} \cdot C_t \cdot \rho \cdot A \cdot (V_{\text{máx}})^2 \quad (1.3)$$

Donde " C_t " es el coeficiente de empuje (alrededor de 0,9) y " $V_{\text{máx}}$ " es la velocidad máxima del fluido. Comparando un aerogenerador de 60 m de diámetro, el empuje axial máximo es aproximadamente de 60 t. Usando el análisis comparativo anterior (diámetro del rotor marino de 24 m), el empuje de un rotor marino equivalente a una velocidad del flujo de 3 m/s es de unas 3 veces mayor. Actualmente el anclaje de estructuras en ambientes marinos es una tecnología superada con creces, gracias a la experiencia de tanto plataformas petrolíferas como de otras construcciones en el mar.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

La cavitación es otro parámetro a tener en especial consideración. Es un fenómeno que nos hará reducir el rendimiento, provocará vibraciones e incluso irá deteriorando los elementos móviles de nuestra turbina. Se produce por una disminución de la presión debido al movimiento del rotor, que hará que baje la presión hasta un punto que se produzcan burbujas de vapor, al implosionar estas burbujas chocan violentamente contra la superficie de la pala provocando un deterioro progresivo y vibraciones, ambos fenómenos sin lugar a dudas indeseados.

El grado de cavitación está determinado por la ecuación de Bernoulli siguiente:

$$K_f = \frac{P_{abs} - P_v}{\rho \cdot \frac{V^2}{2}} \quad (1.4)$$

Donde “ P_{abs} ” es igual a “ $P_{hid}+P_{atm}$ ” en presiones absolutas, “ P_{hid} ” es la presión hidrostática y “ P_{atm} ” es la presión atmosférica, “ P_v ” es la presión de vaporización del agua y “ V ” es la velocidad del fluido. A mayor número de cavitación (K_f) existirá menor probabilidad de cavitación.

Como conclusión de lo descrito en las páginas anteriores podemos que los problemas más destacados de este tipo de tecnología son las condiciones climatológicas extremas y la cavitación. La cavitación se puede evitar en la medida de lo posible haciendo un estudio detallado tanto de la geometría como del funcionamiento del rotor.

Está claro que aun queda mucho por investigar sobre esta tecnología para llegar a un estado óptimo y maduro. Las áreas de investigación que deben tener una especial consideración son por ejemplo, el área del comportamiento del fluido que pasa a través de nuestro rotor, estudiando tanto la cavitación como los fenómenos que aparecen, estos estudios deberán apoyarse tanto en estudios mediante CFD's (Computer Fluid Dynamics) como en estudios

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

experimentales en túneles de viento para los ensayos aerodinámicos, ensayos en canales de experiencias hidrodinámicos y túneles de cavitación. Otro campo a desarrollar podría ser en número de rotores por equipo y la influencia que tendrá un rotor sobre el otro, y así una infinidad de opciones y líneas de investigación.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

1. TIPOS DE TURBINAS DE CORRIENTE MARINA.

Las corrientes marinas debido a las mareas generan electricidad empleando el flujo de agua creado por las corrientes al subir o bajar la marea y en algunos casos esta corriente es acelerada debido a la topografía del terreno costero o del fondo. Gracias a toda la información de los desarrollos tecnológicos en el sector eólico se ha podido dar un paso más en la industria adentrándonos en el sector de las corrientes marinas, puesto que, se rigen por el mismo principio físico de conversión de la energía, se transforma la energía cinética de un fluido (corriente marina o corriente de aire) en energía eléctrica mediante artificios mecánicos de conversión (rotores eólicos o rotores submarinos). En muchos casos a simple vista se ven el gran parecido que tienen ambos rotores.

Los programas de investigación en este campo en la industria, gobiernos y universidades de Reino Unido, Noruega, Irlanda, Italia, Suecia, Canadá y Estados Unidos en estos últimos 10 años están estableciendo una importante base para esta industria emergente de las turbinas marinas. A día de hoy numerosas empresas, industrias privadas y gobiernos están aunando esfuerzos y recursos para llegar a comercializarse este tipo de tecnología renovable para la generación de electricidad.

A continuación se describirán varios dispositivos que en la actualidad se están investigando, unos aun están en las primeras fases de desarrollo del prototipo y otras en cambio están en fases muy avanzadas listas para su comercialización. Antes de adentrarnos en los prototipos existentes deberemos de hacer una pequeña clasificación de los sistemas, tanto de la manera de incidencia de la corriente como del sistema en si mismo.

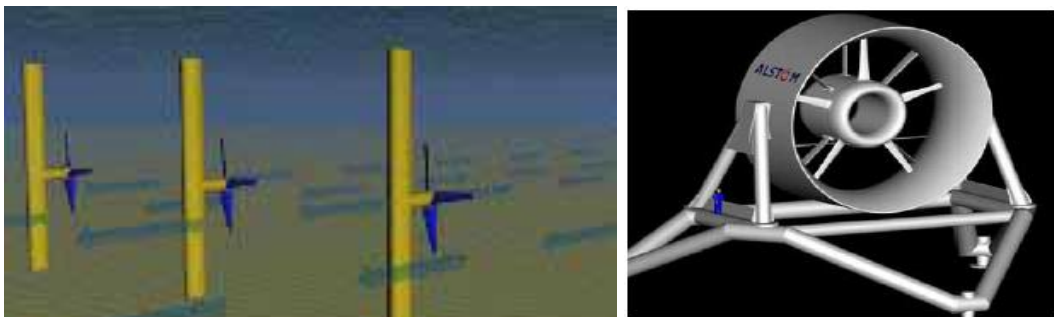
Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

1.1. Tipos de artefactos de energía de las corrientes marinas.

Según la EMEC (European Marine Energy Center) [2] podemos clasificar los conversores de energía de las corrientes marinas en energía eléctrica en seis categorías.

1.1.1. Turbinas de eje horizontal

Este sistema extrae la energía de las corrientes de una manera muy similar al de los aerogeneradores, por el flujo horizontal del fluido, agua en el caso de las turbinas sumergidas y aire en el caso de los aerogeneradores. El flujo del agua hace girar el rotor generando una sustentación debido al flujo alrededor de las palas, este movimiento rotacional es usado para generar electricidad. Estos sistemas se pueden albergar en carcasas para acelerar el fluido que atraviesa el rotor para incrementar la energía extraída.

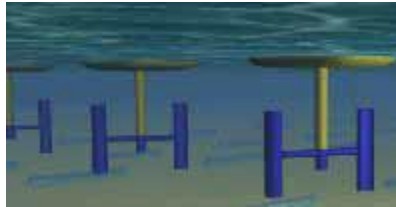


1.1.2. Turbinas de eje vertical

Este tipo de turbinas extraen la energía de forma similar a las de eje horizontal, pero su eje de rotación está colocado de forma que el flujo de agua incide de forma perpendicular al

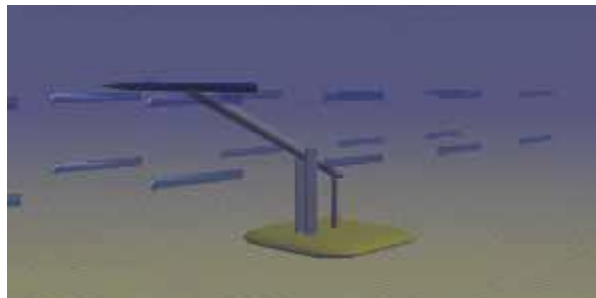
Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

sentido de la corriente marina. Algunas turbinas de eje vertical se conciben para que trabajen bajo el principio de arrastre y sustentación de los perfiles aerodinámicos.



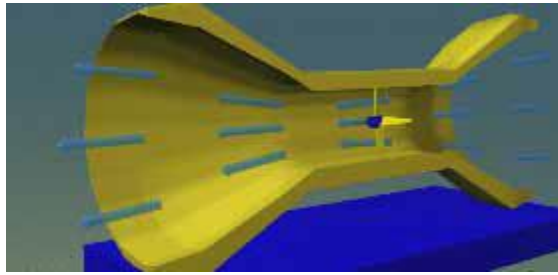
1.1.3. Perfil hidrodinámico (Hydrofoil) Oscilante.

El hydrofoil está instalado sobre un brazo que permite la oscilación vertical, su movimiento vertical es debido al flujo horizontal que provoca la sustentación en el perfil. El extremo opuesto del brazo está anclado a una estructura apoyada en el lecho marino que tiene a su vez instalado un sistema hidráulico, al ir subiendo y bajando el brazo por el efecto de sustentación del perfil mueve el líquido hidráulico que este a su vez produce electricidad.



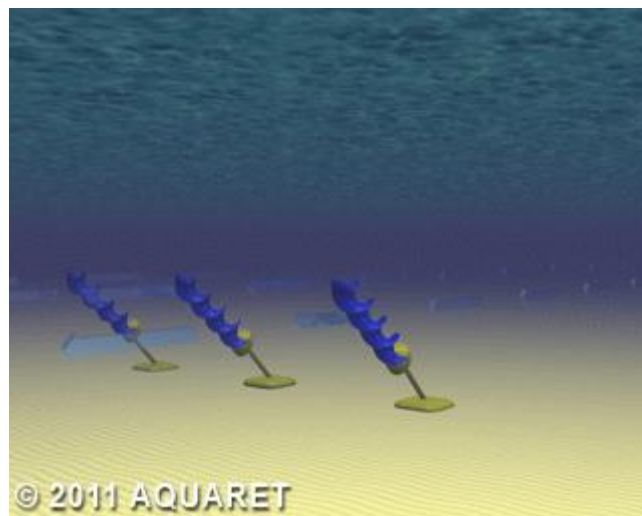
1.1.4. Sistema de Efecto Venturi.

Es una turbina de eje horizontal envuelta en una carcasa que va estrechándose hasta llegar a un diámetro ligeramente mayor que el rotor y que aguas abajo va ensanchándose. Esto provoca una aceleración del flujo de la corriente por el diferencial de presión que existe, gracias a este sistema podemos aumentar el rendimiento de las turbinas.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

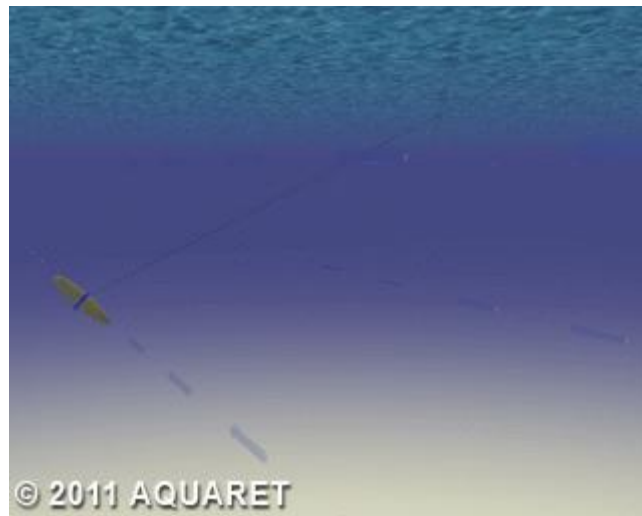
1.1.5. Tornillo de Arquimides

El tornillo de Arquimides es un sistema con una configuración helicoidal de tornillos sacacorchos, este helicoide gira en un eje central anclado al fondo marino. Este sistema extrae la energía del flujo de la corriente marina que atraviesa el artefacto haciendo que gire.



1.1.6. Tidal Kite (Cometa de Corriente)

Es un artefacto en forma de cometa que lleva instalada una turbina estando anclado al lecho marino. Esta cometa esta en “suspensión” como si fuera una cometa en el aire, la “suspensión” se la proporciona la corriente marina de la marea. El artefacto va describiendo una trayectoria en forma de ocho, aprovechando las aceleraciones de la cometa cuando baja en picado para obtener una mayor rotación de la turbina para producir una mayor energía.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

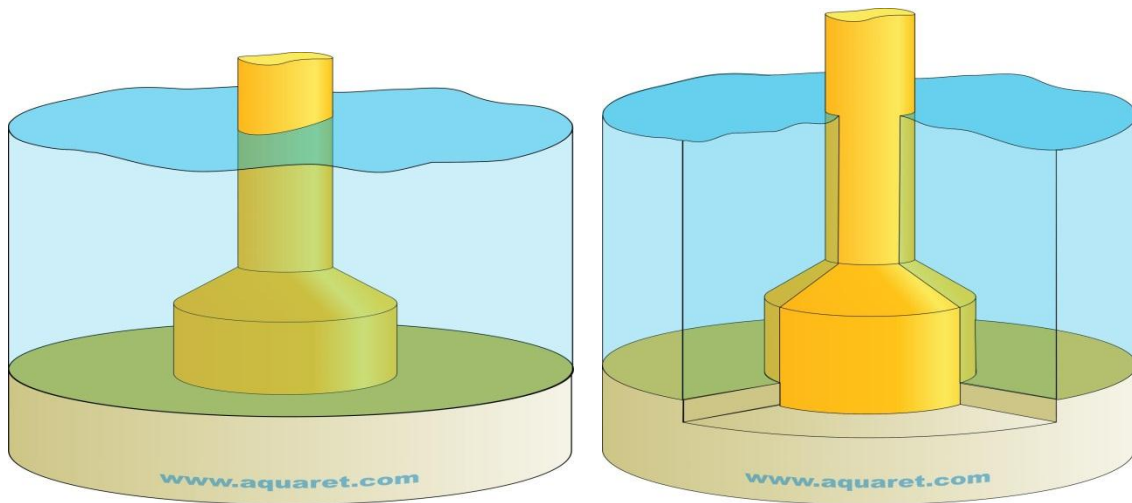
1.2. Tipos de anclajes al lecho marino

La EMEC [2] nos otorga además de una clasificación de los artefactos, una clasificación de los sistemas de anclaje al lecho marino de estos sistemas. En un principio divide los métodos de anclaje en cuatro grupos.

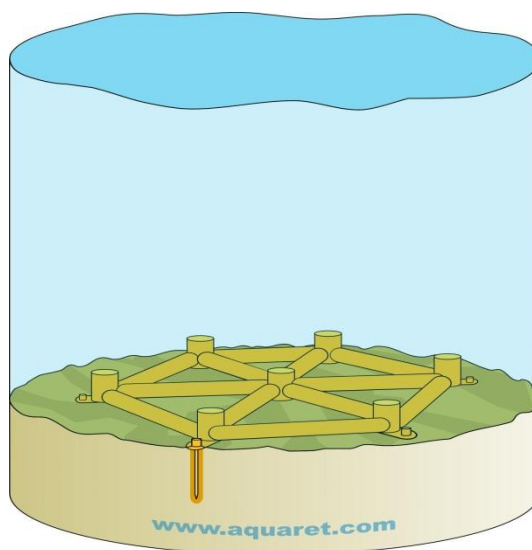
1.2.1. Base fijada por gravedad en el lecho marino

Este tipo de anclaje tiene como principio la acción de la gravedad, suele ser un bloque de grandes dimensiones que se queda fijado en el lecho marino por la acción de la gravedad dado su alto peso. En ocasiones se fija con anclajes adicionales para asegurarnos de una correcta sujeción al fondo o en lechos sedimentarios se entierra una cierta altura la base para que quede correctamente fijada y no se desplace por los movimientos del sedimento de debajo.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas



Otra configuración que podríamos englobar dentro de este apartado, es un entramado estructural apoyado sobre el lecho marino y que a su vez va anclado en unos ciertos puntos para evitar el desplazamiento o incluso el vuelco de la estructura.

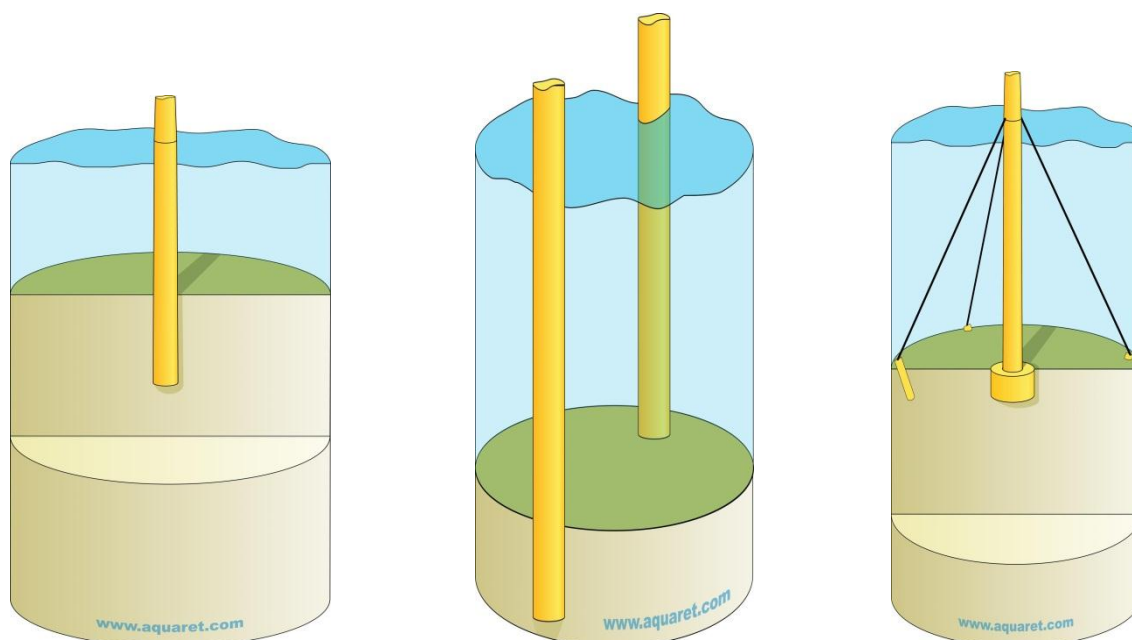


1.2.2. Pilotes

Este tipo de estructura es muy similar a la empleada en los aerogeneradores instalados en el mar. Consta de un pilote que se “clava” en el lecho marino, a simple vista parece una estructura de fácil instalación pero conlleva muchos problemas constructivos, como por ejemplo construir los cimientos pertinentes que en algunas ocasiones deben de hacerse a

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

una profundidad considerable ya que el lecho marino puede ser arenoso y de baja consistencia. Existen varias configuraciones de este tipo, como por ejemplo los pilotes únicos, pilotes gemelos o incluso pilotes anclados al lecho marino mediante unos tirantes. Este tipo de estructuras están orientadas básicamente a turbinas de corrientes marinas de eje horizontal. La ventaja más destacada de los pilotes es que nos permitirían poder elevar la turbina hasta fuera del nivel del mar, y así efectuar su reparación o mantenimiento periódico mediante mecanismos de elevación.



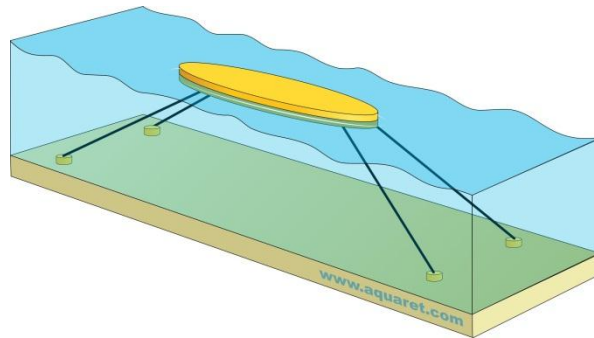
1.2.3. Flotantes

Este apartado lo subdividiremos en tres configuraciones posibles:

- a) Anclaje flexible: el artefacto va anclado mediante un cable o cadenas a una base fija en el lecho marino. Esto permite que sistema se pueda mover libremente en el flujo de la corriente marina y atender a los cambios de dirección de esta.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

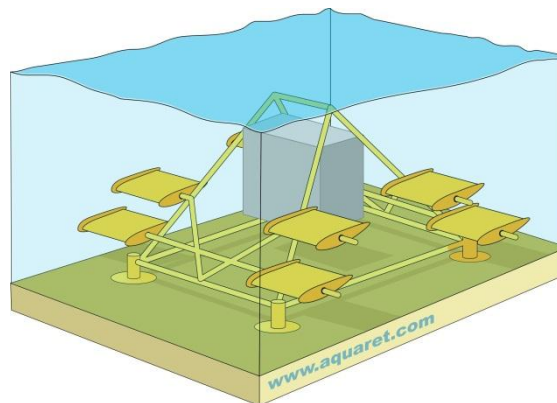
- b) Anclaje rígido: es un sistema con el mismo principio que el anterior con la excepción de que deja al artefacto con menores grados de libertad, o incluso le restringe todos los movimientos.
- c) Estructura flotante: el artefacto en su conjunto esta flotando en la superficie del mar, o a una profundidad dada en algunos casos. Las cadenas o cables están sujetos por un extremo al artefacto y al otro anclados en el fondo del mar. Esto permite que la estructura del artefacto este flotando y que permanezca siempre en el mismo sitio.



1.2.4. Hydrofoils en la base.

Se basa en el principio de sustentación de los hydrofoils, se instalan en una base de forma que al pasar el flujo de la corriente marina por ellos provoquen una sustentación hacia el fondo ejerciendo en su conjunto una fuerza hacia abajo que fija la estructura.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas



1.3. Tipo de turbinas marinas

Después de las aclaraciones realizadas anteriormente sobre los tipos de sistemas de generación de energía eléctrica y su forma de anclaje podemos introducirnos en los prototipos y turbinas que en la actualidad están haciéndose un hueco en el mundo de las energías renovables y en la industria, y cabe esperar que en no mucho tiempo podamos ver plantas enteras de generación de energía eléctrica gracias a las corrientes marinas.

La clasificación y los avances que expondremos a continuación están referidas al informe de la industria en Reino Unido de 2012 [3] que hace anualmente, este informe es un referente mundial gracias a su amplia experiencia en este tipo de energía que posee este país y a que la EMEC está situada en su territorio, norte de Escocia, otorgando al Reino Unido la vanguardia de esta tecnología. El repaso por las tecnologías lo haremos de forma cronológica en función del avance en el estado de la investigación.

1.3.1. SEAGEN

Este tipo de turbina está desarrollada por *Marine Current Turbine*, es una turbina de eje horizontal, con dos rotores por sistema sujetos a un pilote central. Esta turbina se encuentra

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

en un estado de segunda fase de sus componentes, proporcionando en la actualidad una potencia de 1,2 MW.

- Descripción

El SeaGen esta compuesto por dos rotores de eje horizontal con un diámetro de 16m cada uno, cada rotor está acompañado de su caja de engranajes y su generador. La salida del generador va acompañada de un rectificador, a un convertidor y a un transformador final para así poder enlazar con la red de distribución. Cada rotor es independiente del otro para poder tener un amplio abanico de operatividad. Los rotores tienen un control total de las palas para ajustar su borde de ataque en función de la corriente y de la energía que queremos extraer, y así poder obtener energía tanto en la subida de la marea como en la bajada, al poseer el sistema de palas orientables total está desprovisto de un mecanismo que hace rotar el conjunto global del sistema para su orientación. El sistema al poseer el pilote central, puede elevarse el conjunto de las turbinas por encima del nivel del mar mediante un mecanismo de elevación y así poder ser reparado o efectuar las labores de mantenimiento.

- Estado

El diseño del SeaGen esta basado en la experiencia obtenida del primer conversor de energía de corrientes marinas en Reino Unido llamado SeaFlow. El SeaFlow fue un artefacto de un rotor simple de 300kW de potencia, fue una turbina experimental instalada a 3km al noreste de *Lynmouth* en la costa de *North Devon* en Mayo de 2003 y posteriormente desmantelado en Octubre de 2009. El diseño de la versión del SeaGen de 2MW está completa a día de hoy y lista para ser utilizada.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

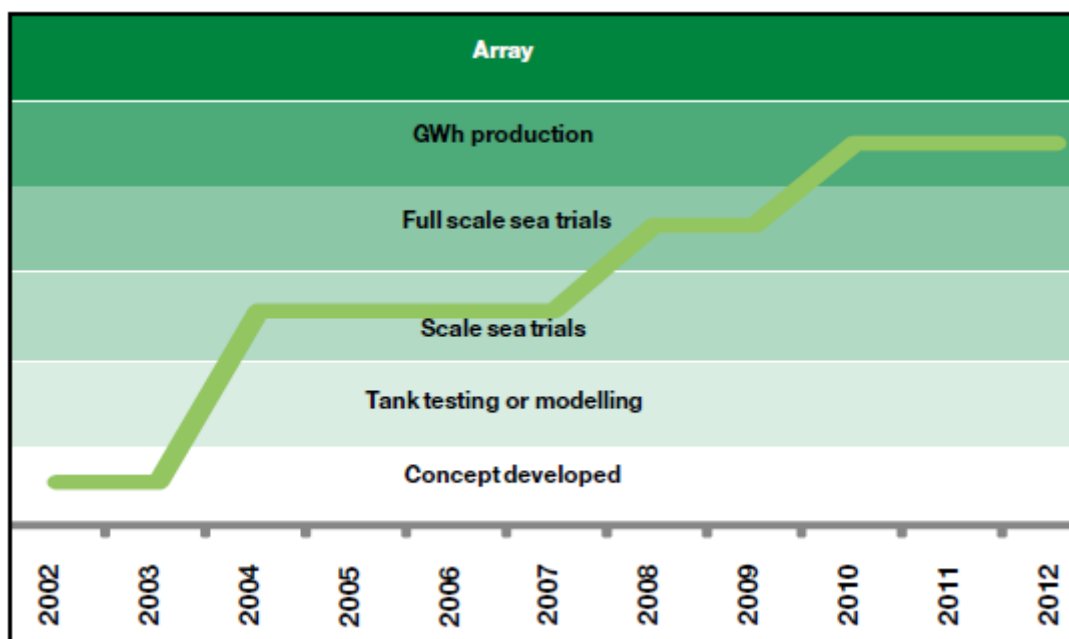
Desde la instalación del SeaGen en 2008 ha sufrido numerosas modificaciones, la más reciente es la sustitución del tren elevador de las turbinas por el de segunda generación. En la actualidad se está esperando la implantación de estas turbinas en las localidades de *Skerries* (norte de Dublín) y *Kyle Rhea* (noroeste de Escocia). Para una futura mejora se está investigando en un nuevo sistema de soporte para los rotores.



En el gráfico siguiente podemos observar la progresión de este proyecto a lo largo de los años. Vemos que el desarrollo del concepto empieza en 2002, los estudios y pruebas tanto en tanques cerrados, como en el mar a escala y a tamaño real tiene una duración de hasta 6

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

años, y que finalmente, su implantación y funcionamiento no es hasta el 2010. Esto quiere decir que para este proyecto desde sus fases iniciales hasta su funcionamiento final han pasado 8 años.



1.3.2. OPEN-CENTRE TURBINE

Esta turbina es del tipo de rotores con carcasa exterior de la empresa OpenHydro con una potencia unitaria de 0,3MW.

- Descripción

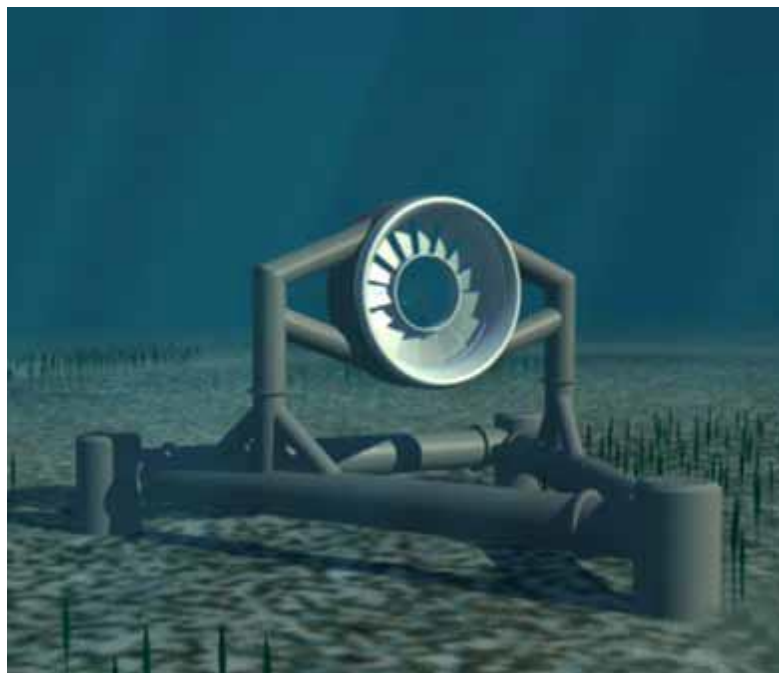
El Open-Centre es una turbina apoyada en el lecho marino consistente de un rotor, carcasa, estator y generador. El rotor tiene la peculiaridad de que es un serie de álabes dispuestos de manera casi continua dejando un hueco central, donde en teoría debería de ir el núcleo, esto tiene como objetivo dejar pasar la vida animal a través del rotor y minimizar los impactos ambientales respecto a los animales marinos. El flujo de agua de la corriente marina pasa a través de la carcasa que provoca un efecto Venturi que acelera el fluido moviendo la turbina.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

En este tipo de artefactos la única pieza móvil es el mismo rotor, teniendo un generador magnético alojado en la carcasa alrededor del rotor. Este artefacto está diseñado para poder escalar la potencia de salida sin la utilización de caja de engranajes, lo cual reduce notablemente el número total de componentes.

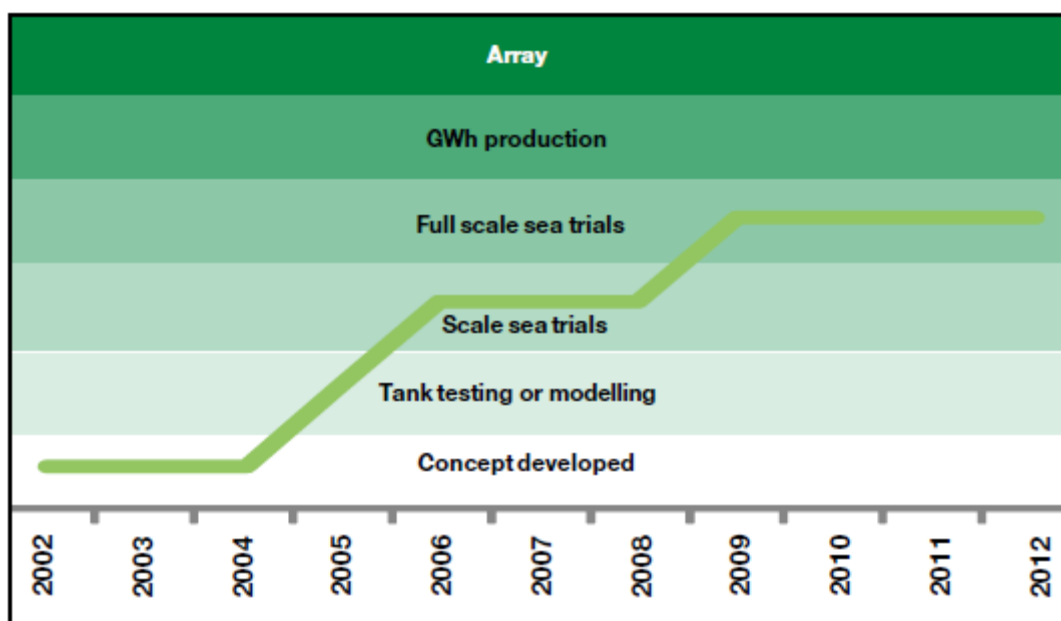
- Estado

En 2006 las turbinas Open-Centre fueron instaladas en el lecho marino de las instalaciones de la EMEC y en 2008 se instaló la segunda unidad de este tipo de turbinas. OpenHydro ha instalado también turbinas en Canadá otorgando 1MW con un artefacto de 10m de diámetro, y tienen planeado instalar unas turbinas de 16m de diámetro en *Brittany* a lo largo del 2012.



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Este proyecto se inició en el 2002 y hasta el 2006 no se vieron los primeros prototipos en el mar, en este momento y desde 2009 está en fase de pruebas a escala real del artefacto. Este proyecto lleva en marcha desde 2002 y aún no se ha llegado al estado de comercialización.



1.3.3. AR1000

Esta turbina es de eje horizontal desarrollada por Atlantis Resources Corporation con una potencia de hasta un 1MW.

- Descripción

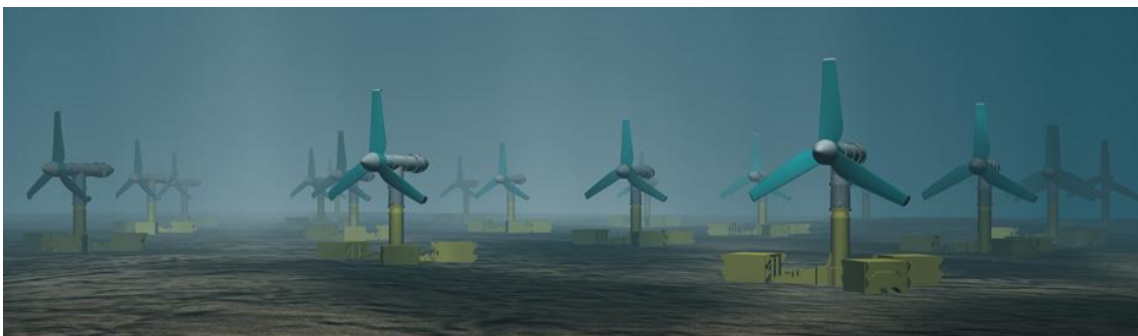
El AR1000 es una turbina de eje horizontal de 3 palas sin mecanismo para la orientación de las palas y con un sistema de viraje del artefacto para orientarlo en función de la dirección del flujo de la corriente. Posee un generador magnético permanente. La energía extraída es evacuada mediante cables de hasta 3,8kV a una subestación en tierra. El AR1000 está diseñado para obtener la potencia nominal con velocidades de flujo de 2,65m/s. Atlantis aboga por un sistema de instalación lo más simple posible para evitar potenciales puntos de

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

fallo, por eso ha ideado un sistema de anclaje al lecho marino que consiste en que la estructura del fondo se instala primero y posteriormente se ancla la turbina a esta estructura con un sistema simple de hembra/macho con el fin de agilizar la instalación o la posterior sustitución de la turbina.

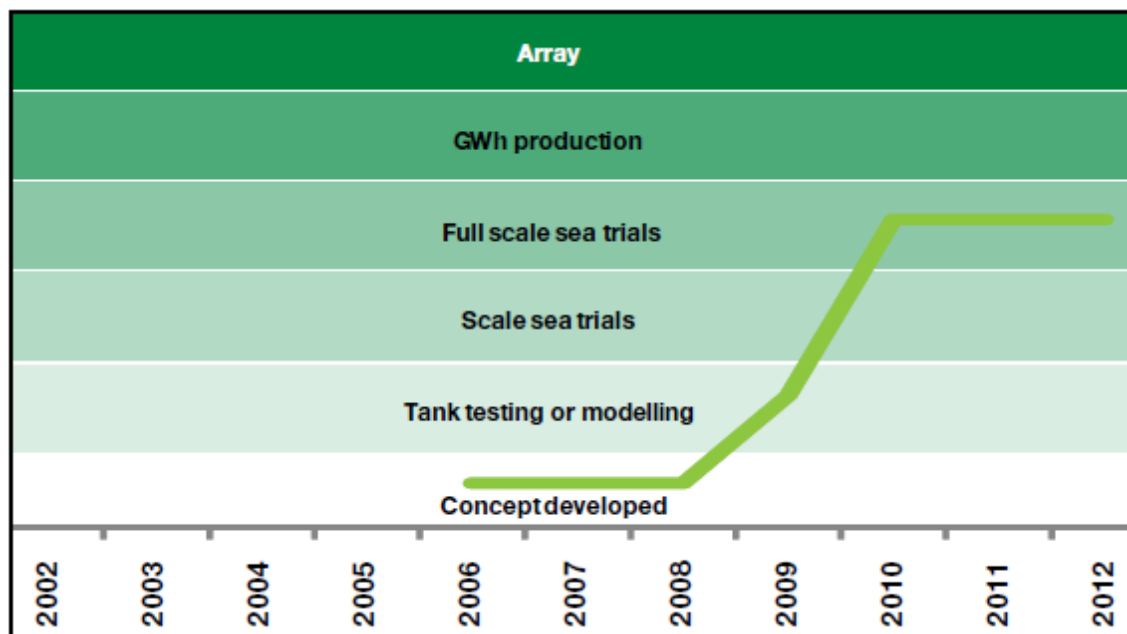
- Estado

Después de la instalación satisfactoria del AK1000 (turbina de eje horizontal de 2 rotores) en 2010 se decidió instalar en el verano del 2011 el modelo AR1000 y realizar las pruebas necesarias en el centro nacional de energías renovables de Reino Unido (Narec –*National Renewable Center* [4]). El paso siguiente a seguir es trasladar la turbina al centro EMEC a lo largo del 2012 para empezar a producir energía eléctrica.



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

En el gráfico siguiente vemos la progresión del estado de la tecnología de estas turbinas, se están haciendo desde hace 2 años las pruebas a escala real, y a lo largo del 2012 se tiene previsto la instalación de la turbina para producir energía eléctrica.



1.3.4. HS1000

Esta turbina es de eje horizontal diseñada por Andritz Hydro Hammerfest con una potencia de 1MW.

- Descripción

La turbina HS1000 es una turbina de eje horizontal, de tres palas orientables instalada en la línea de la dirección del flujo de la corriente. La carcasa alberga la caja de engranajes, el generador asíncrono y los sistemas de control, el cable submarino es el encargado de evacuar la electricidad a tierra donde se encuentra el convertidor. La base de la estructura descansa por gravedad en el lecho marino.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

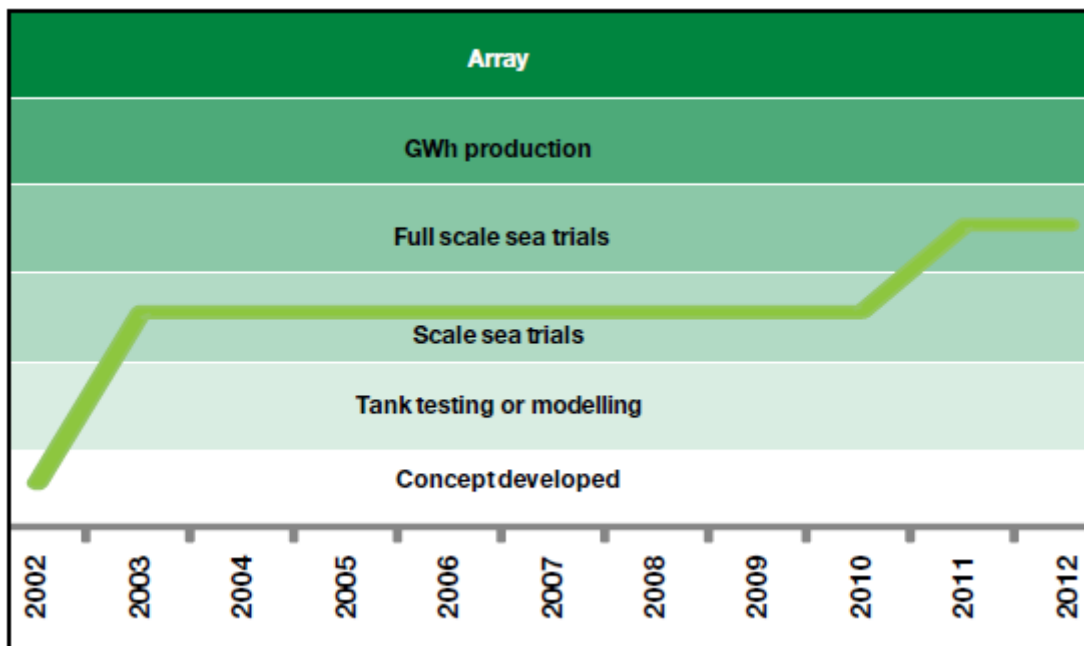
La turbina esta provista de numerosos instrumentos de medición con el fin de que en un futuro sea también una plataforma de actividades de investigación y desarrollo. Esto ayudará a mejorar la fiabilidad y el rendimiento de este tipo de artefactos y en un futuro ayudar a disminuir los costes de esta tecnología.

- Estado

El HS1000 es un artefacto en fase de pruebas a escala real y en fase pre-comercial basándose en el *Know How* de la turbina predecesora HS300 que está instalada y completamente probada y operando en buenas condiciones a escala de prototipo. La turbina HS1000 esta instalada en las inmediaciones de la EMEC donde esta a esperas del certificado de mediciones que será a lo largo del 2012. Se esta preparando en la isla de *Islay* una planta de 10MW (con los permisos presentados y otorgados) que empezará a construirse en 2013 con *ScottishPower Renewable*, también se hará una instalación en el norte escocés, en *Duncansby Head*, de una planta de hasta 95MW.



En el gráfico siguiente se ve que está turbina lleva 10 años en desarrollo, y en la actualidad aún esta en fase de pruebas a escala real, pero no tardará mucho tiempo en producir energía.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

1.3.5. VOITH HY TIDE 1000-16

Esta turbina es una turbina de eje horizontal elaborada por la empresa Voith Hydro Ocean Current Technologies con una potencia prevista de 1MW.

- Definición

Este artefacto es una turbina de eje horizontal de tres palas, instalada en el lecho marino para aprovechar los flujos de las corrientes marinas tanto a la subida de las mareas como a la bajada, no posee ni palas orientables y sistema de viraje de la turbina completa. No posee caja de engranajes y la generación de energía eléctrica correa a cargo de un ensamblaje magnético permanente. La turbina se lubrica gracias al agua marina.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Las condiciones ideales de esta turbina es el montaje sobre el lecho marino sobre pilotes cimentados a una profundidad de 30 metros como mínimo y una velocidad de corriente de como mínimo 3 m/s.

- Estado

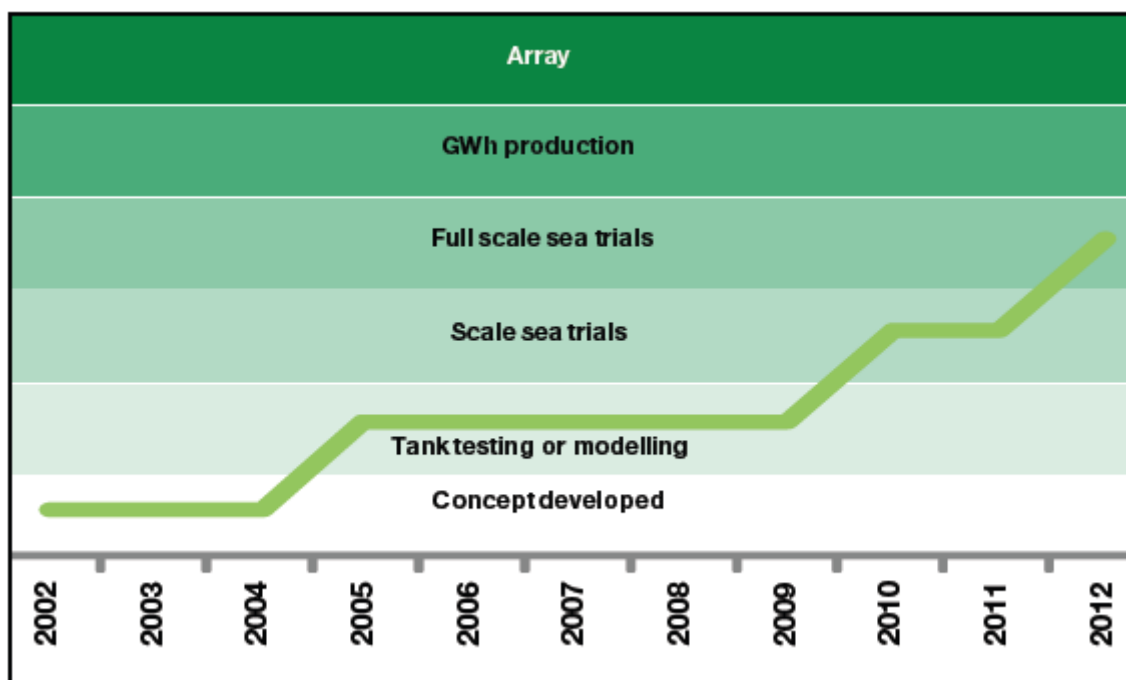
La primera turbina de este tipo que se instaló fue una turbina a escala 1:3 de 110kW de potencia, fue instalada en las aguas Surcoreanas. Está planeado que Voith Hydro Ocean Current Technologies instale una planta de próximamente 100MW en aguas de Corea del Sur cerca de *Jindo*.

En el verano del 2011 Voith Hydro junto a RWE Innogy completaron los preparatorios en la EMEC para poder trabajar con las turbinas en sus instalaciones con el fin de que en 2012 se pueda instalar una turbina a escala real y empiece un proceso de pruebas de tres años.



Es una tecnología que lleva 10 años desarrollándose y como mínimo le quedarán tres años más de pruebas con el modelo a escala real hasta que pueda generar electricidad de forma útil.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas



1.3.6. DEEP GEN IV

Esta turbina es de eje horizontal desarrollada por Tidal Generation Ltd con una potencia de 1MW.

- Definición

La turbina Deep Gen IV es de eje horizontal de tres palas orientables, la forma de extraer energía es que siempre se orienta mediante un mecanismo de viraje de cara a la corriente, cuando la marea sube se orienta en un sentido y cuando baja la marea se vira la turbina para que le incida de cara.

La góndola esta diseñada para que pueda flotar para que la turbina al completo, con la estructura de apoyo incluida, pueda ser remolcada hasta el emplazamiento elegido para su instalación. La estructura de soporte es una estructura ligera en forma de trípode que se ancla al lecho marino. El sistema de viraje está a popa de las palas. Una vez fijada la dirección

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

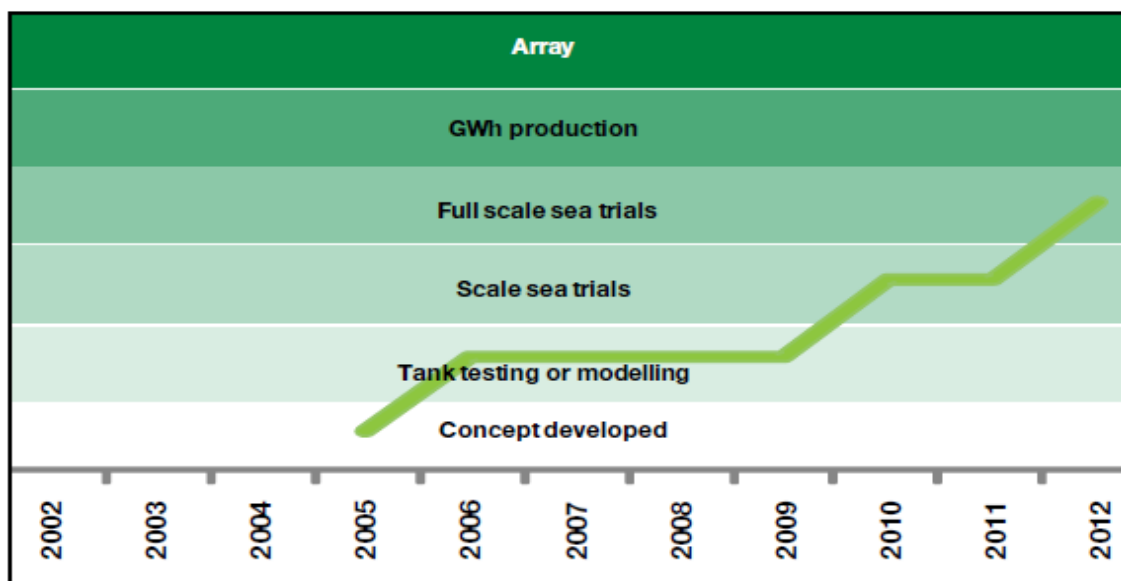
del flujo la turbina tiene una velocidad mínima de corte de 1m/s, su velocidad de diseño es de 2,7m/s. Para mayores velocidades entra en juego la orientación de las palas y el regulador de par del generador para así asegurar que se mantenga la potencia nominal de la turbina. Esta turbina posee también caja de engranajes.

- Estado

Deep Gen IV está actualmente en fase de pruebas a escala real proporcionando potencias de hasta 1MW, el cual será el producto base que ofrecerá a los clientes. Actualmente está acabándose de ensamblar en las instalaciones de Rolls-Royce en Edinburgo con la finalidad de que en verano del 2012 puede ser instalada y utilizada en las inmediaciones de la EMEC. TGL esta colaborando con otros desarrolladores (MeyGen) con la finalidad de poder abarcar proyectos a gran escala en los siguientes cinco años.



En el gráfico vemos que esta empresa lleva siete años desarrollando esta turbina, si la comparamos con otras, ha logrado en tres años menos estar al mismo nivel que sus competidores.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas**1.3.7. DELTASTREAM**

Turbinas de eje horizontal desarrolladas por Tidal Energy Ltd con una potencia de 1,2MW.

- Definición

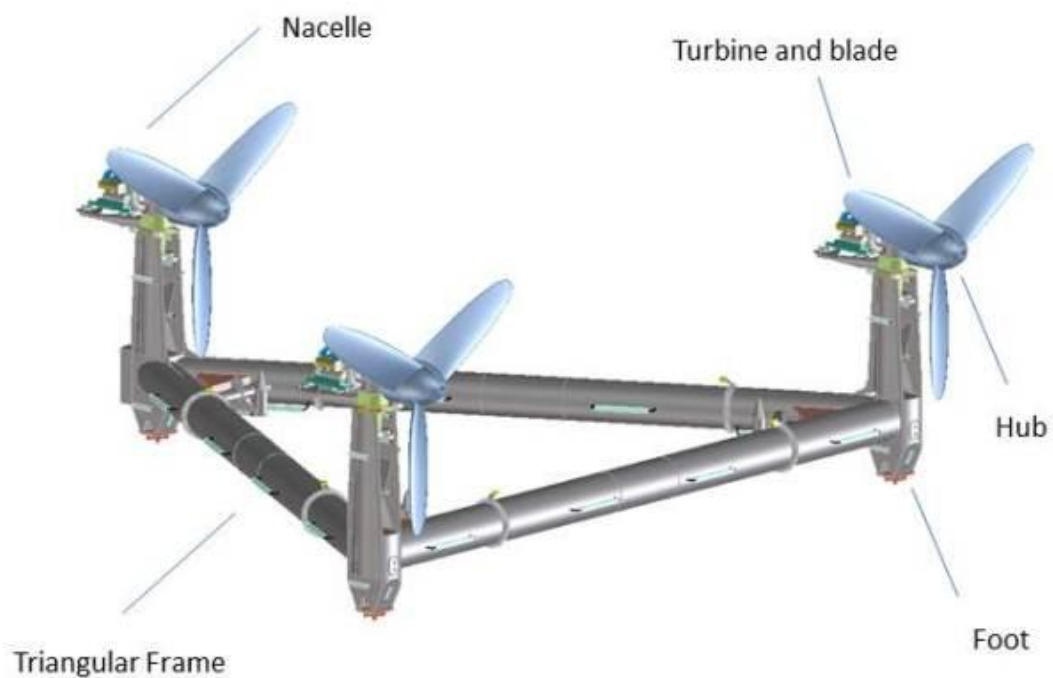
El artefacto DeltaStream consta de tres rotores de eje horizontal independientes instalados en una misma estructura que se instala en el lecho marino por gravedad, este tipo de estructuras permite la instalación en el lecho marino sin demasiadas tareas de adaptación del suelo para fijar la estructura.

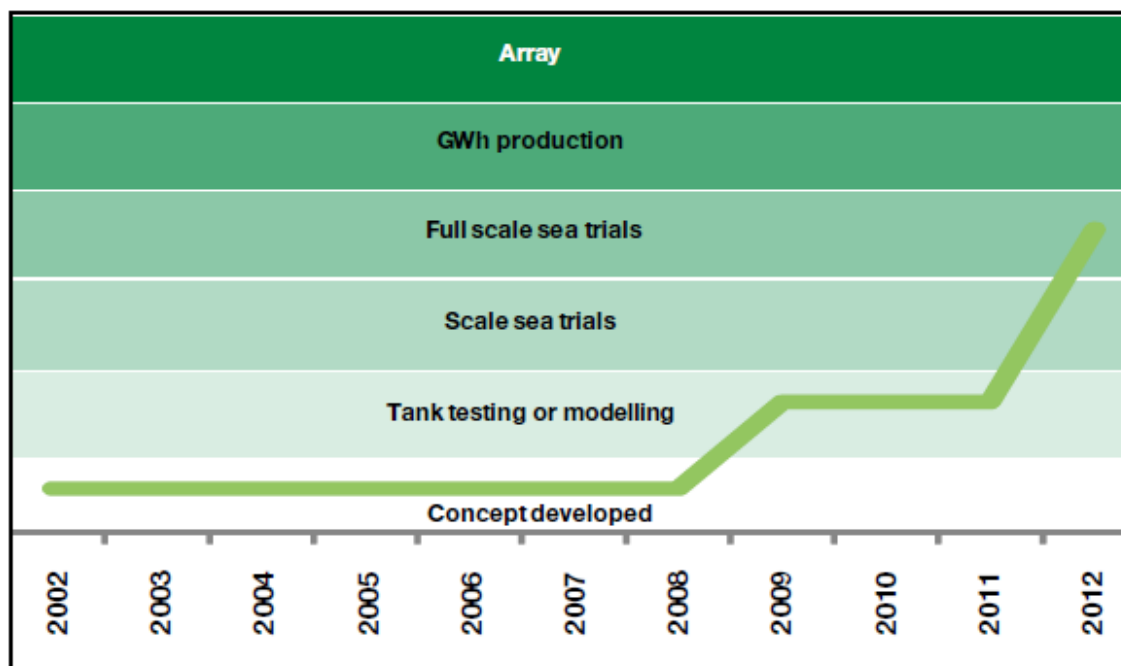
La estructura que sujeta las tres turbinas es una estructura de 350 toneladas y de una anchura de 36m de forma triangular, esta estructura tiene el centro de gravedad muy bajo que proporciona a la estructura de la rigidez y la estabilidad necesaria, además al poseer un centro de gravedad bajo evita el vuelco de la estructura y su deslizamiento. Cada turbina del artefacto tiene 3 palas y un sistema de viraje hidráulico para rotar a la turbina de cara a la corriente, tanto a la subida de las mareas como a la bajada.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

- Estado

El periodo de investigación y de las pruebas de modelos en tanques se hicieron en la universidad de *Cranfield*, para las pruebas a escala real se trasladarán a *Ramsay Sound* en *Pembrokeshire* en Diciembre de 2012. Las licencias para estas pruebas fueron otorgadas en Marzo del 2011 por la DECC (*Department of Energy & ClimateChange*) y el gobierno galés.



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

1.3.8. PULSE-STREAM 100

Este artefacto es del tipo de perfiles hidrodinámicos oscilantes diseñado por la empresa Pulse Tidal Ltd que proporciona una potencia de 100kW en su fase de pruebas con sistemas escalados.

- Definición

El Pulse-Stream es un artefacto del tipo hidrofoil, extrae la potencia de las corrientes marinas debidas a la subida y bajada de las mareas, estos hidrofoils se mueven de verticalmente con un movimiento oscilatorio de arriba abajo, este movimiento se transfiere mediante un cigüeñal a la caja de engranajes, de esta última va finalmente a al generador para producir energía eléctrica. La longitud de los perfiles, y en consecuencia la capacidad de

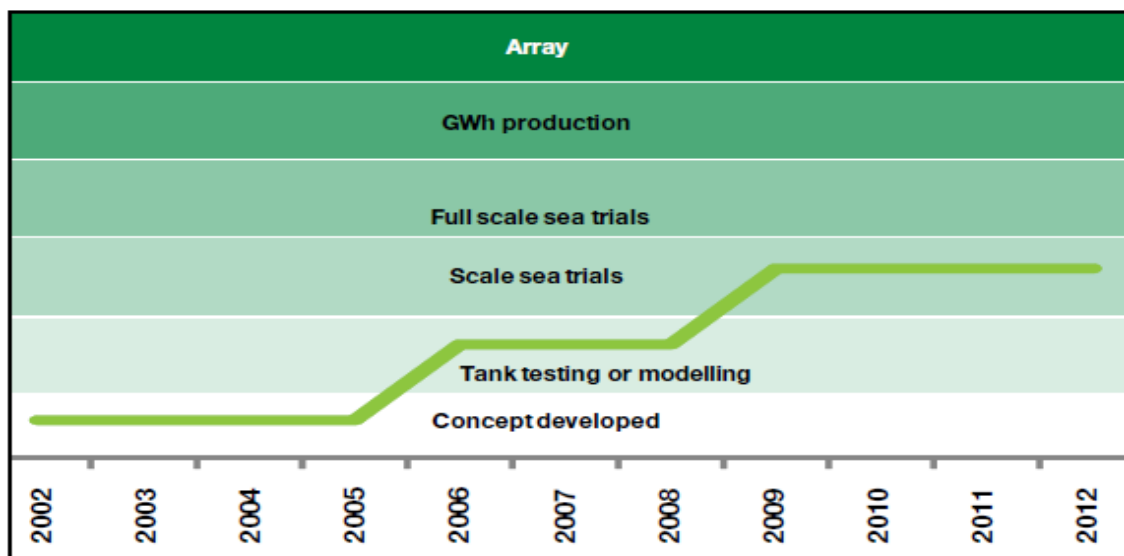
Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

generación de energía, va estrictamente ligado a la profundidad en la que operaremos con este artefacto, a una profundidad de 18m se podría llegar a producir hasta 1,2MW y si nos sumergimos hasta los 35m la producción puede alcanzar los 5MW. En cada sistema de anclaje al fondo se podrían instalar dos artefactos, haciendo una suma de hasta 10MW a 35m de profundidad de cada sistema. Este sistema se proyecta para que pueda salir a flote con facilidad para poder hacer labores de mantenimiento, observación y medición.

- Estado

El Pulse-Stream se encuentra actualmente en la fase de pruebas con prototipos a escala, esta fase de pruebas se realizan en *Humber* (estuario en el mar del norte, al norte de Reino Unido) desde 2009. Se están realizando pruebas de instalación, de producción y analizando los impactos medioambientales. El artefacto comercial irá provisto de una base flotante para su fácil transporte desde la costa, cuando se llegue al emplazamiento, este artefacto se conectará a unos cimientos prefabricados inundándolo. Para las labores de mantenimiento el "casco" se deslustra dejando que el artefacto vaya flotando hasta llegar a la superficie, las labores de mantenimiento se pueden realizar con cierta comodidad gracias a que la base puede flotar y posee una cierta estabilidad.

Los diseños preliminares del Pulse-Stream de 1,2MW ya están acabados, en la actualidad se están haciendo los diseños de detalle. El siguiente paso es la construcción e instalación del artefacto, y la realización de las pruebas y puesta a punto.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas**1.3.9. SR250**

Este artefacto consta de dos rotores de eje horizontal instalados en una base flotante, está desarrollado por Scotrenewable Tidal Power Ltd, proporcionando una potencia con el prototipo a escala de 250kW.

- Definición

El SR250 es una turbina flotante, su estructura principal consta de dos rotores contrarrotativos de eje horizontal instalados a una estructura flotante en forma de cilindro, los rotores van instalados en dos brazos plegables. Los rotores absorben la energía cinética de las corrientes y las transforman en electricidad mediante un sistema PTO (power take-off). El

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

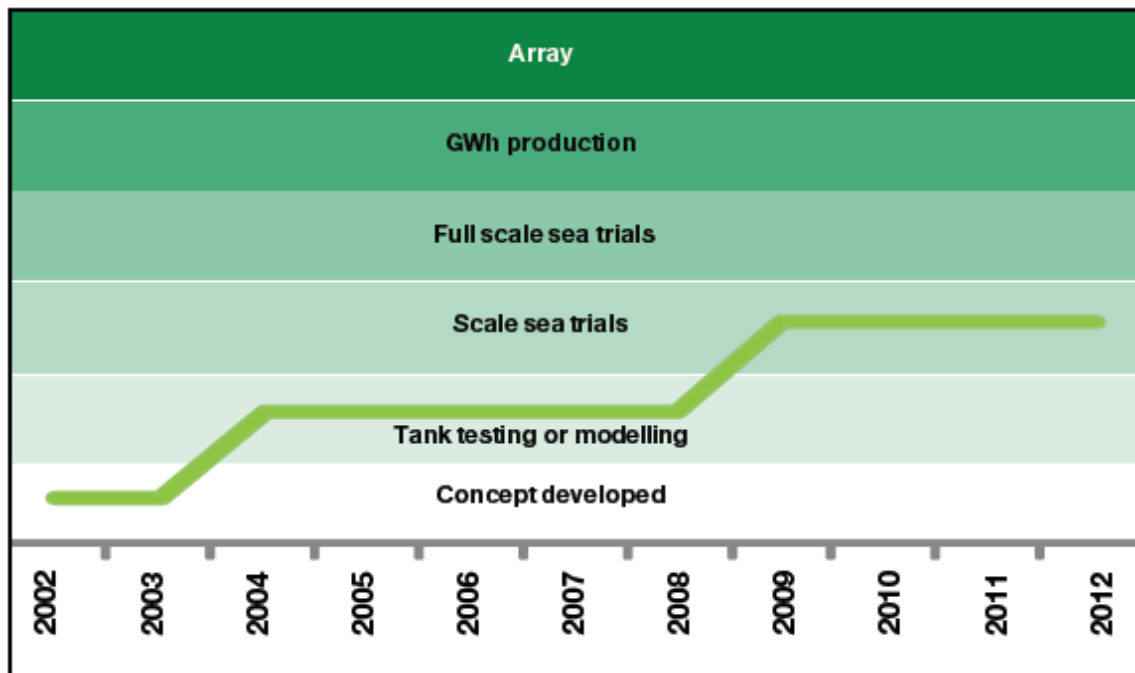
sistema tiene dos configuraciones; una es la operacional, con los dos brazos desplegados para generar potencia; y la configuración de transporte y supervivencia, con los brazos retraídos para evitar el aumento de la resistencia al ser arrastrado o reducir las cargas cuando el estado del mar sea peligroso. Este sistema se ha proyectado para que pueda ser instalado, operado y mantenido con un buque multipropósito, evitando así buques especializados evitando el aumento del coste de la instalación. El SR250 también se puede utilizar con las corrientes de los ríos.

- Estado

El SR250 fue botado en *Orkney* en marzo del 2011, y en la actualidad está ubicando en las inmediaciones de la EMEC en *Fall of Warness* realizándose el periodo de pruebas de 24 meses. Está planeado conectarlo a la red a lo largo del verano del 2012.

La siguiente generación de este artefacto es una sistema con el mismo principio de 2MW, el diseño está completado y se está buscando emplazamiento para su fabricación, es espera poder empezar en el 2012 a desarrollar la actividad.



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

1.3.10. DEEP GREEN

Este artefacto se engloba dentro del grupo de tidal kite desarrollado por la empresa Minesto, actualmente está en fase de pruebas en un tanque cerrado, la previsión de la potencia que se puede obtener es de 500kW.

- Definición

Este artefacto consta de una turbina sin engranajes instalada bajo un ala hidrodinámica, con “timones” y el sistema de servos instalados en la parte posterior del sistema. El artefacto está amarrado a una estructura que está instalada en el lecho marino, el cable que sujeta al artefacto es a su vez el cable de transporte eléctrico. El ala provoca la sustentación necesaria

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

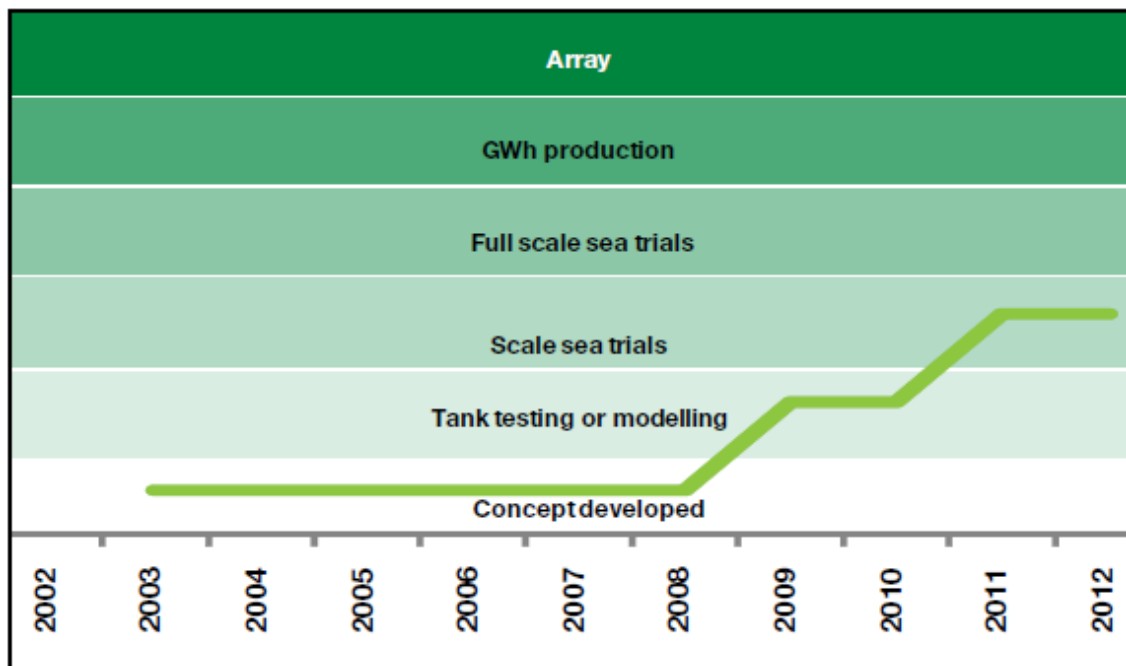
para que el sistema se mueva a velocidades de hasta diez veces la velocidad de la corriente en un instante determinado, el sistema de timones permite que el artefacto describa una trayectoria en forma de ochos acelerándose en los momentos de “bajada” proporcionando las altas velocidades.

Este proyecto está diseñado para que en lugares de baja velocidad de corrientes y mucha profundidad puedan ser rentables.

- Estado

Actualmente se encuentra en fase de pruebas en un tanque cerrado en las instalaciones de *Strangford Lough*, el prototipo está a una escala de 1:10 y es el precursor de un nuevo modelo a escala 1:3, el modelo a escala real está diseñado para que otorgue una potencia de 500kW. Recientemente este proyecto ha recibido una subvención por parte de la agencia de energía Sueca de alrededor de 630.000€ para seguir con las investigaciones.



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

1.3.11. BELUGA9

Esta turbina es del tipo horizontal con una carcasa exterior produciendo un efecto de aceleración del fluido (efecto Venturi), está desarrollada por Alstom Hydro y se espera obtener 1MW de potencia por cada unidad.

- Definición

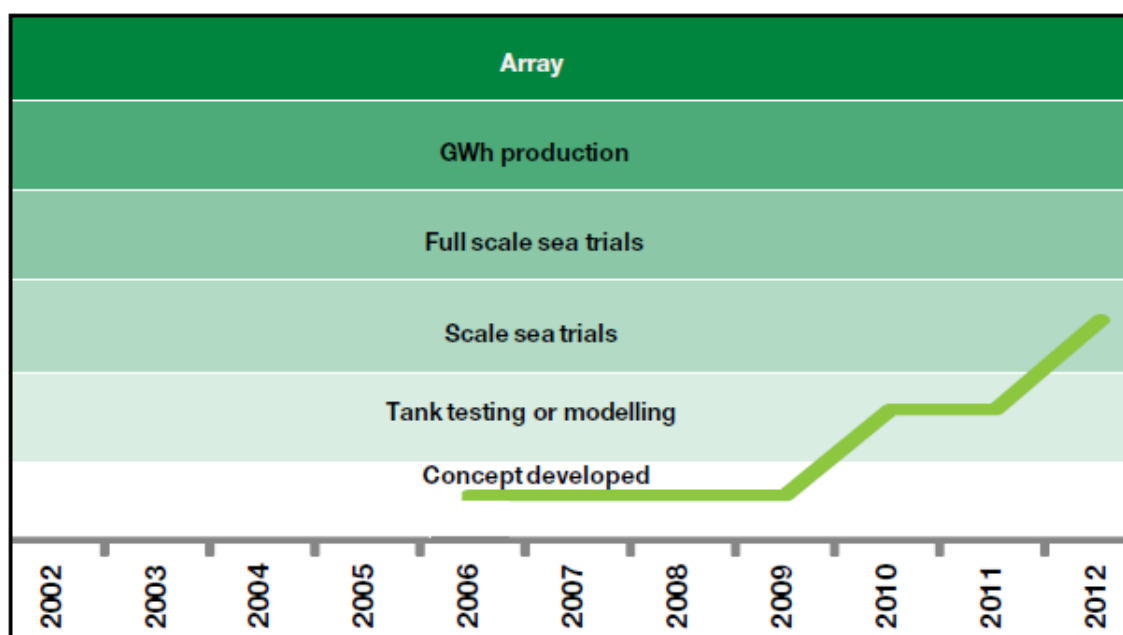
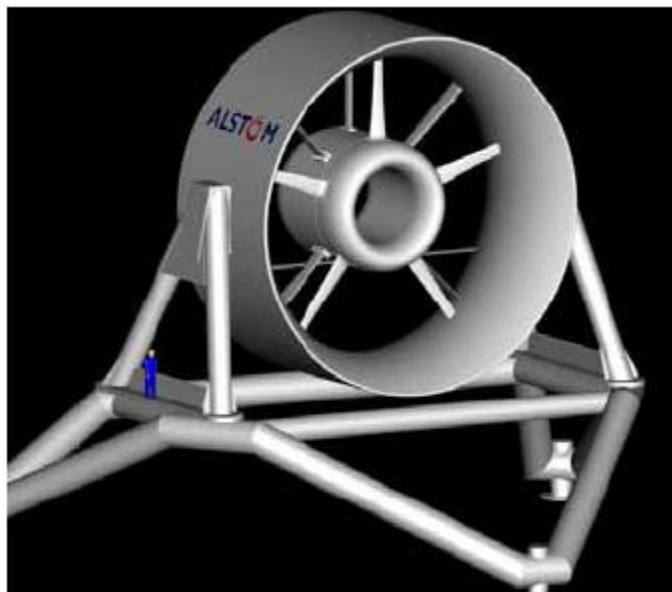
El Beluga9 está diseñado para operar con las corrientes marinas provocadas por las mareas, por eso es una turbina de operación bidireccional. Posee un generador de imán permanente

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

y el rotor es de álabes orientables albergados dentro de una carcasa que produce el efecto Venturi, esta carcasa controla los efectos de la turbulencia y acelera el fluido que pasa a través del rotor otorgando un mayor rendimiento. El artefacto se ha diseñado con el menor número de piezas móviles posibles para reducir considerablemente las labores de mantenimiento. El centro de esta turbina está provista de un orificio para que la fauna marina pueda pasar a través de dicho orificio y así minimizar el impacto ambiental que podría surgir. Este artefacto tiene una altura de 20m y un diámetro de 13m instalado en el lecho marino con un sistema de anclaje por gravedad o pilotes, dependiendo de las características del fondo. Está diseñada para que en un rango de entre 3,5 y 4m/s a 30m de profundidad proporcione una potencia de 1MW.

- Estado

Esta en fase de pruebas a escala real en un tanque cerrado en las instalaciones de *Bay of Fundy*, las pruebas se realizan con un flujo unidireccional. Se desarrollará una variante del Beluga9, el Orca7 se desarrollará para una velocidad de flujo de 3,5m/s a una profundidad de 40m. Se espera que las pruebas a escala real del Orca7 se puedan realizar en *Brittany* a lo largo del 2013.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas**1.3.12. KAWASAKI 1MW TIDAL TURBINE**

Esta turbina es de eje horizontal desarrollada por Kawasaki Heavy Industries con una potencia diseñada de 1MW.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

- Definición

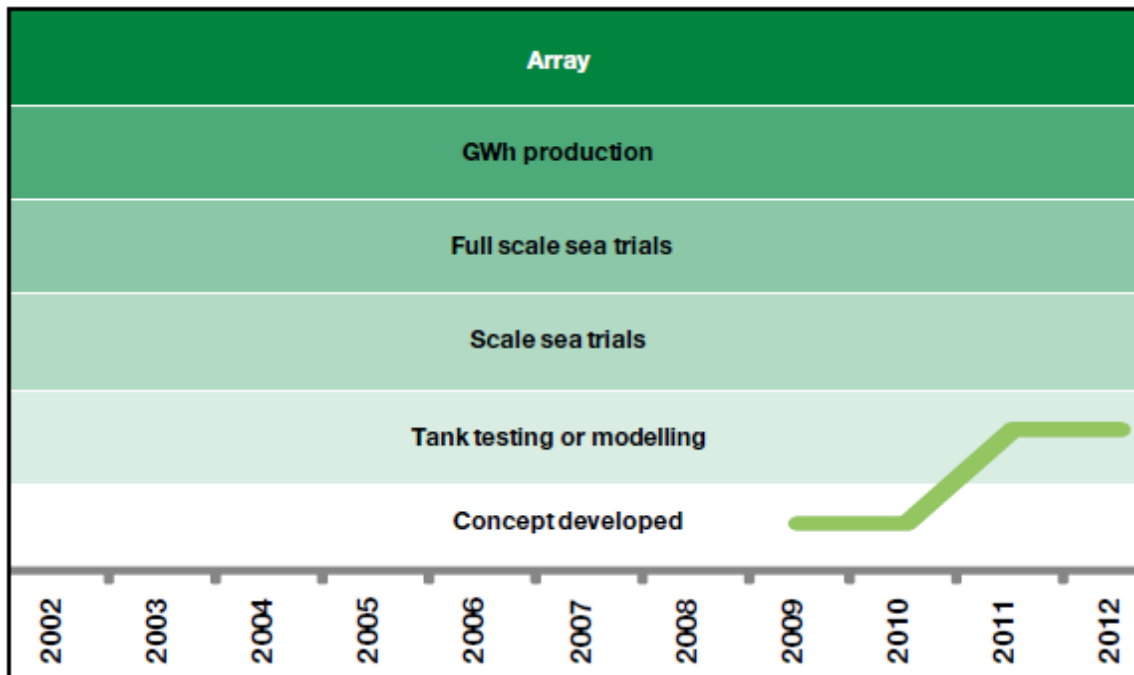
Es una turbina de eje horizontal de 1MW de potencia instalada sobre el lecho marino por gravedad con un sistema PTO (*power take-off*) a través de una caja de engranajes y combinado con un generador de imán permanente. La turbina activa el sistema de palas orientables y de viraje del artefacto para obtener en cada comento la máxima potencia posible, tanto en la subida de las mareas como en la bajada.

- Estado

KHI probará el prototipo a escala real de 1MW en las instalaciones de la EMEC a lo largo del 2013. Una vez que se obtengan los resultados esperados se iniciará la fase de comercialización e instalación de plantas de generadores eléctricos mediante corrientes marinas en Gran Bretaña y en otros emplazamientos del globo terráqueo.



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

2. PRINCIPIOS DE LAS CORRIENTES MARINAS.

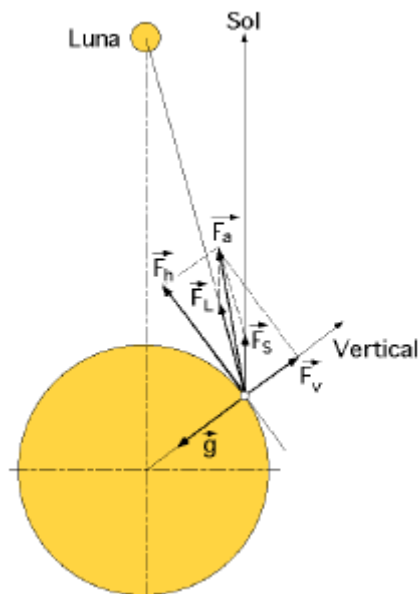
Según Pedro Fernández Díez [5], la marea es la fluctuación periódica del nivel de los océanos, debida principalmente a la atracción gravitatoria de la Luna y en menor cuantía del Sol, (la Luna ejerce una atracción 2,2 veces la del Sol), y al movimiento de rotación de la Tierra, (aceleración de Coriolis); otros factores son la forma y fisionomía del relieve de las costas y del fondo, los fenómenos meteorológicos, etc.

La aceleración que produce el efecto de marea aumenta con la masa y disminuye con el cubo de la distancia. Con relación a la Tierra, y teniendo en cuenta las distancias y las masas, sólo el Sol y la Luna son capaces de producir mareas apreciables; el Sol, más distante, influye por su masa; la Luna, de masa mucho menor, por su proximidad a la Tierra.

La masa del Sol es del orden de 27 millones la de la Luna, pero se encuentra 390 veces más lejos, por lo que su contribución a la marea es 0,45 veces la contribución lunar.

El fenómeno es prácticamente idéntico, tanto si el punto sometido a la acción de la marea, se encuentra orientado hacia el astro, como si se encuentra en la parte opuesta.

La intensidad de la fuerza generadora de la marea F_a , lunar F_L o solar F_S , es pequeña, del orden de 10^{-7} veces la fuerza de gravitación:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

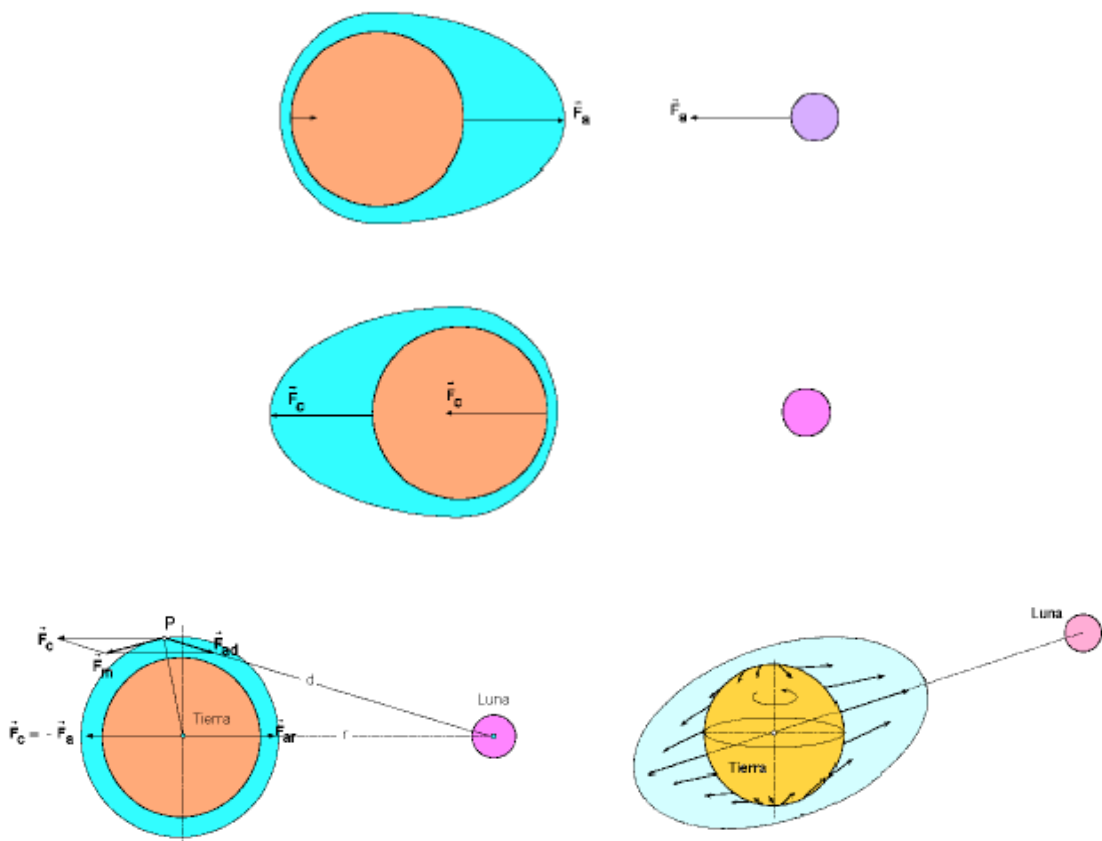
Para justificar los desplazamientos de importantes masas de agua, la fuerza de atracción F_a , (que no sigue la vertical), se puede descomponer en dos, una vertical F_v que influye muy poco en la gravedad, del orden de 10^{-7} , mientras que la componente horizontal F_h es comparable a otras fuerzas horizontales como el gradiente horizontal de las aguas de diferente densidad, la acción del viento o la aceleración de Coriolis, distinguiéndose de éstas en que actúa sobre grandes distancias horizontales, en profundidad, provocando el desplazamiento de masas de agua de un hemisferio a otro, produciendo acumulaciones y sustracciones de agua y, por consiguiente, las elevaciones y depresiones del nivel del mar. Como la cantidad de agua del mar es constante, a esta elevación corresponderán descensos en lugares situados a 90° de diferencia en longitud.

La fuerza centrífuga originada por el movimiento de rotación de la Tierra al recorrer su órbita alrededor del cdg del sistema Tierra-astro es la misma en cualquier punto del planeta, ya que no depende de la distancia.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

La fuerza centrífuga aumenta la altura del nivel del mar que está más lejos de la Luna, al tiempo que desciende el nivel del mar en la parte contraria.

La causa de las mareas deriva de la aplicación de las dos fuerzas, atractiva y centrífuga, que en el cdg de la Tierra se neutralizan, es decir, la atracción de la Luna queda compensada por la fuerza centrífuga engendrada por la revolución en torno al centro de gravedad del sistema Tierra-Luna, ya que de no ser así, la atracción provocaría un acercamiento progresivo entre ellas.



En un punto cualquiera de la superficie terrestre, cuando el astro está por encima del horizonte, la fuerza atractiva por él ejercida es más fuerte que cuando está por debajo del

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

horizonte, en que es la fuerza centrífuga la que predomina. Si la Tierra no girara alrededor de su eje, las mareas serían estáticas.

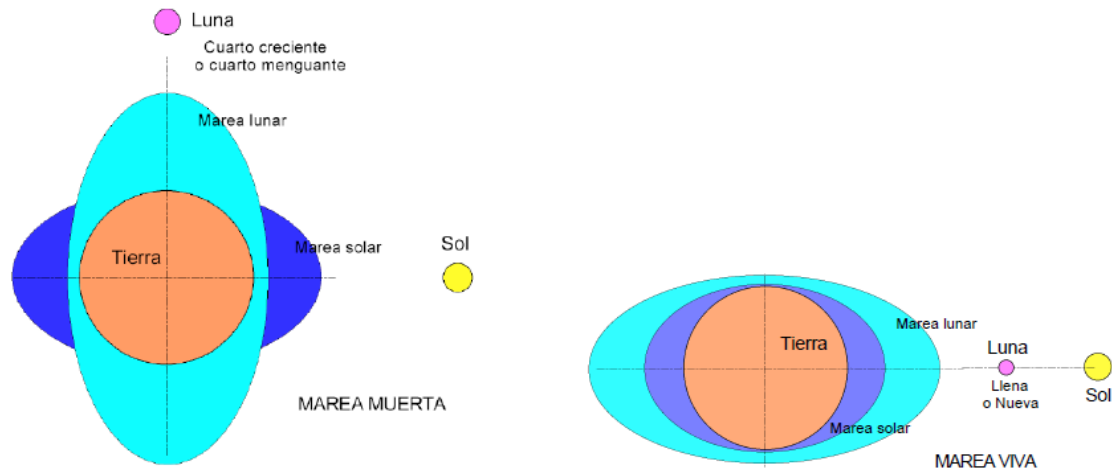
Gracias a la rotación de la Tierra se obtienen, en cada punto del océano, cada día, dos pleamares y dos bajamares, lo que se conoce como marea de tipo semidiurno.

Cuando el punto esté situado en una latitud importante y el ángulo que forma el astro atractivo con el plano del Ecuador es igualmente elevado, el astro no alcanza el horizonte, lo que implica la pérdida de una pleamar y una bajamar por día, es decir sólo hay una pleamar y una bajamar al día, lo que se conoce como marea de tipo diurno.

Las mareas son las ondas más largas del océano, con períodos del orden de 12 a 24 horas y longitudes de onda comparables con la longitud de la circunferencia terrestre en el Ecuador.

Si el punto superficial (o las masas de agua) está frente al astro la atracción sobre dicho punto será mayor que la experimentada por el centro de la Tierra, es decir, la atracción predomina sobre la fuerza centrífuga, estando dirigida la fuerza hacia el astro.

Si el punto superficial se encuentra en la parte opuesta, la atracción sobre el mismo es inferior a la atracción sobre el centro y, por tanto, predomina la fuerza centrífuga, estando sometido a una fuerza que le impulsa en sentido contrario al astro. Esto viene relacionado con el hecho de que en estos puntos, el astro (principalmente la Luna) no es capaz de generar una fuerza centrípeta suficiente para mantener las masas de agua en una órbita con velocidad igual a la del centro de la Tierra, por lo que se presenta un defecto de aceleración respecto al centro de la Tierra que hace que las masas de agua tiendan a quedarse rezagadas respecto a éste, provocando un efecto equivalente al de una pequeña aceleración que trataría de expulsar el agua al lado opuesto al que se encuentra el astro.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

En ambos casos el punto (o las masas de agua), tiende a alejarse de la Tierra.

Las mareas están sometidas a una fluctuación rítmica de su nivel y a una fluctuación en forma de corrientes, como son:

- La corriente que acompaña a la llegada de la pleamar, máxima elevación, que se conoce como flujo
- La corriente que acompaña a la aparición de la bajamar, mínima elevación, que se conoce como refluo y es más breve en tiempo que la primera.

Cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineados, las mareas son mayores, y se conocen como mareas vivas o mareas de sicigias; si estos astros forman un ángulo de 90° las mareas son más reducidas y se conocen como mareas muertas.

La amplitud de una marea es extremadamente variable de un litoral marítimo a otro, no siendo la misma en todos los lugares; nula en algunos mares interiores, como en el Mar Negro, entre Rusia y Turquía; de escaso valor en el Mediterráneo, en el que sólo alcanza entre 20 y 40 centímetros, al igual que en el océano Pacífico; por el contrario, se amplifica y alcanza valores notables en determinadas zonas en donde la profundidad del mar es pequeña, o la costa tiene una escasa inclinación, o una configuración que origina una

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

interferencia por las costas, o existen fenómenos de resonancia como sucede en algunas bahías en las que el agua puede subir su nivel varios metros debido a que el tiempo de vaciado y llenado de las mismas coincide con el período de la marea, etc.

Es en el océano Atlántico donde se registran las mareas mayores. Así en la costa meridional atlántica de Argentina, en la provincia de Santa Cruz, alcanza una amplitud de 14 m. Pero aún es mayor en otras zonas, como en las bahías del Fundy (amplitudes medias superiores a los 15 m en Minas Basin y 13,6 m en Frobisher, Canadá), y en algunos lugares de las costas europeas de la Gran Bretaña (estuario del Severn 13,6 m), y de Francia en las bahías de Mont-Saint-Michel (12,7 m) y el estuario del Rance (13,5 m). Dentro del estudio de mareas existen los llamados puntos anfidrómicos, que son aquellos en los que la amplitud de la marea es nula, mientras que las corrientes de marea son máximas.

El período de una marea es el tiempo que media entre dos pleamares o dos bajamares sucesivas. La marea evoluciona, en general, por la superposición de ondas diurnas y semidiurnas que adquieren amplitudes máximas o mínimas a intervalos de 14,8 días, aproximadamente.

La acción de las fuerzas atractivas se transmite mediante ondas que se propagan de formas diversas según la profundidad y según las diversas reflexiones sobre las costas continentales, de manera que se producen una serie de interferencias que pueden ser constructivas o destructivas, lo que explica la existencia de las mareas diurnas y semidiurnas.

Las ondas semidiurnas están influenciadas por la componente lunar, que tiene un período de 12,42 horas y la solar de 12 horas, por lo que entre ambas existe una diferencia de período de 25,25 minutos lo que implica un retraso entre ambas ondas de 50,5 minutos al día, o un retraso de 6,23 horas cada 7,4 días, lo que equivale al semiperíodo de la onda, es decir, cada

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

7,4 días las dos ondas están en concordancia de fase y sus acciones se suman, mientras que al cabo de otros 7,4 días se encuentran en oposición, deduciéndose de esto la evolución característica de la oscilación semidiurna que consta de grupos que se alternan con amplitudes variables entre un máximo y un mínimo cada 7,4 días. A esto habría que añadir la influencia de la órbita lunar, elíptica, (que origina una onda elíptica lunar) de forma que cada 13,75 días la Luna se encuentra más cerca o más lejos de la Tierra, provocando un exceso o un defecto de atracción que modifica la evolución prevista con la composición de las ondas anteriores. Se ha observado que las ondas semidiurnas son más acusadas cuando la Luna y el Sol están más próximos al Ecuador.

Las ondas diurnas están influenciadas por otras componentes, como la lunar diurna con un período de 25,82 horas, la solar diurna (24,07 h) y la onda de declinación mixta Luna-Sol (23,93 h), que se interfieren entre sí formando la evolución característica del grupo de estas ondas. Las ondas diurnas son máximas cuando la declinación lunar tiene un valor extremo y mínimas cuando la Luna está en el Ecuador; tienen amplitudes máximas en los solsticios y en los equinoccios.

La onda total, superposición de las anteriores, confiere a las oscilaciones del nivel marino una evolución característica oscilante más o menos regular, compuesta frecuentemente por dos pleamares y dos bajamares al día, cuya amplitud varía con un período de 14,8 días aproximadamente; sin embargo existen lugares en los que las mareas varían en forma diferente, con períodos de hasta 24 horas, o con períodos de 5 horas.

En las mareas mixtas, la onda semidiurna puede predominar en las sicigias, mientras que en las cuadraturas predomina la onda diurna. La amplitud máxima se produce poco después de

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

la fase de Luna nueva o luna llena (sicigias), y la mínima poco después de los cuartos creciente y menguante (cuadraturas).

En algunos mares predominan las ondas de carácter semidiurno, (las dos mareas diarias tienen prácticamente la misma amplitud), presentándose las más importantes en las costas europeas y africanas del Atlántico, en América del Sur desde Venezuela a Brasil, en parte de América del Norte, golfo de Bengala, etc., mientras que las de carácter diurno (se da una sola pleamar y una sola bajamar al día), son más débiles (mar de Okhost, extremo sudoeste de Australia, golfo de México) con amplitudes máximas de 11,5 m. En casi todos los lugares restantes las mareas son mixtas.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

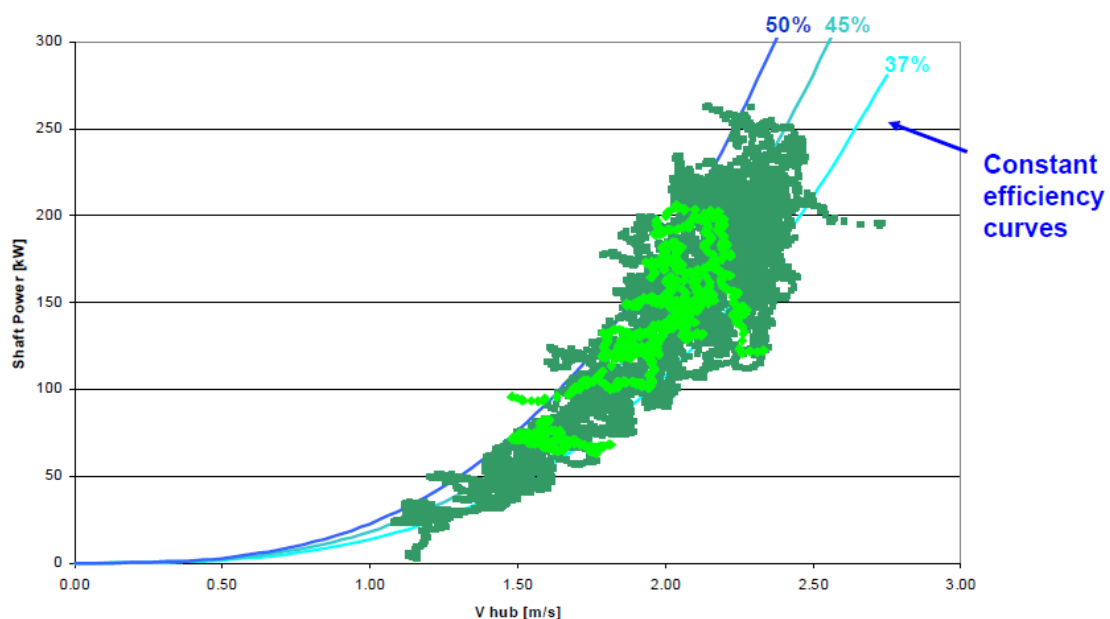
3. EMPLAZAMIENTOS POTENCIALES PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE TURBINAS DE CORRIENTES MARINAS

Las localizaciones que se están empleando actualmente para el estudio de la eficiencia de las turbinas han sido escogidas escrupulosamente, no solo por una velocidad de corriente aceptable sino también, por la proximidad a la costa y la profundidad.

En la referencia [6] se muestra unas imágenes del litoral de Gran Bretaña donde se puede apreciar las velocidades de corrientes marinas.

En la referencia [7] de Pedro Fernández Díez, describe que se hicieron pruebas con un artefacto denominado SeaFlow que podía llegar a producir 300kW con una velocidad de corriente de 2,5 m/s y 11 metros de diámetro del rotor, situado en una localidad cercana a *Cardiff*, Reino Unido.

En la referencia [8] se muestra un gráfico que relaciona la velocidad de corriente con la potencia obtenida de SeaFlow de las medidas obtenidas durante la investigación.



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

En esta gráfica se muestra varias curvas que describen las medidas realizadas con diferentes escenarios de eficiencia.

Se demuestra a continuación con las ecuaciones descritas en [13] la potencia máxima que la turbina puede recibir de la vena fluida:

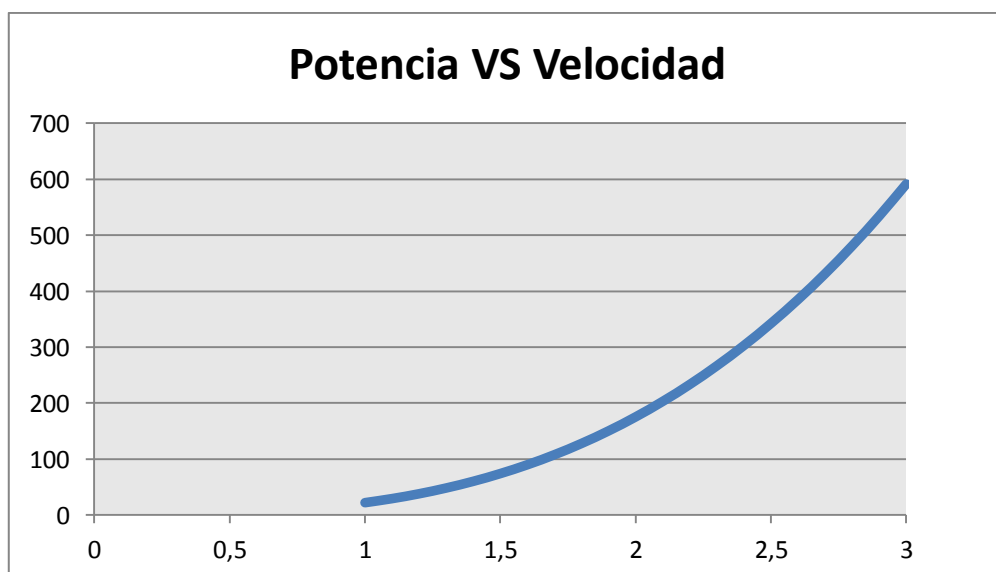
$$W_M = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) V}{75} \quad (CV)$$

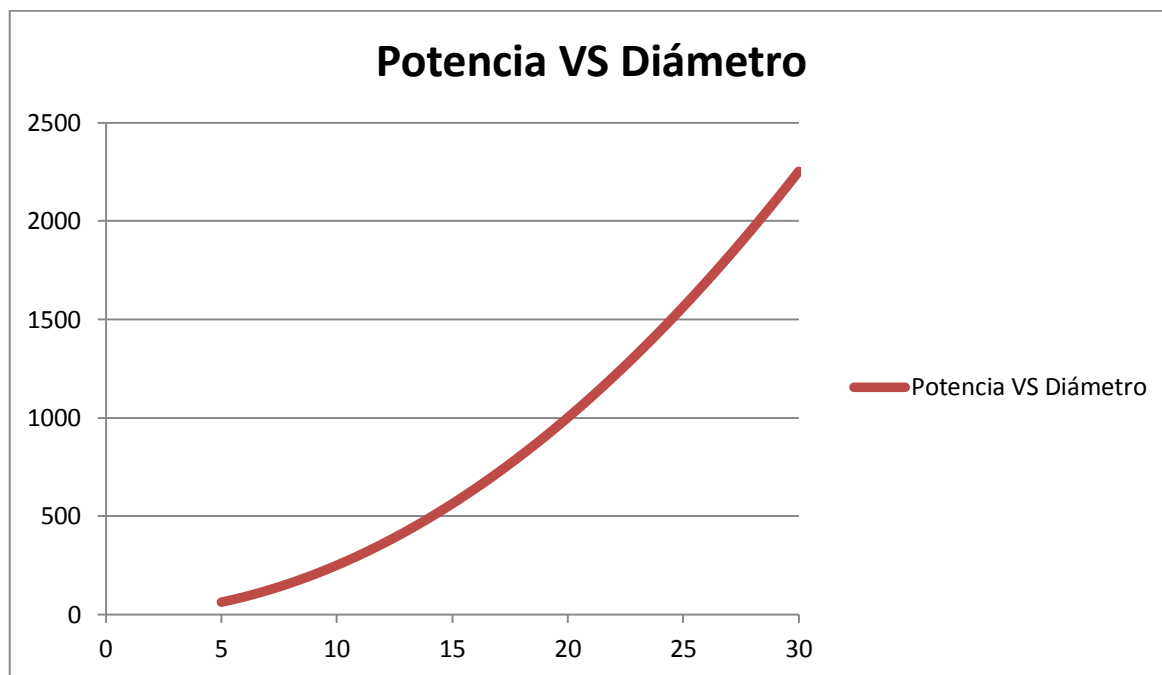
y

$$W_A = K \cdot W_M \cdot 0,735 \quad (kW)$$

Donde ρ es la densidad del agua, V la velocidad de la corriente marina, D el diámetro del rotor, W_A es la potencia real obtenida y K es el factor de obstrucción de la vena fluida.

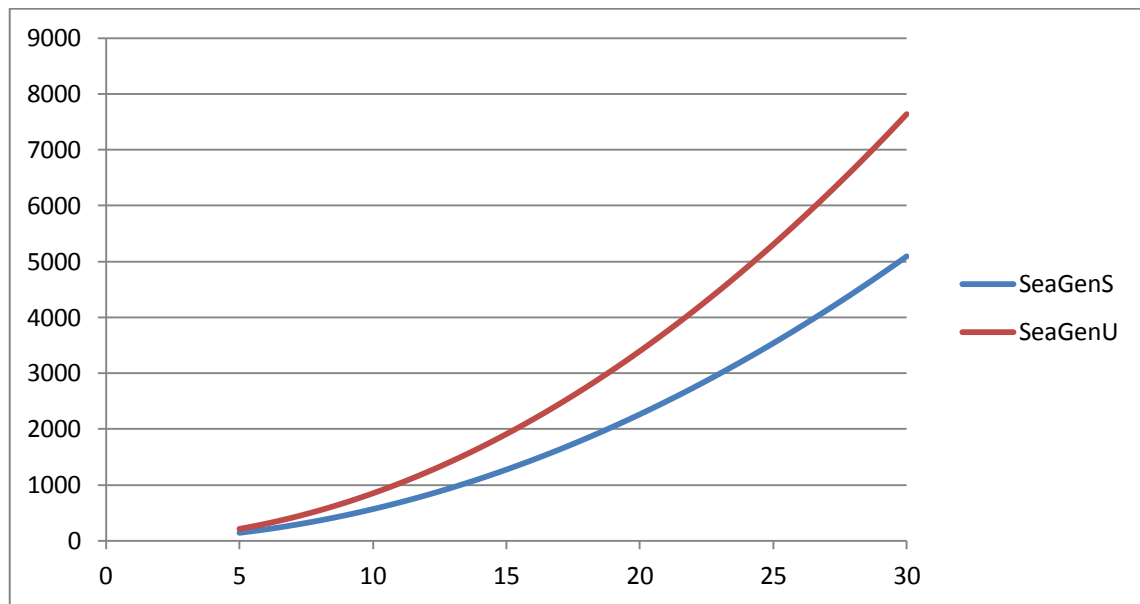
A continuación fijando los datos que nos proporciona la referencia [8] de diámetro del rotor de 11m, una K (C_p) fijada de 0,45 y variando la velocidad en un intervalo desde 1 m/s hasta 3m/s, se muestra que la relación entre la velocidad de la corriente y la potencia es la siguiente:



Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Continuando con la referencia [9] podemos observar una relación de las turbinas que están en desarrollo por parte de MTC (SeaGen S y SeaGen U), utilizando el desarrollo expuesto en [13], vemos que la relación corresponde con los desarrollados por la empresa.

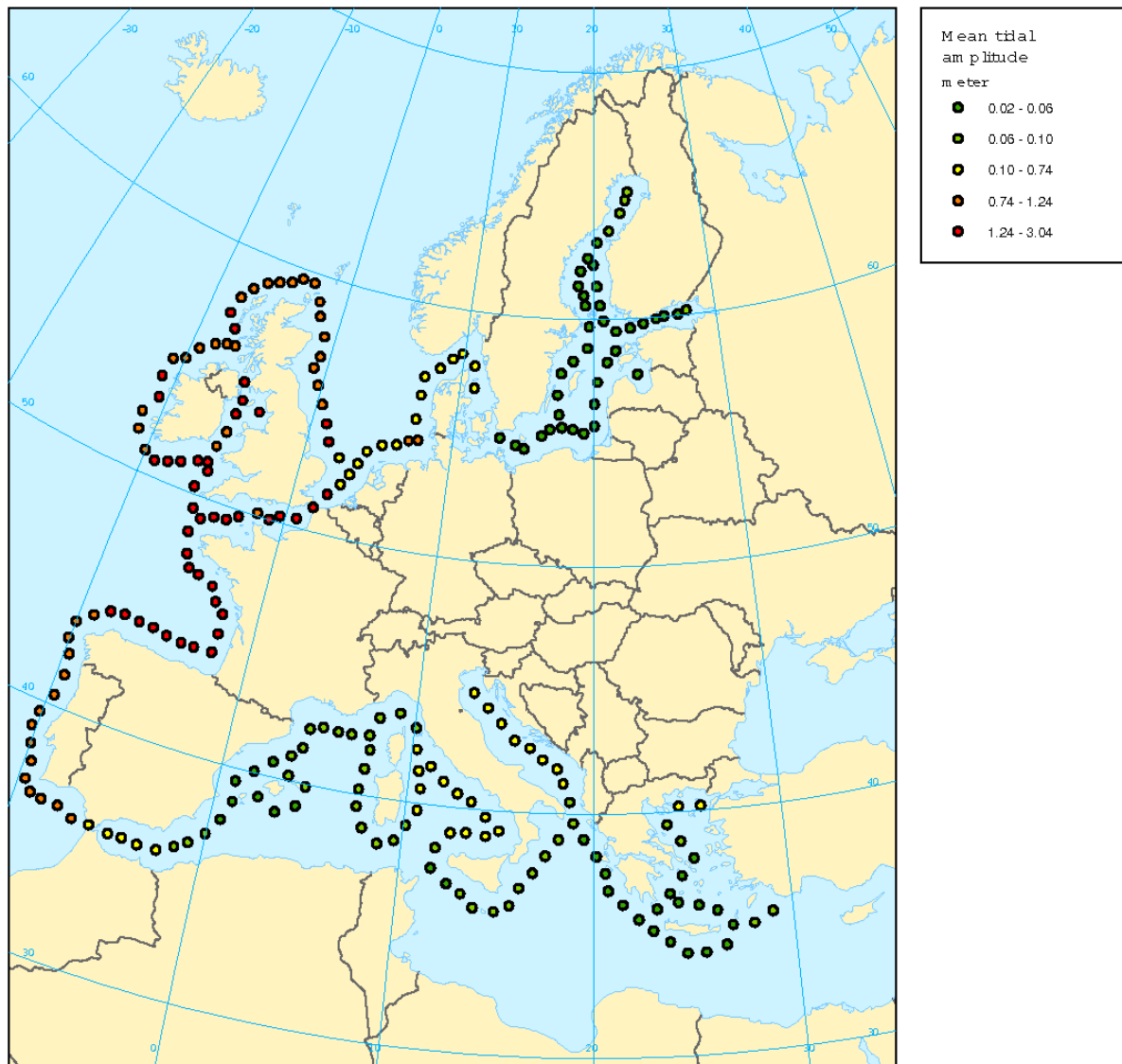
SeaGen "S"	Rated Power at 2.5m/s
2 x 16m dia rotors (402m ²)	1.36 MW
2 x 18m dia rotors (508m ²)	1.72 MW
2 x 20m dia rotors (628m ²)	2.12 MW
SeaGen "U"	Rated Power at 2.5m/s
3 x 16m dia rotors (603m ²)	2.00 MW
3 x 18m dia rotors (762m ²)	2.58 MW
3 x 20m dia rotors (942m ²)	3.18 MW

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

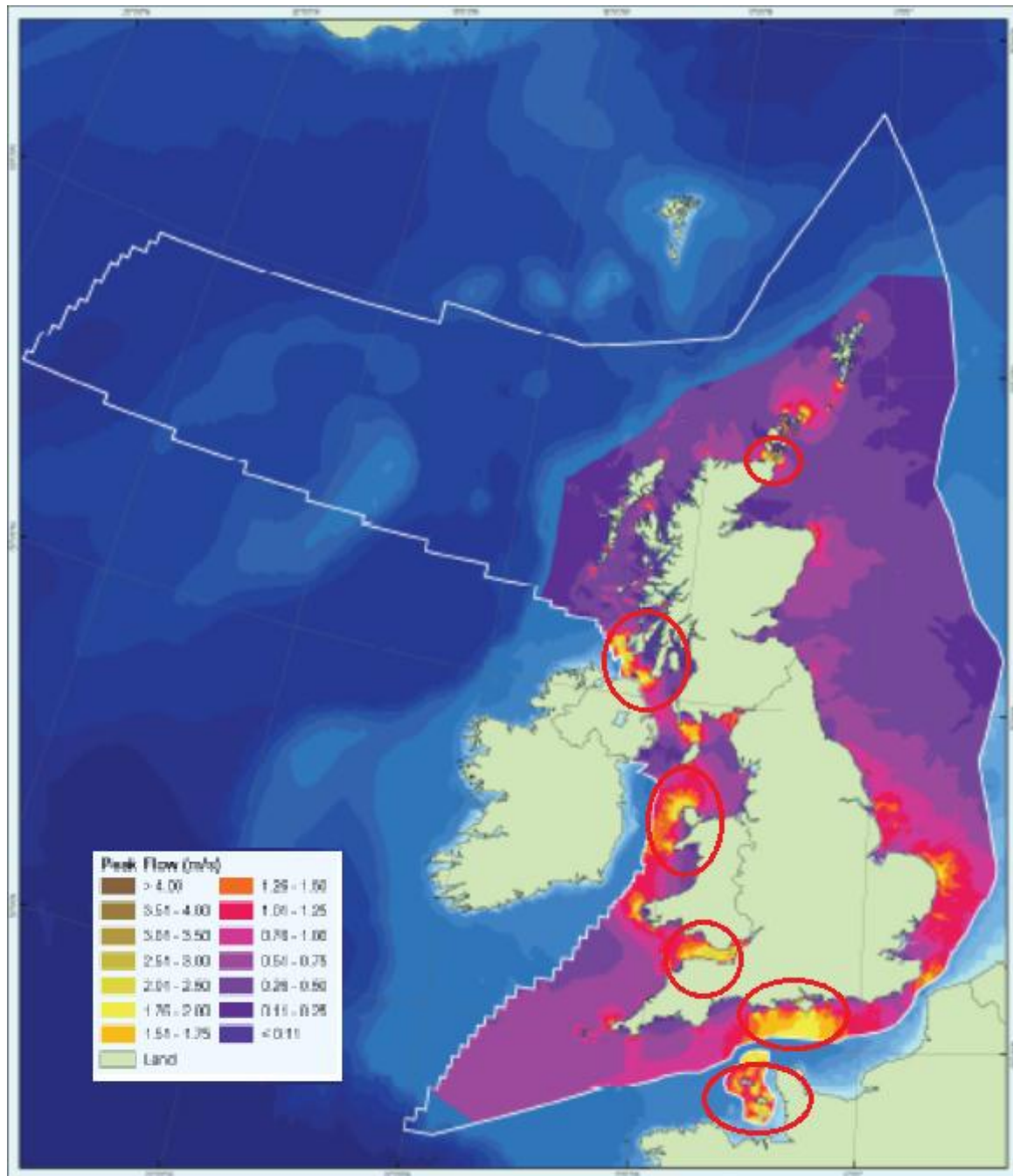
Tras las comprobaciones anteriores podemos ver que las ecuaciones desarrolladas en el artículo de Gonzalo Pérez Gómez [13] y que posteriormente se desarrollaran con más exhaustividad quedan validadas con datos reales de empresas que se están dedicando a la investigación y explotación de las turbinas de corrientes marinas.

Después de ver a lo largo de este apartado que las ecuaciones son válidas para extrapolarlas a emplazamientos reales, se hará un repaso por la geografía europea viendo los emplazamientos a priori más eficientes para la generación de electricidad mediante turbinas de corrientes marinas.

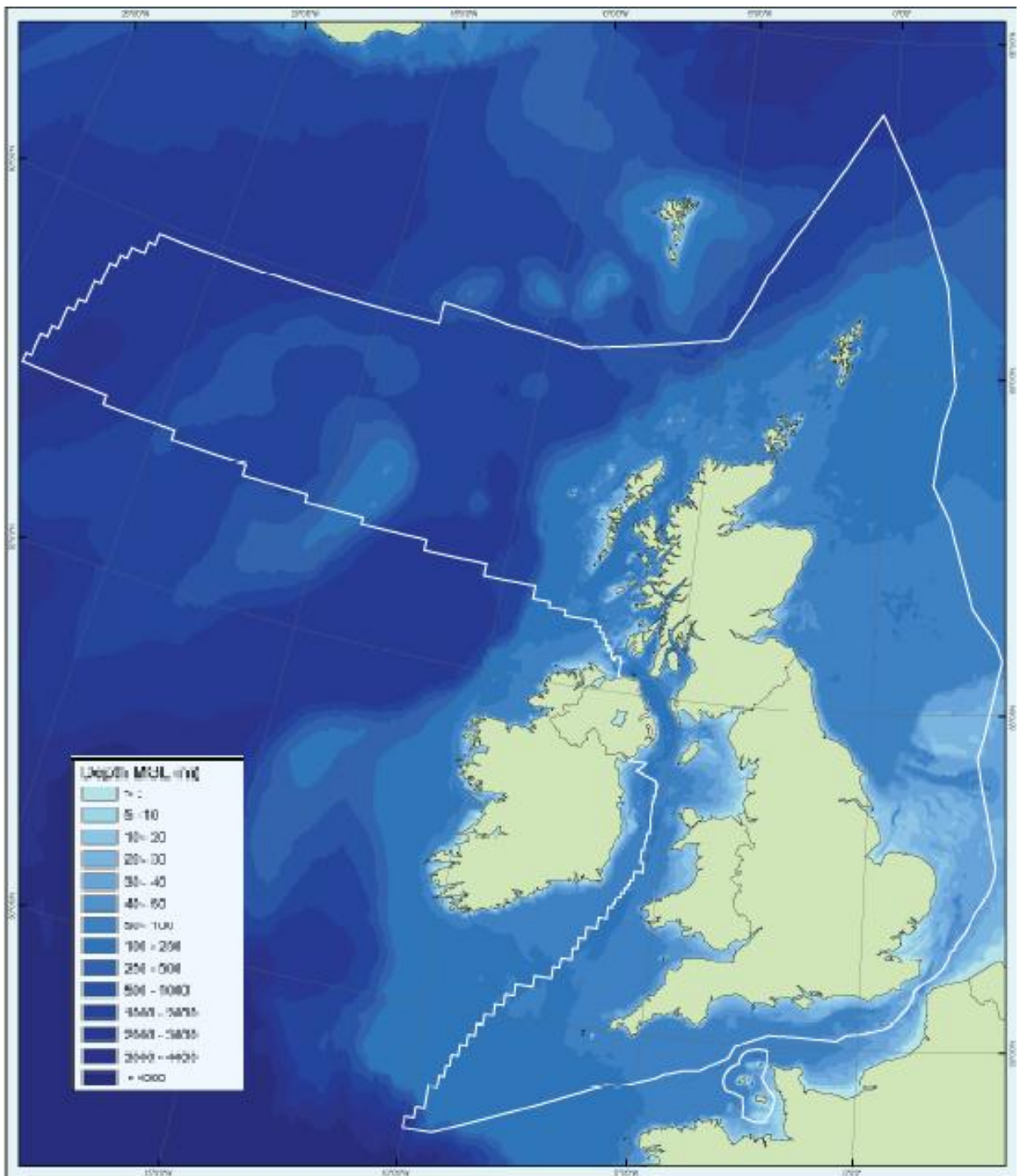
Basándonos en la imagen siguiente localizaremos varios emplazamientos, la mayoría de las localizaciones que se han elegido estarán en Reino Unido puesto que posee una de las variaciones más elevadas en cuanto a subidas y bajadas de mareas de Europa que va estrechamente ligado a la velocidad de corrientes marinas provocadas por este fenómeno.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

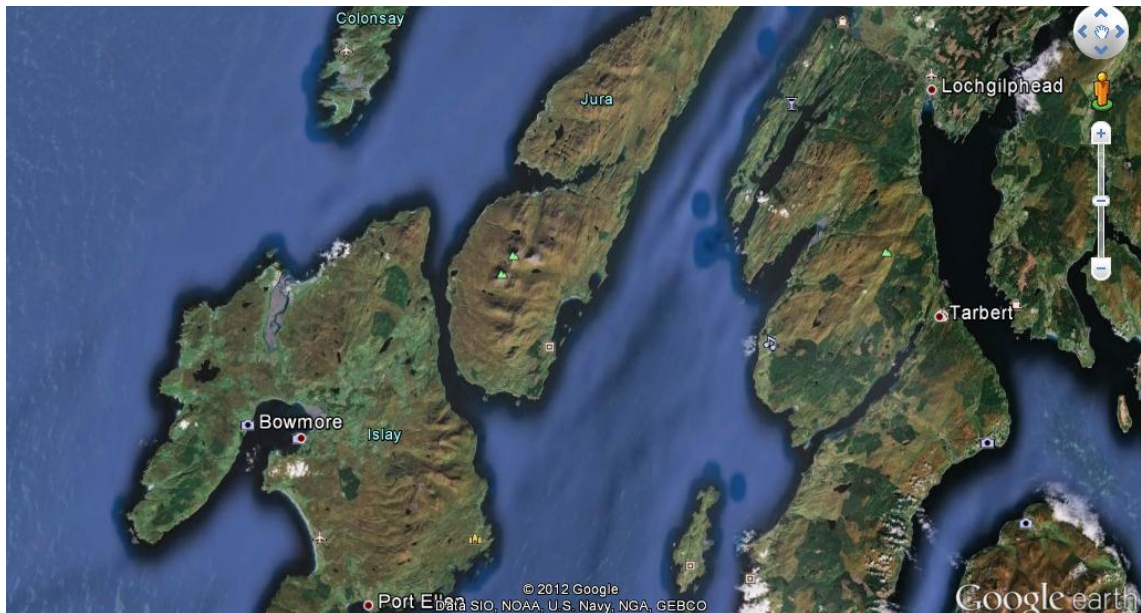
A continuación se muestra un mapa donde se refleja las velocidades de corrientes mayores que se encuentran en Gran Bretaña, las zonas marcadas son las que tienen un mayor valor en cuanto a velocidades de corrientes, llegando algunos casos a superar los 4 m/s.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Antes de escoger un emplazamiento deberíamos de ver que profundidad tiene, puesto que este parámetro es un impedimento en algunas ocasiones para instalar este tipo de turbinas, sobre todo las que van ancladas al fondo o por pilotes. En la imagen siguiente vemos la batimetría en las costas de Reino Unido.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Haciendo un balance entre la velocidad de corriente y la profundidad de la costa podemos ver que existen dos emplazamientos que son idóneos para instalar turbinas de corrientes marinas, el primer emplazamiento está ubicado entre la isla de Islay y la de Jura formando un canal que al estrecharse provoca velocidades de corrientes mayores:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

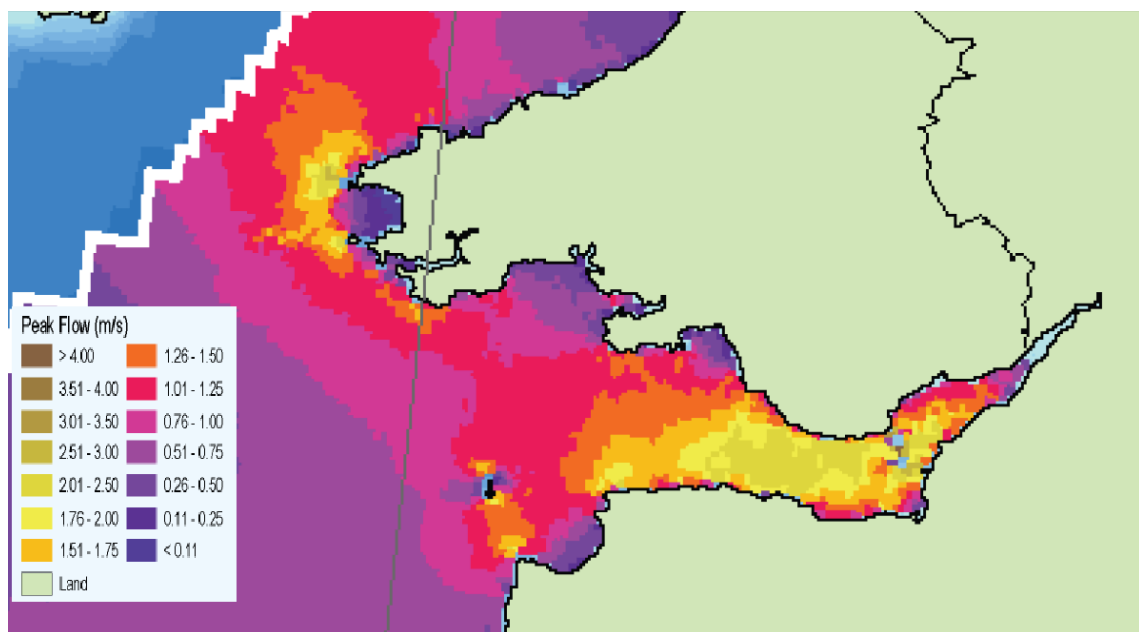
El segundo emplazamiento escogido se encuentra en el Canal de Bristol, cercano a la ciudad de *Cardiff*, en este emplazamiento se han registrado velocidades de corriente más que aceptable para la producción de energía eléctrica mediante corrientes:



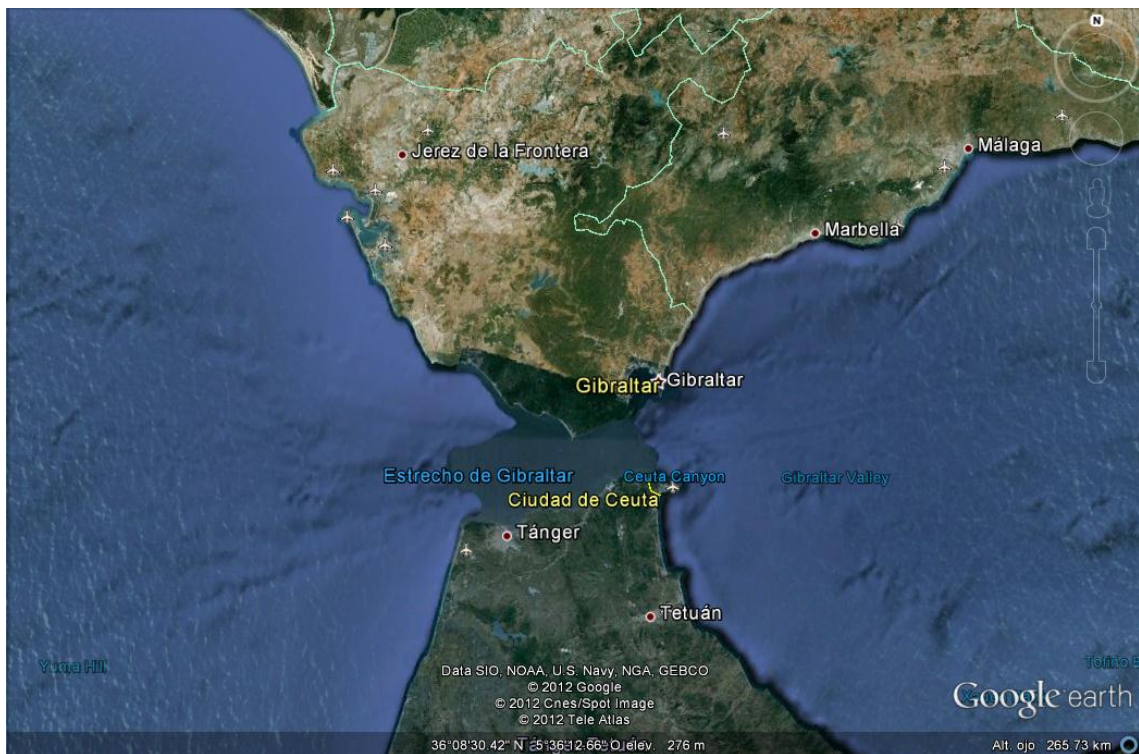
Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Esto no quiere decir que no existan otros emplazamientos útiles, de hecho, en las islas del norte de Escocia es donde se ubica la EMEC (centro de investigaciones de energía marina www.emec.org.uk.com).

En este trabajo se ha escogido el emplazamiento del Canal de Bristol por la proximidad de la instalación a ciudades y así poder llegar a la máxima población posible, alrededor de 341.000 habitantes registrados en el censo de 2010 y con una afluencia turística de aproximadamente 11.994.000 visitantes por año [10].

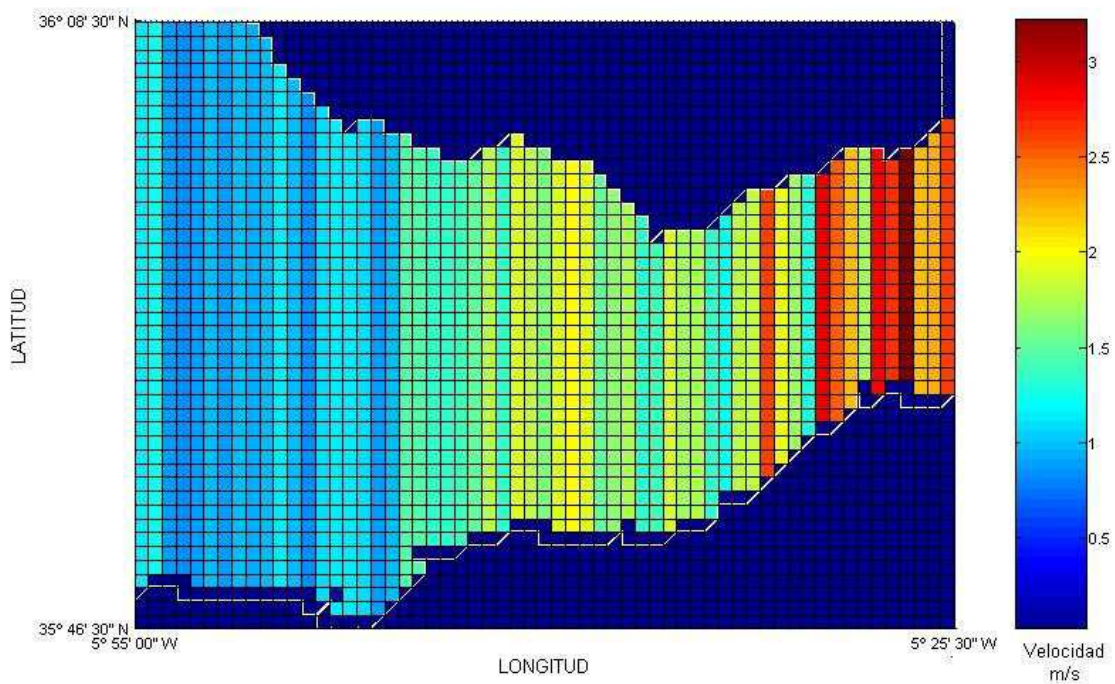
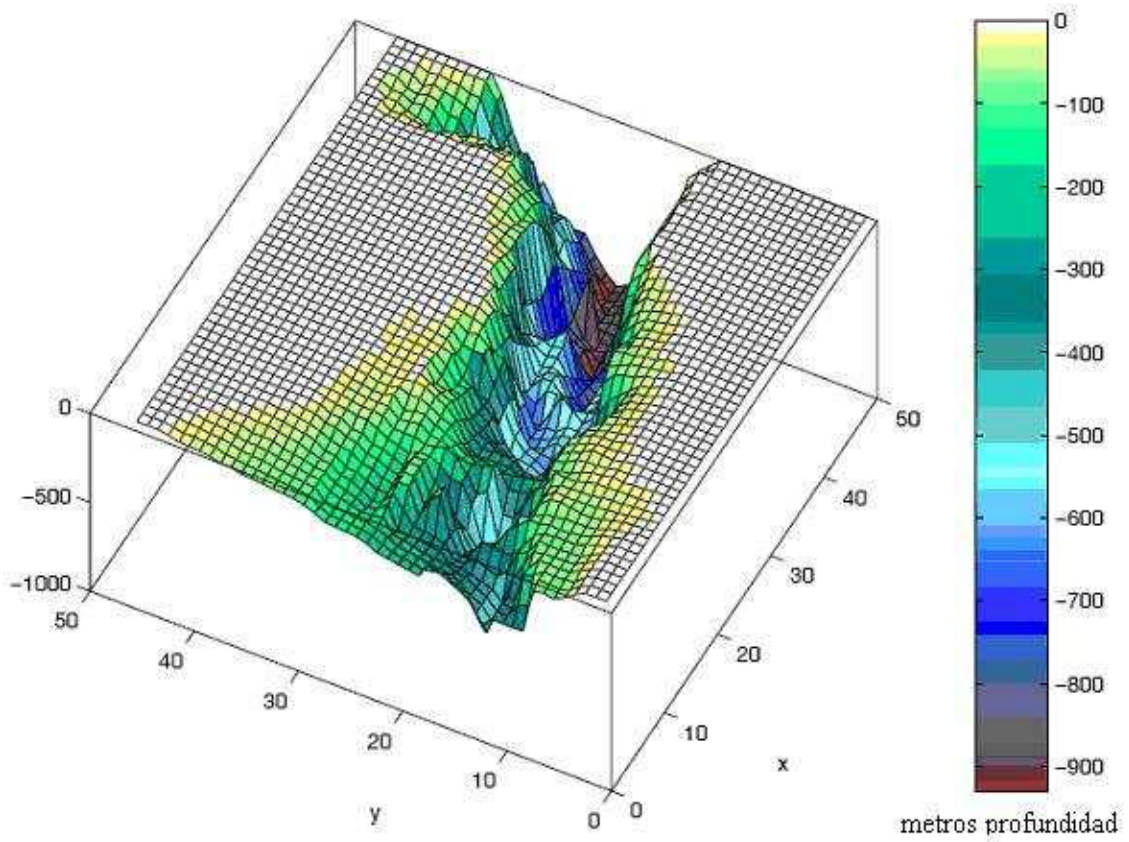


Existen otros emplazamientos a lo largo de Europa factibles a la instalación de esta tecnología, uno de estos emplazamientos es el estrecho de Gibraltar, canal que delimita España con el continente africano.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Juan Manuel Juanes González [11] hace un estudio exhaustivo para la obtención de energía mediante la tecnología descrita a lo largo de este trabajo, obteniendo resultados más que factibles y realizando apreciaciones de gran importancia, como la batimetría del estrecho y velocidades de corrientes existentes. En las siguientes imágenes, extraídas de [11], se puede observar la morfología del estrecho y la velocidad de corrientes que pueden llegar a producirse. En este trabajo no se ha elegido este emplazamiento por la gran variación de profundidad a medida que vamos adentrándonos en el mar dónde se encuentran las mayores velocidades de corrientes y por la dificultad o imposibilidad de instalar el tipo de turbinas que se estudia en este trabajo (apoyada y anclada sobre el lecho marino) puesto que se llegan a profundidades de hasta 900 metros donde están los valores más altos de velocidad de las corrientes marinas.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas



4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO A UTILIZAR EN EL DISEÑO DE LAS TURBINAS MARINAS

En este apartado se hará una descripción del método de cálculo de una hélice para un buque mediante la Nueva Teoría de la Impulsión (NTI) [12] para posteriormente centrarnos en la adaptación de esta teoría a turbinas de eje horizontal [13].

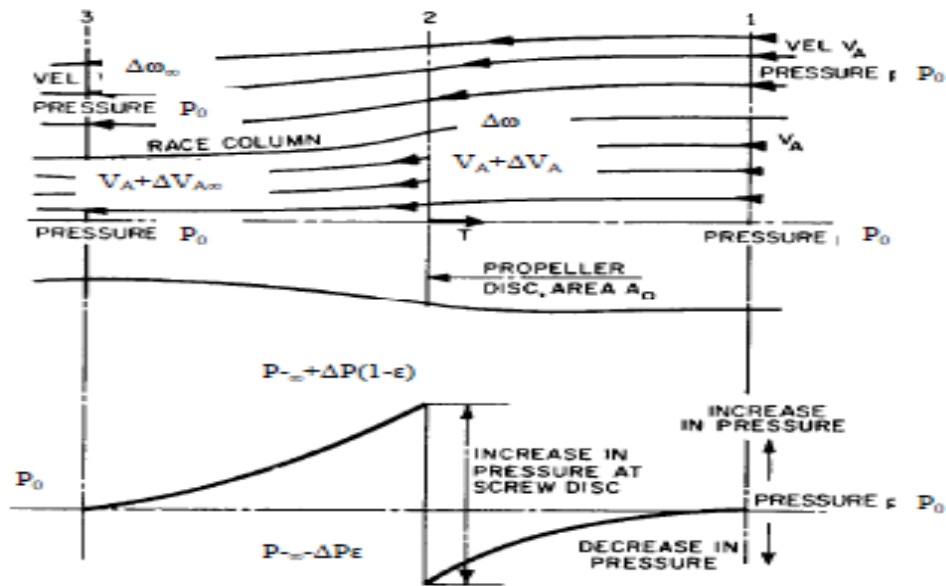
4.1. EXPOSICIÓN DE LA NUEVA TEORÍA DE LA IMPULSIÓN

4.1.1. Cálculo de las velocidades inducidas axiales

Podemos modelizar la acción que el propulsor ejerce sobre el fluido mediante un disco actuador caracterizado por el hecho de producir una depresión entre el infinito aguas arriba del propulsor y el disco del propulsor de magnitud $\varepsilon\Delta P$ y una sobrepresión entre el disco del propulsor y el infinito aguas abajo del propulsor de magnitud $(1-\varepsilon)\Delta P$. El valor del coeficiente ε ha de estar comprendido entre 0 y 1.

El incremento súbito de la presión, junto con el cambio de momento cinético del fluido que atraviesa el disco actuador, producen una aceleración axial y otra tangencial al fluido, que provocan una velocidad inducida, que descompondremos en sus componentes axial (proa popa) y tangencial (perpendicular al radio de la pala contenida en el plano del disco actuador). La componente radial de la velocidad inducida se desprecia, aunque luego la tendremos en cuenta en las correcciones tridimensionales al final del método.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas



Suponemos que la presión infinito aguas abajo y aguas arriba es la misma, P_0 , la hidrostática más la atmosférica. También suponemos que la velocidad axial es V_A infinito aguas abajo y la velocidad de rotación del fluido ω es nula. Al no poder producirse un salto brusco de velocidad en el disco, por la continuidad de la materia, el aumento de velocidad por la velocidad inducida se debe producir un poco a proa del disco, dando a las líneas de flujo que atraviesan el disco una forma convergente.

Suponiendo que se trata de un fluido ideal y aplicando el teorema de Bernouilli a la vena fluida que atraviesa el disco del propulsor entre las dos regiones del fluido separadas por la superficie de discontinuidad constituida por el disco del propulsor, se obtienen las siguientes ecuaciones:

Aguas arriba del propulsor;

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho V_A^2 = P_0 - \varepsilon\Delta P + \frac{1}{2}\rho(V_A + \Delta V_A)^2 \quad (4.1)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Aguas abajo del propulsor;

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho(V_A + \Delta V_{A\infty})^2 = P_0 + (1 - \varepsilon)\Delta P + \frac{1}{2}\rho(V_A + \Delta V_{A\infty})^2 \quad (4.2)$$

Restando ambas ecuaciones;

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho[2V_A\Delta V_{A\infty} + (\Delta V_{A\infty})^2] = \rho\Delta V_{A\infty}\left(V_A + \frac{\Delta V_{A\infty}}{2}\right) \quad (4.3)$$

Multiplicando los dos miembros de la igualdad anterior por el área del disco actuador se llega a:

$$T = A_0\Delta P = A_0\rho\Delta V_{A\infty}\left(V_A + \frac{\Delta V_{A\infty}}{2}\right) \quad (4.4)$$

La igualdad anterior relaciona el empuje del propulsor con la densidad del fluido, el área del disco actuador y el incremento de velocidad que experimenta el fluido entre menos infinito aguas arriba del propulsor y más infinito aguas abajo.

Sustituyendo el valor de ΔP que se deduce de la ecuación (4.3) en cualquiera de las ecuaciones (4.1) y (4.2), se obtiene la ecuación (4.5) que relaciona las componentes axiales de las velocidades inducidas en el infinito aguas abajo del propulsor y en el disco del propulsor.

$$\Delta V_A = -V_A + \sqrt{(V_A + \varepsilon\Delta V_{A\infty})^2 + \varepsilon(1 - \varepsilon)V_{A\infty}^2} \quad (4.5)$$

El disco actuador no es homogéneo con las mismas características a lo largo del radio, por lo que consideramos una serie de elementos anulares concéntricos del disco actuador que determinarán con la intersección de las palas del propulsor perfiles hidrodinámicos.

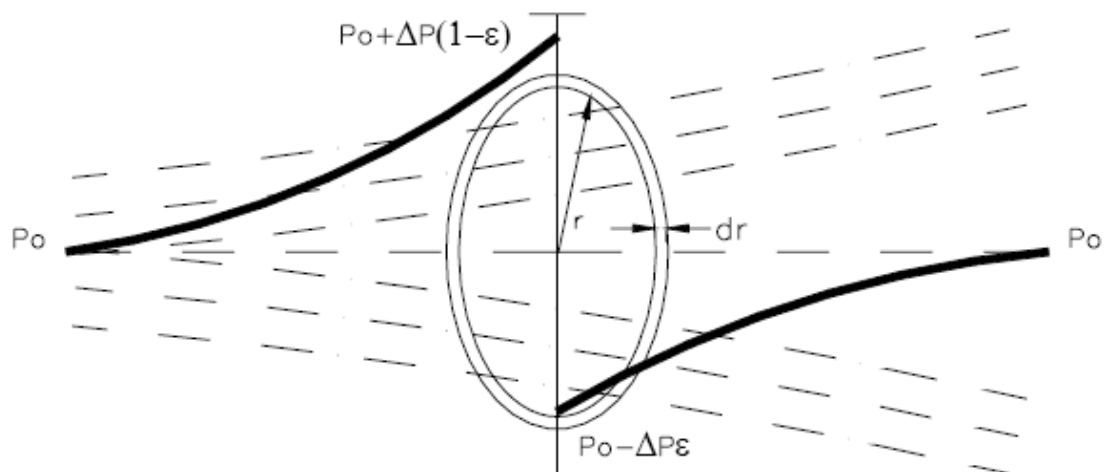
Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Cada elemento anular del disco actuador ejerce una depresión aguas arriba $\varepsilon\Delta P$ y una sobrepresión $(1-\varepsilon)\Delta P$ aguas abajo, siendo ε un parámetro característico del elemento anular del disco actuador.

El valor medio de la velocidad del flujo en la prolongación infinito aguas arriba del elemento anular del disco es la velocidad axial, cuyo valor es el producto de la velocidad del buque V por el complemento de la estela media circunferencial efectiva asociada al elemento anular, como vimos previamente. Es decir:

$$V_A(r) = V(1 - w_{mce}(r)) \quad (4.6)$$

El área del elemento anular del disco actuador es $dA_0 = 2\pi r dr$



Sea $T_i(r)$ la ordenada de la curva de la distribución radial de empuje por unidad de longitud en la sección de radio r en fluido ideal. El empuje ejercido por el elemento anular del disco actuador es, como sabemos, el área de la curva de base la anchura del perfil, que es dr . Suponiendo dr suficientemente pequeño, será un rectángulo, luego el área y el empuje valdrá $T_i(r)dr$.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Para el elemento anular se puede obtener la siguiente expresión, de forma similar a la expresión (4.4). Es decir, planteando Bernoulli antes y después del elemento anular, restando ecuaciones y multiplicando los dos miembros por el área del elemento anular obtenemos el empuje de dicho elemento, $T_i(r)dr$. Es decir:

$$T_i(r)dr = dA_0\Delta P = 2\pi dr\Delta P = 2\pi dr\rho\Delta V_{A\infty}(r)\left(V_A(r) + \frac{\Delta V_{A\infty}(r)}{2}\right) \quad (4.7)$$

Donde ahora $\Delta V_A(r)$ y $\Delta V_{A\infty}(r)$ son las velocidades inducidas producidas por el elemento anular del disco actuador en el fluido a su paso por el disco y en el infinito aguas abajo, evidentemente distintas para cada radio y por eso puestas como función de r . Podemos simplificar la expresión anterior a:

$$T_i(r) = 2\pi r\rho\Delta V_{A\infty}(r)\left(V_A(r) + \frac{\Delta V_{A\infty}(r)}{2}\right) \quad (4.8)$$

Resolviendo esta ecuación de segundo grado e incógnita $\Delta V_{A\infty}$ se obtiene una expresión para la velocidad inducida axial media en el flujo que pasa por el elemento anular, infinito aguas abajo:

$$\Delta V_{A\infty}(r) = -V_A(r) + \sqrt{V_A^2(r) + \frac{T_i(r)}{\pi\rho r}} \quad (4.9)$$

Por otro lado, de un modo similar al seguido para obtener la expresión (4.5), es decir, sustituyendo la expresión del empuje del elemento anular en cualquiera de las dos ecuaciones de Bernoulli particularizadas al elemento anular con el que se ha comenzado este análisis y despejando la velocidad inducida axial en el propulsor, variable con el radio, tenemos:

$$\Delta V_A(r) = -V_A(r) + \sqrt{\left(V_A(r) + \varepsilon\Delta V_{A\infty}(r)\right)^2 + \varepsilon(1 - \varepsilon)\Delta V_{A\infty}^2(r)} \quad (4.10)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Si en vez de despejar la velocidad inducida hubiéramos despejado el factor ε tendríamos:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V_A^2(r) + 2\Delta V_A(r)V_A(r)}{\Delta V_{A\infty}^2(r) + 2\Delta V_{A\infty}(r)V_A(r)} \quad (4.11)$$

Si la hélice está moderadamente cargada la componente axial de la velocidad inducida correspondiente a una sección anular es la mitad de la componente axial de la velocidad inducida aguas abajo:

$$\Delta V_A(r) = \frac{\Delta V_{A\infty}(r)}{2} \quad (4.12)$$

Sustituyendo en la expresión de ε esto significa que:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta V_{A\infty}(r)}{4} + V_A(r)}{\Delta V_{A\infty}(r) + 2V_A(r)} = \frac{\frac{\Delta V_{A\infty}(r)}{4V_A(r)} + 1}{\frac{\Delta V_{A\infty}(r)}{V_A(r)} + 2} \quad (4.13)$$

La hélice se considera muy cargada cuando $\Delta V_{A\infty}(r) > V_A(r)$. El límite es $\Delta V_{A\infty}(r) = V_A(r)$ lo que sustituyendo en la expresión de ε nos la simplifica hasta obtener $\varepsilon = 5/12 = 0,4167$. Es decir, si $\varepsilon < 5/12$ la hélice está muy cargada y no es aplicable la simplificación. Si $\varepsilon > 5/12$ no se puede asegurar que la hélice esté o no muy cargada, porque las ecuaciones anteriores no serían aplicables.

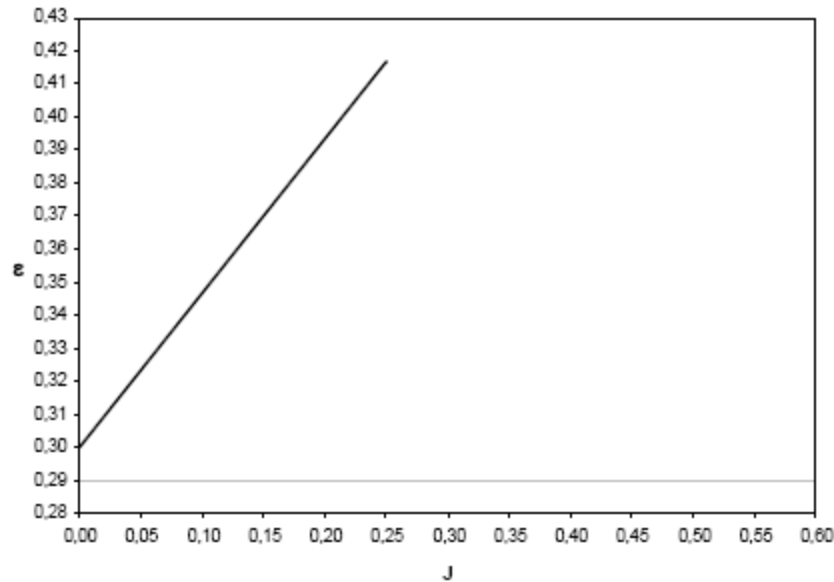
De forma independiente a las conclusiones anteriores, se puede observar de forma experimental que, aunque ε en principio depende de r , en realidad no sucede esto, dado que se comprueba que la variación de $\Delta V_{A\infty}(r) / \Delta V_A(r)$ con r es despreciable. Es decir, se comprueba experimentalmente que para una hélice dada, ε no depende del radio. Es más, se comprueba experimentalmente que ε depende del grado de avance del propulsor, J , según la siguiente expresión:

$$\varepsilon = 0,3 - (0,3 - 0,4167) \frac{J}{0,25} \quad \text{válida para } J < 0,25$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

$$\varepsilon = 5/12 = 0,4167$$

válida para $J \geq 0,25$



Con esto podemos saber ya si el propulsor está muy cargado o no. Efectivamente, calculando el grado de avance J , si es menor que 0,25 el propulsor está muy cargado, $\varepsilon = 0,3 - (0,3 - 0,4167) \cdot (J/0,25)$ y para calcular la velocidad inducida en el propulsor se debe usar, por tanto, la expresión:

$$\Delta V_A(r) = -V_A(r) + \sqrt{(V_A(r) + \varepsilon \Delta V_{A\infty}(r))^2 + \varepsilon(1 - \varepsilon) \Delta V_{A\infty}^2(r)} \quad (4.14)$$

Por el contrario, cuando $J \geq 0,25$, $\varepsilon = 5/12 = 0,4167$ de forma independiente a si la hélice está muy cargada o no. Entonces, se debe calcular el parámetro $V_P(r)$ con la expresión siguiente:

$$V_P(r) = -V_A(r) + \sqrt{\left(V_A(r) + \frac{5}{12} \Delta V_{A\infty}(r)\right)^2 + \frac{35}{144} \Delta V_{A\infty}^2(r)} \quad (4.15)$$

Que no es más que suponer que el perfil está muy cargado y usar la expresión correspondiente. Si $V_P(r) > \Delta V_{A\infty}(r)/2$ significa que el perfil está muy cargado y la expresión es correcta. Es decir $\Delta V_A(r) = V_P(r)$.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Por el contrario, si $VP(r) < \Delta VA^\infty(r)/2$ significa que el perfil está moderadamente cargado y la expresión no es correcta, pero podemos aplicar la simplificada. Es decir: $\Delta VA(r) = \Delta VA^\infty(r)/2$.

4.1.2. Cálculo de las velocidades inducidas de rotación

Para poder generalizar el concepto de disco actuador y poder así calcular las velocidades inducidas tangenciales, es preciso aceptar que el disco actuador además de producir un aumento de presión en el fluido es capaz de producir un cambio de momento cinético en el agua que lo atraviesa.

Sea I el momento de inercia de la masa de agua $\rho \cdot (V + \Delta V_A)$ que atraviesa el disco actuador en la unidad de tiempo.

Supóngase que el propulsor gira con una velocidad angular ω .

En los razonamientos que se presentan a continuación se supondrá que el disco actuador avanza en el seno del fluido a una velocidad V_A , ejerciendo sobre este un empuje T y un par ΔQ y absorbiendo un par Q .

En lo que sigue se centrará la atención en el mismo tubo de corriente que se utilizó en el apartado anterior, es decir, se tendrá en cuenta que por efecto de la ecuación de continuidad la vena líquida tiene un aspecto convergente entre el infinito aguas arriba del propulsor y el infinito aguas abajo.

El momento ΔQ que ejerce el disco actuador sobre el fluido se ha de invertir íntegramente en incrementar el momento de inercia del fluido entre el infinito aguas arriba del propulsor y el infinito aguas abajo del propulsor, pudiéndose establecer:

$$\Delta Q = I_\infty \Delta \omega_\infty$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

siendo $\Delta\omega_\infty$ el incremento de la velocidad inducida en el infinito aguas abajo del propulsor e I_∞ el momento de inercia del agua que fluye por la vena líquida en el infinito aguas abajo del propulsor.

Al plantear la ecuación anterior se ha tenido en cuenta que la velocidad angular del fluido aguas arriba del propulsor es nula.

La energía por unidad de tiempo (potencia) que comunica, por tanto el disco actuador sobre el fluido es el producto del momento por la velocidad angular del fluido en el disco actuador, es decir:

$$\Delta Q \Delta \omega = I_\infty \Delta \omega_\infty \Delta \omega \quad (4.16)$$

Si el propulsor gira con una velocidad angular ω recibiendo de la línea de ejes un momento Q , absorberá una energía por unidad de tiempo (potencia) $Q\omega$. Dicha energía se invertirá en comunicar al fluido un movimiento de traslación y un movimiento de rotación.

El principio de conservación de la energía permite establecer que la energía comunicada al fluido será igual al trabajo realizado por el empuje suministrado T más el trabajo realizado por el momento que ejerce el propulsor sobre el fluido. Recordando que el trabajo por unidad de tiempo (potencia) invertido por el empuje es el producto del mismo por la velocidad del fluido en el disco actuador $V_A + \Delta V_A$ podemos realizar un balance de potencias:

$$Q\omega = T(V_A + \Delta V_{A\infty}) + I_\infty \Delta \omega_\infty \Delta \omega \quad (4.17)$$

La expresión precedente es totalmente diferente a la utilizada por los autores clásicos, donde el balance de potencias quedaba planteado en los siguientes términos:

$$Q\omega = TV_A + \frac{1}{2} A_0 \rho (V_A + \Delta V_A) (\Delta V_{A\infty})^2 + \frac{1}{2} I_\infty (\Delta \omega_\infty)^2 \quad (4.18)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Donde se consideraba que la potencia generada por la línea de ejes se empleaba en generar trabajo útil con el empuje y en compensar las pérdidas de energía cinética de rotación y traslación.

La suma de los tres sumandos del segundo miembro de la igualdad precedente no representa la energía total entregada por el disco actuador al fluido, ya que en dicho balance no se han tenido en cuenta las fuerzas de presión que se oponen al movimiento del fluido a través de la superficie de control. Por el contrario, el primer sumando del segundo término de (4.17), representa la energía total que se invierte en comunicar al fluido el incremento de velocidad $\Delta V_{A\infty}$ entre menos infinito y más infinito, mientras que el segundo sumando representa la energía total que se invierte en comunicar el incremento de velocidad angular $\Delta\omega_{\infty}$ entre los mismos límites. La suma de ambas energías ha de coincidir con la energía que recibe el propulsor del eje y ambos sumandos son excluyentes y complementarios con respecto a Q.

Sucede además que en los textos clásicos se efectúa la hipótesis errónea de suponer $\Delta Q = Q$, es decir, aceptar que se verifica;

$$Q = I_{\infty}\Delta\omega_{\infty} \quad (4.19)$$

Dicha hipótesis es inexacta, ya que parte del momento Q se invierte en conseguir el empuje T.

Para calcular el incremento de velocidad $\Delta\omega$ del agua a su paso por el disco del propulsor, basta aplicar el teorema de la conservación del momento cinético desde el disco actuador hasta el infinito aguas abajo, estableciendo:

$$I_{\infty}\Delta\omega_{\infty} = I\Delta\omega \quad (4.20)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

$$\Delta\omega = \Delta\omega_{\infty} \frac{I_{\infty}}{I} \quad (4.21)$$

Aplicando este teorema, podemos modificar la expresión (4.17) obteniendo:

$$Q\omega = T(V_A + \Delta V_{A\infty}) + I\Delta\omega^2 \quad (4.22)$$

Si se establece el teorema del momento cinético entre el infinito aguas arriba y el disco del propulsor se deduce que la velocidad inducida angular en la cara de proa del propulsor es nula. La superficie de discontinuidad constituida por el disco actuador introduce un salto brusco en el reparto de velocidades angulares en el fluido. Este hecho es real, y se pone de manifiesto en los ensayos de flujo de autopropulsión realizados con modelos. En dichos ensayos se puede ver con toda claridad que los hilos situados a proa del propulsor se orientan perpendicularmente hacia el propulsor, no pudiéndose detectar en ellos que existan componentes tangenciales de velocidades inducidas por el propulsor sobre el fluido aguas arriba del propulsor.

Para un elemento anular se puede, mediante un razonamiento análogo al que obtiene el balance correcto de potencias en un disco actuador completo y aplicando después el teorema de conservación del momento cinético, a la siguiente expresión:

$$Q(r)\omega = T(r)[(V_A(r) + \Delta V_A(r))] + I_0(r)\Delta\omega^2(r) \quad (4.23)$$

Donde $\Delta\omega(r)$ es la velocidad inducida de rotación en el elemento anular de radio r del disco actuador e $I_0(r)$ es el momento de inercia por unidad de longitud radial de la masa de agua que atraviesa el elemento anular de disco actuador de radio r y que sigue la expresión:

$$I_0(r) = 2\pi r \rho [V_A(r) + \Delta V_A(r)] r^2 \quad (4.24)$$

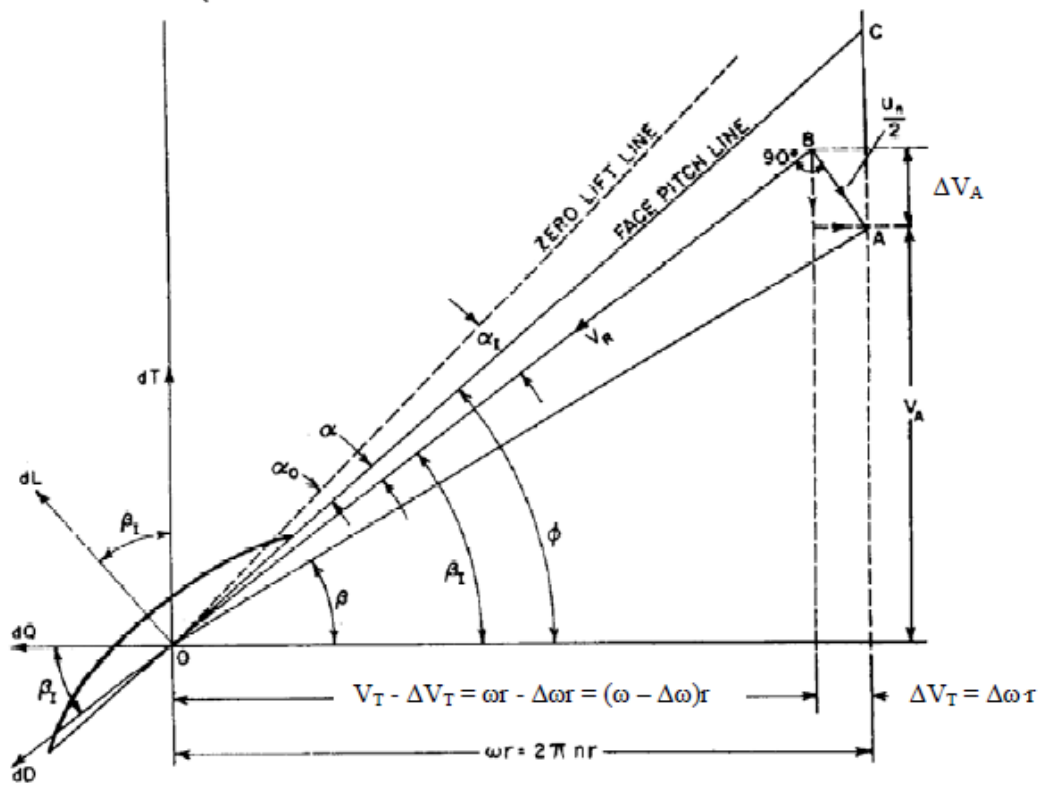
sustituyendo $I_0(r)$ en la ecuación de $Q(r)\omega$:

$$Q(r)\omega = T(r)[(V_A(r) + \Delta V_A(r))] + 2\pi\rho[(V_A(r) + \Delta V_A(r))]r^3\Delta\omega^2(r) \quad (4.25)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

De donde podemos calcular la incógnita $\Delta\omega$ si conocemos el momento entregado por el eje al elemento anular de radio r del disco actuador.

Primero recordemos el diagrama de fuerzas y velocidades del perfil genérico de radio r en una pala:



En la figura se muestran las fuerzas actuantes; sustentación dL , resistencia dD y las velocidades y ángulos entre ellos. Proyectando las fuerzas en las direcciones axial y tangencial y calculando momentos se obtienen el empuje dT y el par dQ ambos funciones del radio del perfil, según:

$$dT(r) = dL(r)\cos\beta_i - dD(r)\sen\beta_i \quad (4.26)$$

$$dQ(r) = r(dL(r)\sen\beta_i + dD(r)\cos\beta_i) \quad (4.27)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Ahora bien, el empuje real $T(r)dr$ del elemento anular de radio r es el producto del empuje y del perfil del mismo radio r por el número de palas Z . El par real $Q(r)dr$ es el también el producto del par del perfil por el número de palas:

$$T(r)dr = Z(dL(r)\cos\beta_i - dD(r)\sen\beta_i) \quad (4.28)$$

$$Q(r)dr = Zr(dL(r)\sen\beta_i + dD(r)\cos\beta_i) \quad (4.29)$$

Donde el ángulo de incidencia del flujo teniendo en cuenta velocidades inducidas β_i puede calcularse con la expresión:

$$\tan\beta_i = \frac{V_A(r) + \Delta V_A(r)}{V_T(r) - \Delta V_T(r)} = \frac{V_A(r) + \Delta V_A(r)}{r(\omega - \Delta\omega(r))} \quad (4.30)$$

Por otro lado la sustentación dL y la resistencia dD pueden expresarse como:

$$dL(r) = \frac{1}{2}\rho V_R^2 c C_L \quad (4.31)$$

$$dD(r) = \frac{1}{2}\rho V_R^2 c C_D \quad (4.32)$$

C_L y C_D son respectivamente los coeficientes de sustentación y resistencia de la sección anular de la pala, c la cuerda de la sección y V_R la velocidad del flujo incidente, dada por:

$$V_R = \sqrt{(V_A(r) + \Delta V_A(r))^2 + (r(\omega - \Delta\omega(r)))^2} \quad (4.33)$$

Considerando fluido ideal, o sea sin viscosidad, la distribución radial de empujes es $T_i(r)$ y la distribución radial de momentos es $Q_i(r)$. Dado que sin viscosidad implica que la resistencia $dD(r)$ es nula, las expresiones para las fuerzas y pares que actúan en un elemento anular de radio r , ahora en fluido ideal, quedan:

$$T_i(r)dr = Z(dL(r)\cos\beta_i) \quad (4.34)$$

$$Q_i(r)dr = Zr(dL(r)\sen\beta_i) \quad (4.35)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

El cociente de ambas expresiones puede ponerse función del ángulo de incidencia del flujo o de su expresión función de las velocidades inducidas

$$\frac{Q_i(r)}{T_i(r)} = r \tan\beta_i = r \frac{V_A(r) + \Delta V_A(r)}{r(\omega - \Delta\omega(r))} \quad (4.36)$$

Despejando el par por unidad de longitud en fluido ideal empleado por el eje para generar empuje en el elemento anular:

$$Q_i(r) = T_i(r) r \frac{V_A(r) + \Delta V_A(r)}{r(\omega - \Delta\omega(r))} \quad (4.37)$$

Ahora podemos sustituir en la expresión resultante del balance de potencias para el elemento anular:

$$\begin{aligned} Q_i(r)\omega &= T_i(r) r \frac{V_A(r) + \Delta V_A(r)}{r(\omega - \Delta\omega(r))} \omega \\ &= T_i(r) [(V_A(r) + \Delta V_A(r))] + 2\pi\rho [(V_A(r) + \Delta V_A(r))] r^3 \Delta\omega^2(r) \end{aligned} \quad (4.38)$$

y finalmente podemos despejar la velocidad inducida de rotación $\Delta\omega(r)$:

$$\Delta\omega(r) = \frac{1}{2} \left[\omega - \left(\omega^2 - \frac{2T_i(r)}{\rho\pi r^3} \right)^{1/2} \right] \quad (4.39)$$

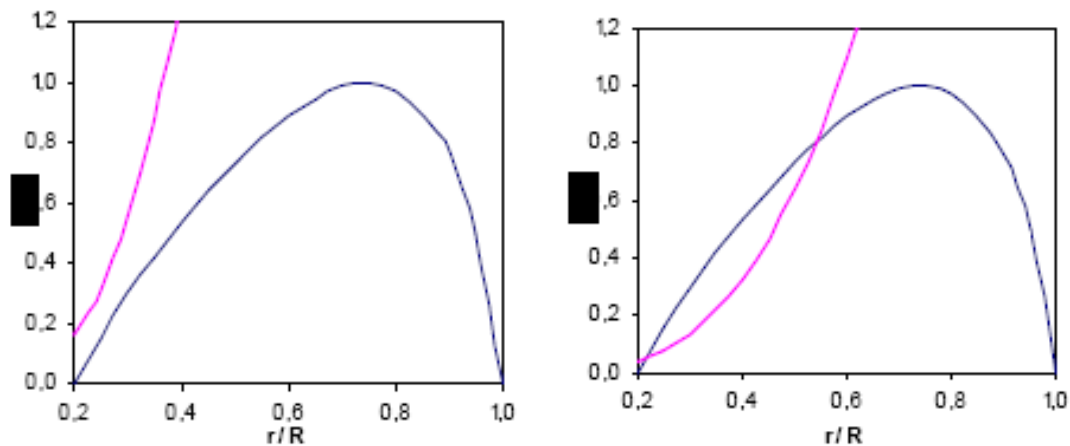
Se puede observar que esta expresión no siempre tiene solución. Si la resta del interior de la raíz cuadrada tiene valor negativo, es decir, si $\omega^2 < \frac{2T_i(r)}{\rho\pi r^3}$ la raíz es imaginaria y no existe solución real. El que haya o no solución física del problema de las velocidades inducidas depende de la velocidad de rotación del propulsor ω , de la distribución de empujes en fluido ideal $T_i(r)$ y del diámetro del propulsor D , que determinará la magnitud del radio r de cada elemento anular. Como quiera que no podemos actuar sobre D ni sobre ω dado que vienen

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

optimizados en el proceso previo antes del cálculo directo, para asegurar que existe solución sólo podemos actuar sobre $T_i(r)$. Si lo despejamos de la desigualdad principal:

$$T_i(r) < \frac{1}{2} \rho \pi r^3 \omega^2 \quad (4.40)$$

Tenemos la condición de existencia de soluciones reales. Gráficamente:



Si la distribución de empujes está por debajo de la curva $\frac{1}{2} \rho \pi r^3 \omega^2$, como en el diagrama de la izquierda, hay solución. En caso contrario, no existe solución real y la curva de empujes debe ser modificada.

Una vez determinadas las velocidades inducidas axial y de rotación para cada elemento anular, aplicando las expresiones de arriba, el ángulo de incidencia del flujo β_i , también llamado ángulo de paso hidrodinámico, queda totalmente determinado para cada perfil.

4.2. APLICACIÓN DE LA NUEVA TEORÍA DE LA IMPULSIÓN PARA EL DISEÑO DE TURBINAS AXIALES

A continuación se expondrán ciertos criterios a la hora de la aplicación de la NTI a turbinas:

Se considerará que en el infinito aguas arriba la presión es P_0 y la velocidad del fluido es unidireccional y uniforme de magnitud V .

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

La velocidad del fluido en el infinito aguas abajo del disco actuador es $V - \Delta V_2$ y la presión es P_0 .

El disco actuador reduce la velocidad de la vena líquida en V_1 , produciendo un incremento de presión p en la corriente.

Considérese que la presión sobre el paramento dorsal del disco actuador es:

$$P_0 + \Delta p(1 - \varepsilon) \quad (4.41)$$

ε es un coeficiente que permite valorar las magnitudes de la sobrepresión aguas arriba del disco actuador y de la depresión aguas abajo en función del salto total de presiones Δp .

La presión sobre el paramento frontal del disco actuador será:

$$P_0 - \varepsilon \Delta p \quad (4.42)$$

La velocidad con la que el fluido atraviesa al disco actuador es $V - \Delta V_1$.

A continuación se mostrará la representación de las variaciones introducidas en el campo de presiones en el de velocidades como consecuencia de la turbina y de una hélice propulsora.

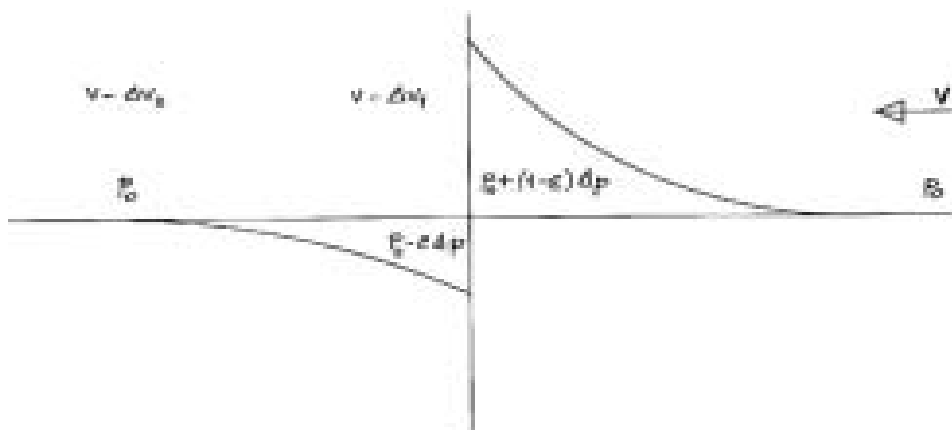


Ilustración 1. Campo de presiones y de velocidades correspondientes a una turbina

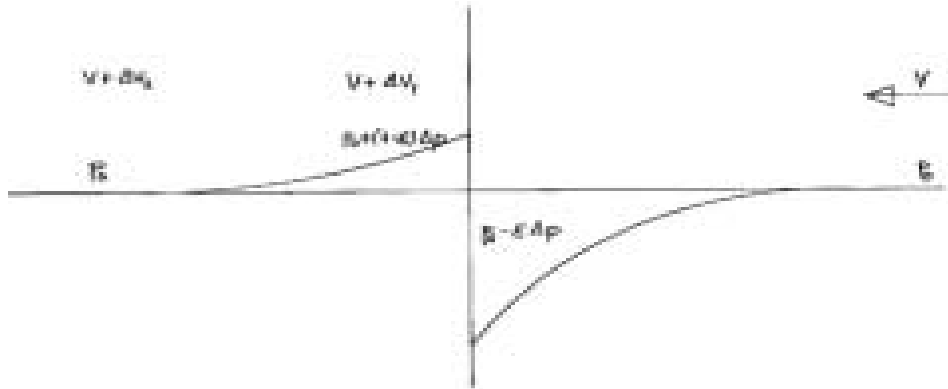
Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Ilustración 2. Campo de presiones y de velocidades correspondientes a una hélice

Se puede observar que las características del disco actuador en una turbina son diferentes de las del disco actuador utilizado en el caso de una hélice de un buque.

En el caso de la hélice, la velocidad del fluido aguas abajo aumenta como consecuencia del funcionamiento de la hélice, mientras que en el caso de la turbina hidráulica o eólica la velocidad aguas abajo es menor que en el infinito aguas arriba.

Aplicando el teorema de Bernouilli aguas arriba y aguas abajo del disco actuador que modeliza la acción de la turbina se obtiene:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho V^2 = P_0 + (1 + \varepsilon)\Delta p + \frac{1}{2}\rho(V - \Delta V_1)^2 \quad (4.43)$$

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho(V - \Delta V_2)^2 = P_0 - \varepsilon\Delta p + \frac{1}{2}\rho(V - \Delta V_1)^2 \quad (4.44)$$

Restando ambas igualdades se obtiene:

$$\rho\Delta V_2 \left[V - \left(\frac{\Delta V_2}{2} \right) \right] = \Delta P = \frac{T}{A} \quad (4.45)$$

ρ es la densidad del fluido cuyo valor será diferente dependiendo de que se trate de una turbina hidráulica o de un generador eólico.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

A es el área del disco actuador.

El empuje T que el disco actuador ejerce contra la corriente es:

$$T = A \cdot \Delta P \quad (4.46)$$

De las igualdades (4.45) se deduce:

$$\Delta V_2 = V - \left(V^2 - \frac{2T}{\rho A} \right)^{1/2} \quad (4.47)$$

Cuando el valor de T es pequeño, el disco actuador está moderadamente cargado y en tales circunstancias se puede suponer, en primera aproximación, que la vena líquida tiene secciones transversales constantes e iguales a A.

Aplicando el teorema de la cantidad de movimiento entre el infinito aguas abajo y el infinito aguas arriba se obtiene:

$$\rho \Delta V_2 (V - \Delta V_1) = \frac{T}{A} \quad (4.48)$$

Comparando (4.46) y (4.47) se deduce la conclusión utópica:

$$\Delta V_1 = \frac{\Delta V_2}{2} \quad (4.49)$$

De un proceso análogo al utilizado en el apartado anterior para obtener la expresión de ε , se deducirá el valor del coeficiente $(1-\varepsilon)$ a partir del cual no se puede considerar que la turbina sea moderadamente cargada.

De (4.43) se deduce:

$$(1 - \varepsilon) \Delta p = \frac{1}{2} \rho (-\Delta V_1^2 + 2V \cdot \Delta V_1) \quad (4.50)$$

Haciendo ΔV_1 igual a $\Delta V_2/2$ se obtiene:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

$$(1 - \varepsilon) = \frac{\frac{-\Delta V_2^2}{4} + V \cdot \Delta V_2}{\Delta V_2 \left[V - \left(\frac{\Delta V_2}{2} \right) \right]} \quad (4.51)$$

Admitiendo que a partir de $\Delta V_2=V$ la turbina no pueda considerarse moderadamente cargada, se obtiene:

$$\varepsilon = 0,25$$

Operando con la igualdad (4.43) se obtiene:

$$\Delta V_1 = V - \left(V^2 - \frac{(1 - \varepsilon)2T}{\rho A} \right)^{1/2} \quad (4.52)$$

ΔV_1 ha de ser el mayor de los siguientes valores; $\Delta V_2/2$ y el valor que se obtiene de (4.52) suponiendo precisamente que ε es igual a 0.25.

El valor de T no se conoce a priori.

La energía que el fluido le entrega al disco actuador es T [V- ΔV_1].

Esta energía aumenta para un determinado valor de T cuando ΔV_1 disminuye. Por otra parte, de la igualdad (4.52) se deduce que cuando ε tienda a 1, ΔV_1 tenderá a cero.

En tal caso la sobrepresión $(1-\varepsilon)\Delta p$ aguas arriba sería mínima y la depresión aguas abajo será máxima.

Es obvio que interesa que ε sea lo mayor posible ya que entonces ΔV_1 será lo menor posible y la energía entregada a la turbina sería la mayor posible.

De la igualdad (4.47) se deduce que el óptimo valor de T para un determinado valor de A sería aquel que hiciese que ΔV_2 fuese igual a V, ya que entonces el fluido quedaría sin velocidad aguas abajo por haber cedido toda su energía al disco actuador. Llamando T_M a dicho valor de T se puede establecer:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

$$T_M = \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) A \quad (4.53)$$

T_M es el valor máximo de T y corresponde al caso utópico de que el disco actuador absorbiese la totalidad de la energía cinética del fluido que lo atraviesa.

4.2.1. Planteamiento del balance energético

Sea M el momento entregado por la turbina a su eje.

La energía obtenida del fluido $T(V-\Delta V_1)$ se ha de invertir en ceder al eje de la turbina una potencia ($M\omega$) cuando éste gira con la velocidad angular ω , y en incrementar el momento cinético del fluido entre menos infinito y más infinito.

El incremento de momento cinético del fluido es $I_{-\infty} \cdot \Delta\omega_2$ siendo $I_{-\infty}$ el momento cinético del fluido que atraviesa por unidad de tiempo la vena líquida en el infinito aguas abajo cuando la presión es P_0 y la velocidad axial del fluido es $(V-\Delta V_2)$.

$\Delta\omega_2$ es la velocidad angular del fluido en el infinito aguas abajo. Obviamente en el infinito aguas arriba es cero.

El momento que el disco actuador ejerce sobre el fluido que lo atraviesa es:

$$M_1 = I_{-\infty} \cdot \Delta\omega_2 \quad (4.54)$$

Aplicando la conservación del momento cinético entre el disco actuador y el infinito aguas abajo se obtiene:

$$I_{-\infty} \cdot \Delta\omega_1 \quad (4.55)$$

$\Delta\omega_1$ es la velocidad angular del fluido a su paso por el disco actuador.

I_0 es el momento de inercia de la masa del fluido que atraviesa en la unidad de tiempo al disco actuador.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

La energía que se invierte en incrementar el momento cinético del fluido que atraviesa al disco actuador por unidad de tiempo es $M_1 \cdot \Delta\omega_1$.

$$M_1\Delta\omega_1 = I_0\Delta\omega_1^2 \quad (4.56)$$

Planteando el balance de energías que se ha enunciado se obtiene:

$$T(V - \Delta V_1) = M\omega + I_0\Delta\omega_1^2 \quad (4.57)$$

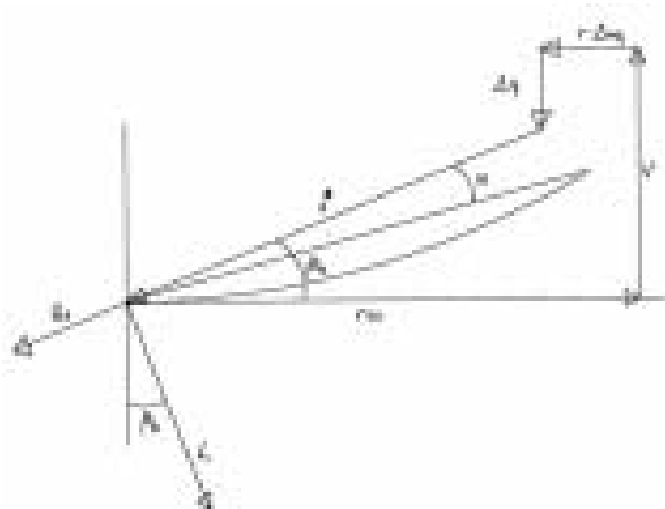
De (4.57) se obtiene:

$$\Delta\omega_1 = \left(\frac{T(V - \Delta V_1) - M\omega}{I_0} \right)^{1/2} \quad (4.58)$$

Particularizando la igualdad precedente para un elemento anular de radio r del disco actuador se obtiene:

$$\Delta\omega_1(r) = \left[\frac{T(r)(V - \Delta V_1(r)) - M\omega(r)}{2\pi r^3 (V - \Delta V_1(r))\rho} \right]^{1/2} \quad (4.59)$$

En la figura siguiente se ha representado el polígono de velocidades correspondiente a una sección genérica de radio r del disco actuador.



El empuje $T(r)$ y el par $Q(r)$ correspondientes al elemento anular pueden expresarse en función de la sustentación $L(r)$ y de la resistencia viscosa $Rv(r)$ de la siguiente manera:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

$$T(r) = L(r)\cos\beta_{i0} + Z \cdot R_V \text{sen}\beta_{i0}$$

$$Q(r) = r[L(r)\text{sen}\beta_{i0} - Z \cdot R_V \cos\beta_{i0}] \quad (4.60)$$

En las expresiones anteriores z es el número de palas de la turbina y β_{i0} es el ángulo hidrodinámico de paso del fluido.

De (4.60) se deduce que $Q(r)$ crece cuando β_{i0} crece y esto sucede cuando ΔV_1 decrece como se deduce de la figura anterior. Se concluye nuevamente que para aumentar el rendimiento de la turbina interesa conseguir un valor de ε elevado.

Para el cálculo de la velocidad inducida angular se supondrá que se trata de un fluido ideal y por lo tanto de (4.60) se obtiene:

$$Q(r) = r \cdot \tan\beta_{i0} T(r) = \frac{r(V - \Delta V_1)}{r(\omega - \Delta\omega_1)} \cdot T(r) = \frac{T(r) \cdot (V - \Delta V_1)}{(\omega - \Delta\omega_1)} \quad (4.61)$$

Elevando (4.59) al cuadrado y sustituyendo en ella (4.61) se obtiene:

$$\Delta\omega_1^2 2\pi r^3 \rho (V - \Delta V_1) = T(r)(V - \Delta V_1) - \frac{T(r)(V - \Delta V_1)}{\omega - \Delta\omega_1}$$

$$\Delta\omega_1^2 2\pi r^3 \rho = \frac{T(r)(\omega + \Delta\omega_1 - \omega)}{(\omega - \Delta\omega_1)} = \frac{T(r)\Delta\omega_1}{(\omega - \Delta\omega_1)}$$

$$\Delta\omega_1(\omega - \Delta\omega_1) = \frac{T(r)}{2\pi\rho r^3}$$

$$\Delta\omega_1^2 - \Delta\omega_1 \cdot \omega + \frac{T(r)}{2\pi\rho r^3} = 0$$

Por tanto, la velocidad angular inducida en el fluido a su paso por el disco actuador se deduce mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\omega_1 = \frac{\omega - \left(\omega^2 - \frac{2T(r)}{\pi\rho r^3}\right)^{1/2}}{2} \quad (4.62)$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Al aplicar la teoría del perfil equivalente las expresiones anteriores se particularizan para el radio $r = 0,7D/2$, siendo D el diámetro de la turbina.

4.2.2. Consideraciones de interés sobre los desarrollos teóricos precedentes

En el apartado precedente se dedujo que el empuje máximo T_M que la vena fluida podía ejercer sobre la turbina (4.53) es:

$$T_M = \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) A$$

La potencia máxima expresada en CV, que la turbina puede recibir de la vena fluida es:

$$W_M = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) V}{75} \quad (4.63)$$

Las pérdidas por desprendimiento de flujo y las debidas al factor de obstrucción de la turbina (núcleo y palas) hacen que el empuje neto T_A que la turbina recibe de la vena fluida sea una fracción de T_M , definida ésta, mediante el coeficiente K que se podría definir como coeficiente de obstrucción de la vena fluida.

Es evidente que el factor de obstrucción K de una batería de turbinas axiales sería superior al correspondiente de una turbina aislada.

De las manifestaciones precedentes se ha de concluir que se puede establecer:

$$T_A = K \cdot T_M \quad (4.64)$$

K es un coeficiente de naturaleza empírica.

Para poder aplicar la teoría del perfil equivalente es preciso relacionar el empuje por unidad radial T_7 , que se desea que la estación anular de la turbina ejerza sobre la vena fluida, con el empuje absoluto T_A .

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

El rendimiento meramente hidrodinámico η_H de la turbina según la teoría del perfil equivalente, es:

$$\eta_H = \frac{Q_7 \cdot \omega}{T_7(V - \Delta V_1)} \quad (4.65)$$

El trabajo útil es la energía por unidad de tiempo que la turbina entrega a la línea de ejes. Es decir, el numerador del segundo miembro de la expresión (4.65).

La energía que la turbina recibe de la vena fluida es obviamente el denominador del segundo miembro de la expresión (4.65).

El rendimiento η_H debe de ser menor que 1, pero en ocasiones, el valor de η_H obtenido mediante el proceso de cálculo descrito puede resultar superior a la unidad, y este hecho es indicio de que se está ante una solución matemática por ser el denominador demasiado bajo frente a Q_7 y ω .

Para obviar este inconveniente se debe incrementar D. Si es necesario también se ha de actuar sobre el valor de la constante K.

La constante K es en cierta manera un coeficiente indicativo de la calidad de la instalación de la turbina.

*Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas***5. PREDISEÑO DE UNA TURBINA DE CORRIENTE MARINA**

A continuación se procederá al cálculo de un prediseño de una turbina de corrientes marinas siguiendo los pasos del artículo mencionado en la referencia [13] y adaptando la NTI a turbinas marinas [12].

Para hacer el prediseño seguiremos el ejemplo expuesto en [13] de una turbina de eje horizontal de 300kW de potencia a una velocidad de corriente de 5,5 nudos que equivalen a 2,8292 m/s, unas revoluciones del rotor de 20 rpm, un diámetro del rotor de 11m, con un coeficiente K (C_p) de 0,35 y una densidad del fluido de 1025 Kg/m³.

El primer cálculo a realizar será el empuje máximo que nos puede dar una turbina de eje horizontal con las características mencionadas anteriormente, para esto nos apoyaremos en la ecuación (4.53):

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 11^2}{4} = 95,033 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$T_M = \left(\frac{\rho V^2}{2}\right) A = \left(\frac{1025 \cdot 2,8292^2}{9,81 \cdot 2}\right) \cdot 95,033$$

$$T_M = 39739,959 \text{ (Kg)}$$

A continuación aplicando el coeficiente K en la ecuación (4.64) tenemos que el empuje neto que recibe una turbina de la vena fluida:

$$T_A = K \cdot T_M = 0,35 \cdot 39739,959$$

$$T_A = 13908,986 \text{ (Kg)}$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Antes de seguir con el procedimiento de cálculo de la geometría de la turbina calcularemos la potencia que se puede extraer la turbina de la vena fluida, para eso aplicaremos la expresión (4.63):

$$W_M = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) V}{75} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1025}{9,81} \cdot 2,8292^2 \cdot \left(\frac{\pi 11^2}{4} \right) \cdot 2,8292}{75}$$

$$W_M = 1499,097 \quad (CV)$$

Para saber qué potencia neta puede otorgar la turbina de la vena fluida le aplicaremos el factor K y además de eso pasaremos de CV a KW, para dar el resultado en unidades internacionales y son más familiares para nuestro sistema de medida:

$$W_A = 1499,097 \cdot 0,35 \cdot 0,735$$

$$W_A = 385,904 \quad (KW)$$

Otra apreciación que se deberá hacer es que la división de la pala será de 10 secciones siendo las dos primeras correspondientes al núcleo del rotor, y por consiguiente no tendrán efecto alguno en la producción de energía.

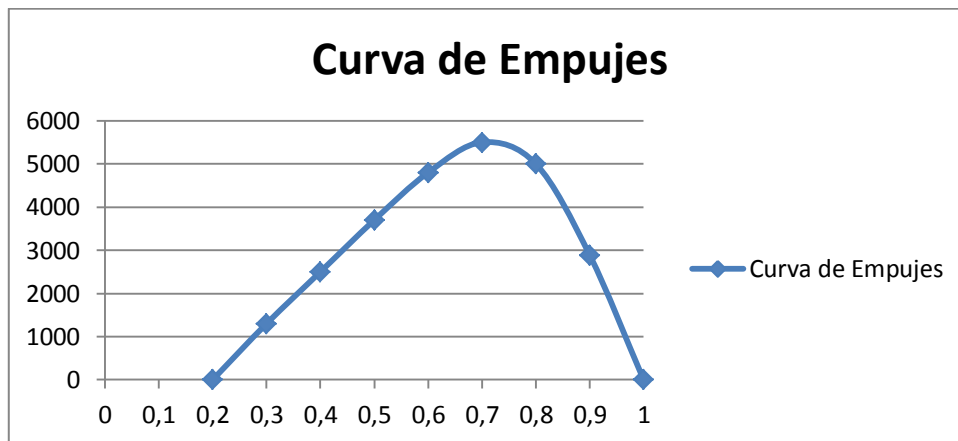
Una vez dividida la pala en 10 secciones tenemos que definir la curva de empujes que tendrá nuestra pala, haciendo referencia a los apuntes de Bienvenido Alonso Pardo [12] esta curva deberá ser una curva continua y de forma suave, con un máximo en la sección 0,7 o 0,8 de la pala y normalmente con valor cero en la sección 0,2R y 1R (salvo diseños no comunes). Esta curva de empujes representa la distribución del empuje que absorbe la pala en cada sección, integrando esta curva a lo largo de la pala (área encerrada debajo de la curva que forma la propia curva con el eje) deberá tener un valor idéntico al obtenido por la expresión anterior. Esta curva se obtiene en principio asignando valores en cada sección hasta conseguir una

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

curva suave y de máximo valor en 0,7. La distribución de la curva de empujes propuesta para este trabajo es la siguiente:

Sección	Radio (m)	Ti (Kg·m)	FS	Ti·FS
0,2	1,1	0	1	0
0,3	1,65	1300	4	5200
0,4	2,2	2500	2	5000
0,5	2,75	3700	4	14800
0,6	3,3	4800	2	9600
0,7	3,85	5500	4	22000
0,8	4,4	5000	2	10000
0,9	4,95	2886	4	11544
1	5,5	0	1	0
			Ti	14326,4
			T (ideal)	14326,25

La curva de empujes final se ha obtenido mediante el método de Simpson, bajo la primera regla, el resultado gráfico de esta curva muestra una curva suave, cerrada por ambos extremos y con un máximo en 0,7R:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

De las ecuaciones (4.60) podemos obtener el empuje total y el par total de la turbina, que serán estos dos valores los que nos darán el rendimiento hidrodinámico de la turbina:

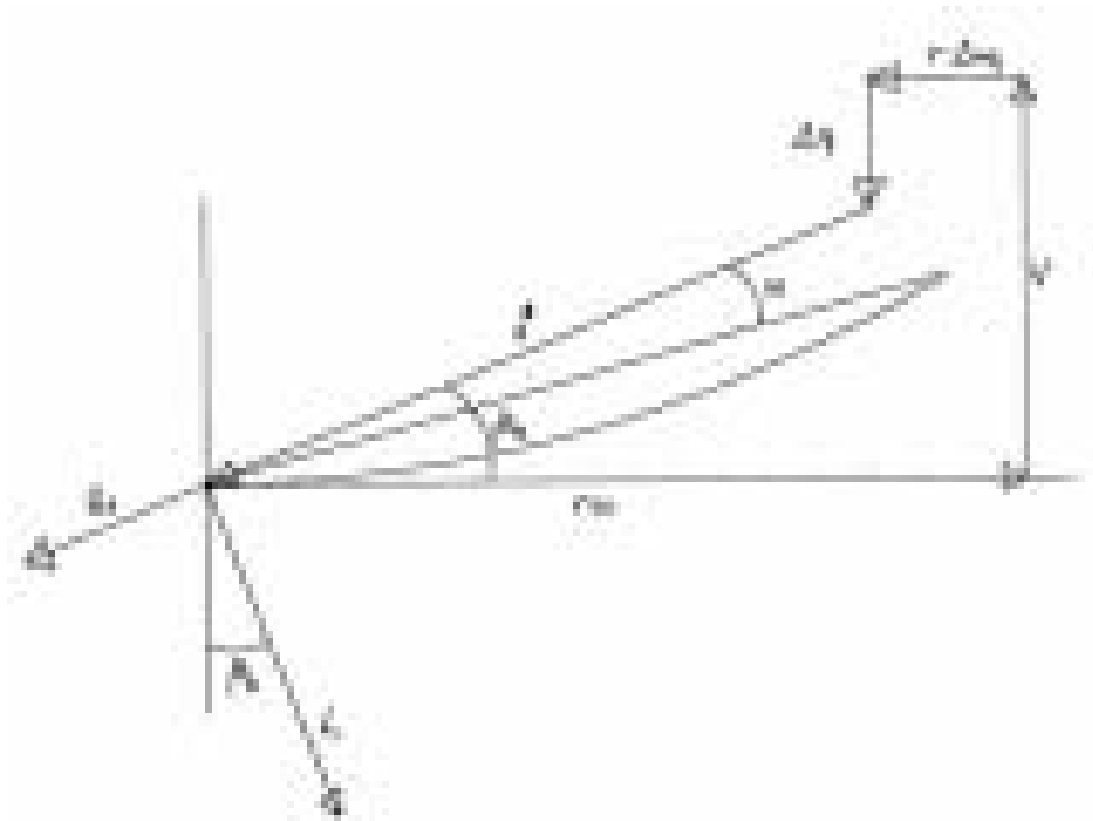
$$T(r) = L(r)\cos\beta_{i0} + Z \cdot R_V \text{sen}\beta_{i0}$$

$$Q(r) = r[L(r)\text{sen}\beta_{i0} - Z \cdot R_V \cos\beta_{i0}]$$

Siendo el rendimiento hidrodinámico la relación entre estos dos valores sin particularizar sobre $0,7R$ como hace la ecuación (4.65), en algunos casos la sección $0,7R$ según la teoría del perfil equivalente [12] es un valor representativo para toda la turbina, en nuestro caso calcularemos el rendimiento hidrodinámico de toda la pala:

$$\eta_H = \frac{Q \cdot \omega}{T \cdot (V - \Delta V_1)}$$

Para obtener el valor del par de la turbina (Q) deberemos primero saber qué ángulo β_{i0} existe en cada sección, este ángulo es el ángulo que forman el polígono de velocidades de la pala:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Calcularemos el ángulo que forma el polígono de velocidades para cada sección:

$$\tan \beta_{io} = \frac{V - \Delta V_1}{r \cdot \omega - r \cdot \Delta \omega_1}$$

Para calcular este ángulo deberemos primero calcular la velocidad del fluido aguas arriba del disco actuador que forma el rotor (4.52), como así también su velocidad angular y velocidad angular inducida (4.62):

Siendo la velocidad del fluido aguas arriba para cada sección:

$$\Delta V_1 = V - \left(V^2 - \frac{(1 - \varepsilon)2T}{\rho A} \right)^{1/2}$$

Siendo ε igual a 0,25 que nos dice que la turbina no está moderadamente cargada [13].

La velocidad angular de cada sección:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Siendo las n las revoluciones por segundo del rotor.

La velocidad angular inducida de cada sección será:

$$\Delta\omega_1 = \frac{\omega - \left(\omega^2 - \frac{2T(r)}{\pi\rho r^3}\right)^{1/2}}{2}$$

Una vez calculada la velocidad del fluido aguas arriba deberemos hacer la comprobación de que si la velocidad del fluido aguas arriba es superior a la mitad de la velocidad del fluido aguas abajo (4.49), una vez hecho esta comparación seleccionaremos la mayor velocidad obtenida de la comparación para cada sección para tomar este valor como el de la velocidad aguas arriba (ΔV_1):

$$\Delta V_1 = \frac{\Delta V_2}{2}$$

Donde la velocidad aguas abajo será:

$$\Delta V_2 = V - \left(V^2 - \frac{2T}{\rho A}\right)^{1/2}$$

A continuación se muestra una tabla con los cálculos referente a las velocidades aguas arriba y aguas abajo, para finalmente obtener la velocidad aguas arriba útil, en nuestro caso se mantiene que en todas las secciones la velocidad aguas arriba (ΔV_1) iniciales son las que utilizaremos para los cálculos de los ángulos del polígono de velocidades:

Sección	Radio (m)	ΔV_2	ΔV_1	$\Delta V_2/2$	ΔV_1 útil
0,2	1,1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,3	1,65	0,0467	0,0349	0,0233	0,0349
0,4	2,2	0,0904	0,0675	0,0452	0,0675
0,5	2,75	0,1349	0,1006	0,0675	0,1006
0,6	3,3	0,1764	0,1312	0,0882	0,1312
0,7	3,85	0,2031	0,1509	0,1015	0,1509
0,8	4,4	0,1840	0,1368	0,0920	0,1368
0,9	4,95	0,1047	0,0781	0,0523	0,0781
1	5,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

La velocidad angular del rotor es:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{20}{60} = 2,094 \text{ (1/s)}$$

Y las velocidades angulares inducidas de cada sección se muestran en la siguiente tabla:

Sección	Radio (m)	$\Delta\omega_1$
0,2	1,1	0,0000
0,3	1,65	0,2374
0,4	2,2	0,1876
0,5	2,75	0,1386
0,6	3,3	0,1021
0,7	3,85	0,0726
0,8	4,4	0,0436
0,9	4,95	0,0175
1	5,5	0,0000

Una vez calculadas las velocidades propias del polígono de velocidad de cada sección de la pala calcularemos el ángulo que produce dicho polígono:

Sección	Radio (m)	$\text{tg}\beta_{io}$	$\beta_{io}(\text{rad})$	$\beta(\text{grad})$
0,2	1,1	1,2280	0,8874	50,8439
0,3	1,65	0,9119	0,7394	42,3637
0,4	2,2	0,6583	0,5822	33,3573
0,5	2,75	0,5073	0,4695	26,8995
0,6	3,3	0,4104	0,3894	22,3120
0,7	3,85	0,3441	0,3314	18,9878
0,8	4,4	0,2984	0,2900	16,6139
0,9	4,95	0,2676	0,2615	14,9809
1	5,5	0,2456	0,2408	13,7997

Antes de seguir con los cálculos para obtener el rendimiento hidrodinámico de la turbina deberemos obtener el valor de la componente de arrastre (R_v) y la de sustentación (L) de cada sección de la pala.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Empezaremos el proceso de obtención de las componentes del perfil calculando el coeficiente de arrastre (C_D en los apuntes de Bienvenido Alonso Pardo [12]), este coeficiente de arrastre lo calcularemos mediante el procedimiento de Caster, Diskin y Lafone [12] y su ecuación es la siguiente:

$$C_{Dmin} = C_{F0} \left[1 + 1,25 \left(\frac{t}{Cr} \right) + 125 \left(\frac{t}{Cr} \right)^4 \right]$$

Siendo (t/Cr) la relación espesor/cuerda de cada sección de la pala del rotor.

Donde C_{F0} es:

$$C_{F0} = [8,040 - 4,040 \times 10^{-8} \cdot Rn] \times 10^{-3}$$

Y donde Rn es:

$$Rn = \frac{V_r \cdot Cr}{\nu}$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del fluido (en agua salada a 15°C es $1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) y V_r es la velocidad del fluido igual a la hipotenusa del polígono de velocidades de la pala en cada sección.

Para la relación espesor/cuerda se ha escogido el procedimiento descrito en los apuntes de Bienvenido Alonso Pardo de Geometría de la Serie B de Wageningen [14] siguiendo la filosofía de la semejanza de las turbinas de eje horizontal con la hélice de un buque.

Para la cuerda de cada sección de la pala se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

$$Cr = \frac{K \cdot D \cdot A_E/A_0}{Z}$$

Donde la relación A_E/A_0 es la relación área expandida/área disco y Z es el número de palas que tiene el rotor, según la referencia [13] A_E/A_0 es igual a 0,2 y Z es igual a 2.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

K es una constante del contorno de las palas de la serie B de Wageningen y atienden a los valores de la siguiente tabla:

r/R	K(r)
0.2	1.662
0.3	1.882
0.4	2.050
0.5	2.152
0.6	2.187
0.7	2.144
0.8	1.970
0.9	1.582

Para calcular los espesores de cada sección de nuestra pala seguiremos el procedimiento descrito en [14] y su expresión es:

$$\frac{t_{m\acute{a}x}}{D} = A - B \cdot Z$$

Los coeficientes A y B los encontramos en la siguiente tabla incluida en [14]:

r/R	A(r)	B(r)
0.2	0.0526	0.0040
0.3	0.0464	0.0035
0.4	0.0402	0.0030
0.5	0.0340	0.0025
0.6	0.0278	0.0020
0.7	0.0216	0.0015
0.8	0.0154	0.0010
0.9	0.0092	0.0005
1.0	0.0032	0.0000

Despejando de esta última ecuación $t_{m\acute{a}x}$ y luego dividiendo C_r obtenida anteriormente por este último valor tenemos la relación espesor/cuerda, para finalmente poder calcular el coeficiente de arrastre C_D en cada sección.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Una vez calculados todos los valores para obtener el coeficiente de arrastre C_D podemos calcular la fuerza actuante de resistencia de cada sección (en la referencia [12] se denota como dD a esta resistencia, que en el caso de la referencia [13] y en el nuestro es R_v) del modo que se describe en [12] con la siguiente expresión:

$$dD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_r^2 \cdot Cr \cdot C_D$$

En las tablas siguientes se muestran los valores obtenidos del proceso de cálculo del C_{RV} y la posterior fuerza actuante R_v :

Sección	K(r)	Cr	Ar	Br	tmax/D	tmax
0,2	1,662	1,8282	0,0526	0,0040	0,0446	0,4906
0,3	1,882	2,0702	0,0464	0,0035	0,0394	0,4334
0,4	2,05	2,255	0,0402	0,0030	0,0342	0,3762
0,5	2,152	2,3672	0,0340	0,0025	0,029	0,319
0,6	2,187	2,4057	0,0278	0,0020	0,0238	0,2618
0,7	2,144	2,3584	0,0216	0,0015	0,0186	0,2046
0,8	1,97	2,167	0,0154	0,0010	0,0134	0,1474
0,9	1,582	1,7402	0,0092	0,0005	0,0082	0,0902
1	0	0	0,0032	0,0000	0,0032	0,0352

Sección	tmax/C	Vr	Rn	Cf0	CRv	Rv
0,2	0,2684	2,8525	4,39E+0	7,86E-0	0,0156	0,0000
0,3	0,2094	3,4904	6,08E+0	7,79E-0	0,0117	15,423
0,4	0,1668	4,5122	8,56E+0	7,69E-0	0,0100	24,089
0,5	0,1348	5,6265	1,12E+0	7,59E-0	0,0092	35,931
0,6	0,1088	6,7766	1,37E+0	7,49E-0	0,0086	49,837
0,7	0,0868	7,9540	1,58E+0	7,40E-0	0,0083	64,365
0,8	0,0680	9,1715	1,67E+0	7,36E-0	0,0080	76,277
0,9	0,0518	10,413	1,53E+0	7,42E-0	0,0079	78,000
1	0,0000	11,641	0,00E+0	8,04E-0	0,0000	0,0000

Ahora que tenemos el valor de R_v tenemos que calcular el valor de L para poder calcular el par que nos entrega la turbina y su rendimiento hidrodinámico.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

El proceso de cálculo de L será un proceso iterativo, en primer lugar haremos la simplificación de que se trata de un fluido ideal, esto conlleva a que se desprecian los efectos viscosos del fluido que implica que la resistencia R_v es nula [12]. La ecuación de la fuerza de sustentación en cada sección [13] adaptada a las turbinas queda de la siguiente forma:

$$T(r) = L(r)\cos\beta_{i0} + Z \cdot R_v \cdot \text{sen}\beta_{i0}$$

$$T(r) = L(r)\cos\beta_{i0}$$

$$L(r) = \frac{T(r)}{\cos\beta_{i0}}$$

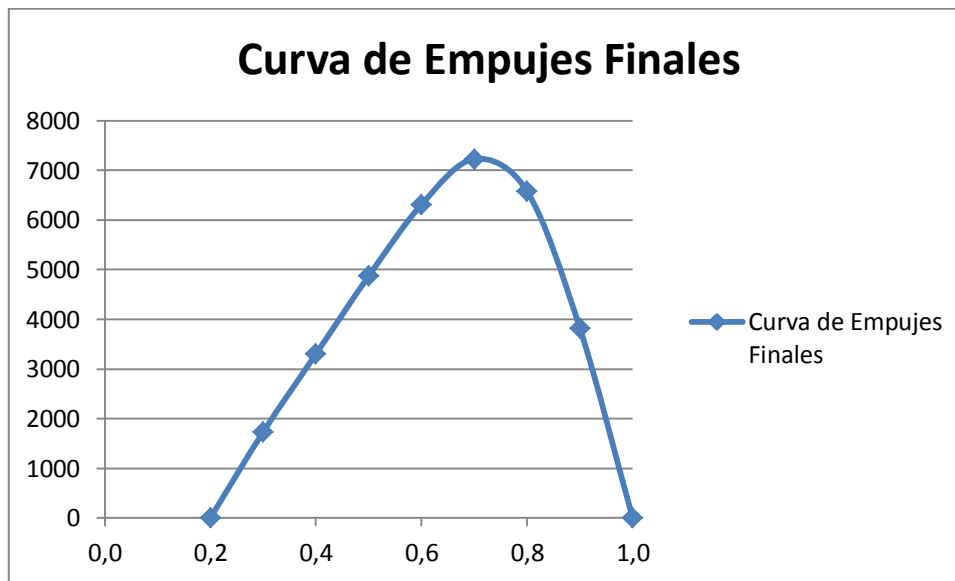
Una vez obtenida la fuerza de sustentación en cada sección volvemos a aplicar la ecuación (4.60) del empuje que proporciona el fluido en cada sección del rotor.

$$T(r) = L(r)\cos\beta_{i0} + Z \cdot R_v \cdot \text{sen}\beta_{i0}$$

Una vez integrado por Simpson la curva de empujes vemos si el resultado ha variado en más de un kilogramo, si es así, volvemos a calcular de nuevo la fuerza de sustentación L aplicando al nuevo empuje en cada sección de la pala $T(r)$ un coeficiente corrector, que no es más que dividir el resultado que nos ha dado la curva de empujes al integrar con el valor de nuestra curva de empujes inicial (la que hemos diseñado), este coeficiente es de cierta manera una proporción de lo que ha variado el empuje total. Tras varias iteraciones siguiendo los pasos anteriores nos convergerá en un resultado válido ($T_i(r) - T_{i-1}(r) \leq 1\text{kg}$).

El resultado obtenido de la curva de empujes será nuestra nueva distribución de empujes a lo largo de la pala, además también obtendremos el valor de la fuerza de sustentación en cada sección. En la gráfica siguiente se muestra nuestra nueva distribución de empujes:

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas



Una vez que tengamos las fuerzas de sustentación y de arrastre en cada sección podremos calcular cual es el par entregado por el fluido a la turbina en cada sección según la ecuación (4.60):

$$Q(r) = r[L(r)\text{sen}\beta_{i0} - Z \cdot R_V \text{cos}\beta_{i0}]$$

Cuando tengamos calculados el empuje y par en cada sección podemos calcular el rendimiento hidrodinámico de cada una de las secciones de la pala con la ecuación (4.65):

$$\eta_H = \frac{Q \cdot \omega}{T \cdot (V - \Delta V_1)}$$

En las tablas siguientes se muestran los datos de la última iteración para obtener L(r), así como el par en cada sección y su rendimiento:

Sección	Radio (m)	T ideal(r)	L(r)	T(r)	FS	FS·T(r)
0,2	1,10	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000
0,3	1,65	1287,377	1742,316	1308,163	4	5232,6521
0,4	2,20	2475,726	2964,028	2502,218	2	5004,4375
0,5	2,75	3664,075	4108,621	3696,588	4	14786,3530
0,6	3,30	4753,395	5138,082	4791,236	2	9582,4737
0,7	3,85	5446,598	5760,012	5488,483	4	21953,9320
0,8	4,40	4951,453	5167,165	4995,071	2	9990,1434
0,9	4,95	2857,978	2958,532	2898,304	4	11593,2180

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

1,0	5,50	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000
						14326,255
						14326,255
						CUMPLE

Sección	Radio (m)	Q(r)	FS·Q(r)	Q(r)·w	T(r)·(V-ΔV)	ηH(r)
0,2	1,10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,3	1,65	1899,527	7598,110	3978,361	3597,291	1,1059
0,4	2,20	3497,022	6994,044	7324,146	6837,091	1,0712
0,5	2,75	4935,597	19742,39	10337,09	9997,915	1,0339
0,6	3,30	6132,923	12265,84	12844,76	12824,71	1,0016
0,7	3,85	6746,700	26986,80	14130,25	14587,85	0,9686
0,8	4,40	5857,336	11714,67	12267,57	13331,32	0,9202
0,9	4,95	3039,654	12158,61	6366,236	7862,508	0,8097
1,0	5,50	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
						17867,75

El rendimiento de esta turbina se expresa mediante la ecuación (4.65) empleando el empuje total y el par total obtenido:

$$\eta_H = \frac{Q \cdot \omega}{T \cdot (V)} = \frac{17867,7556 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (20/60)}{14325,2552 \cdot 2,8282}$$

$$\eta_H = 0,9233$$

*Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas***6. CONCLUSIONES**

Según la referencia [13] si en alguna sección de la pala se registra un rendimiento hidráulico mayor de 1 es una situación irreal, puesto que el par que genera el fluido es mayor que el empuje que recibe el rotor de dicho fluido, condición que no es válida físicamente.

Para que esto no suceda Gonzálo Pérez Gómez [13] nos remarca que podemos modificar el diámetro del roto o bien su constante K (C_p).

En nuestro caso modificaremos el diámetro de la pala, lo que conllevará un mayor empuje y posteriormente una mayor potencia.

Se ha ido iterando desde los 11m que inicialmente se expuso en la referencia [13] en intervalos de 0,5m hasta encontrar el diámetro óptimo para este tipo de pala y características.

El nuevo parámetro de diámetro será de 14,5m, manteniendo los demás parámetros iguales que en el cálculo del apartado anterior, esto nos proporcionará un empuje y potencia de:

$$T_A = 24168,299 \quad (Kg)$$

$$W_A = 670,549 \quad (KW)$$

Siguiente un procedimiento análogo descrito en el apartado anterior obtenemos los siguientes rendimientos hidrodinámicos de cada sección de la pala:

Sección	Radio (m)	$\eta_H(r)$
0,2	1,45	0,0000
0,3	2,18	0,9913
0,4	2,90	0,9711

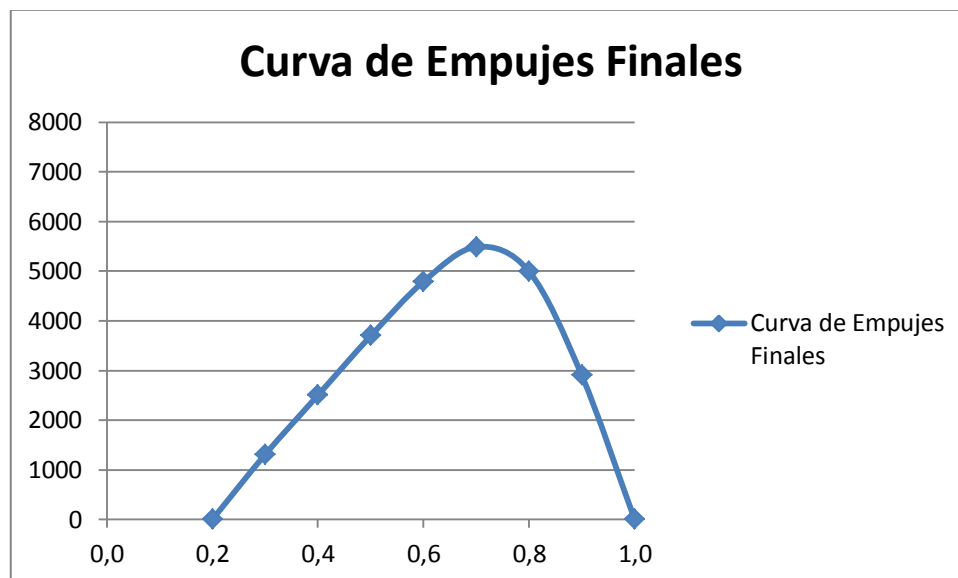
Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

0,5	3,63	0,9415
0,6	4,35	0,9087
0,7	5,08	0,8675
0,8	5,80	0,7915
0,9	6,53	0,5747
1,0	7,25	0,0000

Con un rendimiento hidrodinámico total de la turbina de:

$$\eta_H = 0,819$$

Y una distribución de empujes de la siguiente forma:



El rendimiento se ve que baja un 10% respecto al cálculo inicial, pero partiendo de la base que son unos cálculos irreales, podemos decir que el rendimiento obtenido en este último cálculo es un rendimiento aceptable para una primera aproximación del prediseño de una turbina de eje horizontal de corrientes marinas.

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

Otra apreciación es que con solo aumentar en un 30% el diámetro obtenemos una potencia de alrededor un 75% más.

Para finalizar el estudio se ha elaborado el cálculo de la potencia que se podría extraer en un año de una sola turbina de estas características, suponiendo un factor de trabajo de un 45% según [9], la potencia anual de esta turbina es:

$$h_{\text{útiles}} = 24 \cdot 365 \cdot 0.45 = 3942 \text{ (horas/año)}$$

$$P_{\text{anual}} = 670,549 \cdot 3942 = 2643304,158 \text{ (KW/año)}$$

$$P_{\text{anual}} = 2,643 \text{ (GW/año)}$$

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.S. Bahaj, L.E. Myers, Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production, *Renewable Energy* 28 (2003) 2205–2211
- [2] Centro Europeo de Energía Marina <http://www.emec.org.uk>
- [3] RenewableUK The voice of wind & marine energy “Marine Energy in the UK, State of the industry report 2012” March 2012. http://www.bwea.com/pdf/publications/SOI_2012.pdf
- [4] Centro Nacional de Energías Renovables de Reino Unido (Narec –*National Renewable Center*) <http://www.narec.co.uk/>
- [5] Pedro Fernández Díez, Apuntes de Energía Maremotriz. <http://es.libros.redsauce.net>
- [6] Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources: Atlas Pages. A Strategic Environmental Assessment Report. March 2008 [www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable Atlas Pages A4 April08.pdf](http://www.renewables-atlas.info/downloads/documents/Renewable%20Atlas%20Pages%20A4%20April08.pdf)
- [7] Pedro Fernández Díez, Apuntes de Energía de las Corrientes Marinas <http://libros.redsauce.net>
- [8] Artículo de RenewableUK http://www.bwea.com/pdf/28proceedings/Tues_Lomond_Verdi.pdf
- [9] Artículo de RenewableUK <http://www.bwea.com/pdf/tidalconf/Frankel.pdf>
- [10] Ayuntamiento de Cardiff <http://www.cardiff.gov.uk>
- [11] Juan Manuel Juanes González, tesis doctoral
- [12] Bienvenido Alonso Pardo, profesor ETSINO de la UPCT. “Apuntes Hidrodinámica, Resistencia y Propulsión, 5º Curso Ingeniería Naval y Oceánica de UPCT, Tema 17: Diseño de hélices por cálculo directo”

Estudio de la generación energética con turbinas hidráulicas en las corrientes marinas

[13] Gonzalo Pérez Gómez, Doctor Ingeniero Naval , Juan González-Adalid, Ingeniero Naval,

“Aplicación de la nueva teoría de la impulsión para el diseño de turbinas axiales y

generadores eólicos” Revista Ingeniería Naval, Diciembre 2003 (117-120)

[14] Bienvenido Alonso Pardo, profesor ETSINO de la UPCT. “Apuntes Hidrodinámica,

Resistencia y Propulsión, 5º Curso Ingeniería Naval y Oceánica de UPCT, Apéndice A:

Geometría de la Serie B de Wageningen”