

MÁSTER UNIVERSITARIO EN MARINA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

NUEVO DISPOSITIVO DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

**Alumno
Director
Departamento
Curso académico**

***Urtaran Lavín, Egoitz
Solaetxe Gómez, Miguel Ángel
Construcción naval
2018-2019***

Bilbao, junio, 2019

Resumen

Castellano

Mediante este trabajo se trata de calcular y analizar la extracción de la mayor cantidad de energía undimotriz posible empleando un buque offshore para más adelante poder ceder electricidad o a otros buques. Para llevar a cabo el trabajo se ha tenido que completar un estudio de la zona donde se quiere colocar el buque y también de los diseños del buque y de las máquinas eléctricas. Además, para realizar todo esto, se ha buscado una zona adecuada mediante cartas náuticas e historiales de oleajes, y también, se han empleado diversos programas de ordenador como son el Microsoft Excel, MAXSURF y LabVIEW, entre otros. Las máquinas eléctricas dan como resultado una potencia elevada, entre 350 y 800kW, extraída del oleaje. En el caso de los cálculos referidos al buque, se ve que es capaz de aguantar ese tipo de oleaje con una buena estabilidad. Por ello se observa que, con este sistema de extracción de energía, se puede llegar a conseguir una mayor cantidad de energía eléctrica en comparación con otros métodos de extracción que existen en este campo, pudiendo ser un sistema de extracción de energía eléctrica renovable con mucho futuro, ya que se puede colocar en diversos puntos del planeta teniendo un gran rendimiento.

Euskera

Lan honen bidez offshore itsasontzi batekin olatuen energiari gehien ateratzeko kalkuluak eta azterketak egin nahi dira, gero energia beste itsasontzietan emateko. Lora burutzeko, itsasontzia kokatu nahi den lekuaren azterketa eta itsasontziaren eta makina elektrikoaren diseinuak egin behar dira. Gainera, hori egiteko, karta nautikoen eta olatuen historikoen bitartez eremurik hoberenaren azterketa egiten da, eta hainbat ordenagailu programa erabiltzen dira, besteak beste, Microsoft Excel, MAXSURF eta LabVIEW. Makina elektrikoek olatuetatik atera daitezkeen potentzia 350 eta 800 kW arteko balioa ematen du. Itsasontziari egindako kalkuluen kasuan, olatu mota horiek jasateko gai dela ikusten da, eta egonkortasun onarekin. Horregatik, olatuetatik energia ateratzeko sistema honekin, energia elektriko kopuru handiagoa lortu daiteke eremu berdinean dauden beste sistema batzuekin alderatuta. Kontuan izanda sistema hau errendimendu handia izan dezakeela eta munduko leku askotan kokatu daitekeela,

sistema honek, energia berriztagarrien erauzketan etorkizun handia izan dezake.

Inglés

This work tries to calculate and analyze the extraction of as much wave energy as possible using an offshore vessel to later on, transfer electricity to other vessels. To carry out the work has had to complete a study of the area where wants to place the ship and also the designs of the ship and electrical machines. In addition, to do all this, we have searched for a suitable area by nautical charts and wave histories, and also, have used many computer programs such as Microsoft Excel, MAXSURF and LabVIEW, among others. The electric machines result in a high power, between 350 and 800kW, extracted from the waves. In the case of the calculations referred to the ship, it is seen that it is able to withstand that type of waves with good stability. For this reason, it is observed that, with this energy extraction system, it is possible to achieve a greater amount of electric energy in comparison with other extraction methods that exist in this field, being able to be a renewable electric energy extraction system with much future, since it can be placed in different parts of the planet having a great performance.

Palabras clave

Buque: Barco con cubierta que, por su tamaño, solidez y fuerza, es adecuado para navegaciones de importancia.

Energía undimotriz: Es la energía que permite la obtención de electricidad a partir de energía mecánica generada por el movimiento de las olas.

Offshore: Termino del idioma ingles que significa "en el mar, alejado de la costa" o "ultramar".

Rotor o traslator: Pieza de una máquina electromagnética que gira o se traslada dentro de un elemento fijo.

Estator: Circuito fijo de las dinamos y motores eléctricos, dentro del cual gira o se traslada el movimiento móvil o rotor.

Bobina: También llamado inductor por su forma de espiras de alambre arrollados. Almacena energía en forma de campo magnético.

Índice

Resumen	1
Castellano	1
Euskera	1
Inglés	2
Palabras clave	2
Índice de figuras	5
Índice de tablas	8
1. Memoria	9
1.1. Introducción	10
1.2. Objetivos	12
1.3. Beneficios del proyecto	12
2. Estado del arte	14
2.1. Historia de la energía	15
2.2. Energías alternativas	16
2.3. Energía eólica	17
2.4. Energías renovables procedentes del mar	20
2.5. Energía undimotriz u olamotriz	22
2.5.1. Dispositivo de OCEANTEC	30
2.6. Generador eléctrico	31
2.6.1. Generadores eléctricos rotativos	32
2.6.2. Generador lineal	34
2.7. Almacenamiento de energía	35
3. Material y métodos	37
3.1. Materiales	38
3.1.1. Google Earth	38
3.1.2. Microsoft Excel	39
3.1.3. LabVIEW	40
3.1.4. MAXSURF	41
3.2 Metodología	44
3.2.1. Localización	45
3.2.2. Estudio del oleaje	48
3.2.3. Máquina eléctrica	54

3.2.4. Aerogenerador.....	59
3.2.5. Almacenamiento de energía	61
3.2.6. Buque.....	63
4. Resultados.....	66
4.1. Potencia extraída según característica de oleaje.....	67
4.2. Características de la máquina eléctrica	68
4.3. Diseño, estabilidad y simulación del buque	70
5. Discusión de los resultados.....	75
5.1. Ventajas.....	76
5.2. Desventajas	77
5.3. Discusión	77
6. Conclusiones	78
7. Bibliografía.....	80
7.1. Texto	81
7.2. Figuras	85

Índice de figuras

Figura 1: Evolución del consumo de diferentes elementos para la obtención de energía (66).....	15
Figura 2: Clasificación de las energías alternativas	16
Figura 3: Partes internas del aerogenerador (67).....	18
Figura 4: Aerogeneradores: Izquierda, eje horizontal y derecha, eje vertical (68)	19
Figura 5: Simulación de una granja aerogeneradores "Vortex Bladeless" (69).....	20
Figura 6: Central mareomotriz de Francia, rio Rance (70).....	20
Figura 7: Corrientes marinas del mundo y método para extraer su energía (71) (72)	21
Figura 8: Mapa de potencia (kW) por metro de frente de ola del mundo (73).....	22
Figura 9: Esquema de funcionamiento de un OWC (74)	23
Figura 10: Esquema de extracción de energía undimotriz TAPCHAN (75).....	24
Figura 11: Simulación de una granja de Wave Roller (76).....	24
Figura 12: Convertidor de energía Oyster y su planta de conversión en tierra (77) ..	25
Figura 13: Esquema de funcionamiento del Wave Dragon (78).....	25
Figura 14: Wave Dragon en el mar (79).....	26
Figura 15: Serpiente marina, Pelamis (80)	26
Figura 16: Simulación de una granja de AWS en la que se distinguen los dos cilindros (81).....	27
Figura 17: Esquema de funcionamiento de un AWS (82).....	27
Figura 18: Simulación de una Power Buoy (83)	28
Figura 19: Clasificación según ubicación en el mar (84).....	29
Figura 20: Clasificación según tamaño y orientación (85).....	29
Figura 21: Esquema de clasificación en función del principio de captación	30
Figura 22: Esquema del dispositivo giroscópico de la patente (22)	30
Figura 23: Modelo a escala 1:4 en las pruebas de mar del prototipo de TECNALIA (23)	31
Figura 24: Giro de espira en un campo magnético (B) para crear la fuerza electromotriz (fem) (86).....	32
Figura 25: Generadores síncronos. Izquierda, de polos salientes; derecha, rotor circular (87).....	33
Figura 26: Tipos de máquinas asíncronas. Arriba, rotor en jaula de ardilla; abajo, rotor bobinado (88).....	34
Figura 27: Obtención de un generador lineal a partir de un generador asíncrono trifásico (28)	34

Figura 28: Partes que constituyen un generador lineal de imanes permanentes (21)	35
Figura 29: Carga y descarga en baterías litio-aire (89)	35
Figura 30: Banco de supercapacitores (90)	36
Figura 31: Volante de inercia (91)	36
Figura 32: Globo terráqueo en Google Earth	38
Figura 33: Hoja de cálculo de Microsoft Excel 2016	39
Figura 34: Funciones de Microsoft Excel	39
Figura 35: Ejemplo de operación matemática con LabVIEW y muestra de controles y funciones, dependiendo de estar en el panel frontal o diagrama de bloques	40
Figura 36: Diferentes software de Maxsurf (47)	41
Figura 37: Modelado en el MAXSURF Modeler de un crucero	42
Figura 38: Análisis de los valores KN del crucero de la figura 37 en el MAXSURF Stability	42
Figura 39: A la izquierda todos los criterios para analizar en el MAXSURF Stability, seleccionando uno a la derecha muestra lo que ha de cumplir el buque	43
Figura 40: Simulación y resultados del crucero de la figura 37 en el MAXSURF Motions	43
Figura 41: Boyas oceanográficas en las que se mide el oleaje en la página web de "Puertos del Estado"	45
Figura 42: Potencia por metro de frente de ola en todo el mundo (92)	46
Figura 43: Batimetría del "Porcupine Bank" (93)	47
Figura 44: Posición del buque, sus coordenadas, batimetría y distancia de Galway y de las boyas SIMAR de donde se toman los datos del oleaje	48
Figura 45: Características de la ola como onda senoidal (94)	50
Figura 46: Triángulo rectángulo con las características de las olas (95)	51
Figura 47: Fuerzas que actúan sobre una masa estando en un plano inclinado (96)	52
Figura 48: Esquema del traslator y estator de la máquina eléctrica y medidas de los mismos (21)	55
Figura 49: Días de viento en escala Beaufort en 2018 por cada mes en Clifden, Irlanda (97)	60
Figura 50: Dimensiones del aerogenerador Kliux Zebra (58)	60
Figura 51: Gráfica de la energía anual generada (kWh) por media de viento (m/s) por el "Kliux Zebra" (58)	61
Figura 52: Baterías de litio de Leclanché (62)	62
Figura 53: Espiral de optimización del diseño del buque (47)	65

Figura 54: Panel frontal de LabVIEW donde se muestran resultados de los cálculos desarrollados en el diagrama de bloques 68

Figura 55: Diseño del buque en el MAXSURF Modeler y algunas de sus características 71

Figura 56: Resultados del cálculo de equilibrio del buque. Nueva línea de flotación y centro de gravedad..... 71

Figura 57: Curvas hidrostáticas del buque 72

Figura 58: Curvas KN a diferentes ángulos para diferentes desplazamientos del buque..... 72

Figura 59: Curva GZ del buque 72

Figura 60: Criterio de diseño A.749(18) 3.1.2.4: GMt inicial, que debe ser al menos de 0,15 metros y en este caso es de 3,057 metros..... 73

Figura 61: Gráfico de frecuencia de encuentro de las olas y efecto en la respuesta de oscilación del buque y el aumento de su resistencia 73

Figura 62: Simulación del buque con olas de diseño del mismo 74

Índice de tablas

Tabla 1: Datos de altura significativa y periodo de la ola de la boya SIMAR 1016112. Histórico de 1958 a octubre de 2018	49
Tabla 2: Datos de altura significativa y periodo de la ola de la boya SIMAR 1038116. Histórico de 1958 a 2018	49
Tabla 3: Datos de altura significativa y periodo de ola a partir de los históricos entre 1958 y 2018 de las boyas SIMAR 1016112 y 1038116	50
Tabla 4: Energía anual generada (kWh) por media de viento (m/s) por el "Kliux Zebra" (58)	61
Tabla 5: Potencia capaz de extraer con una máquina eléctrica para cada tipo de ola en KW	67
Tabla 6: Tiempo que la máquina eléctrica extraerá energía	68
Tabla 7: Resultados de parámetros de la máquina eléctrica	70

1. Memoria

1.1. Introducción

La energía undimotriz es la energía que permite la obtención de electricidad a partir de energía mecánica generada por el movimiento de las olas. Esta fuente de energía renovable puede tener un gran futuro debido a la gran potencia de las olas, en zonas alejadas del ecuador, y a la gran extensión de esas zonas que aún están sin explotar. Además de esto, en los siguientes años, las energías renovables van a ganar una gran importancia debido a la escasez de combustibles fósiles, que se espera que se agoten en las próximas décadas. Por ello, en este trabajo, se tratará de crear un nuevo método de extracción de esta energía en una de dichas zonas para dar energía a otros buques.

Una de las ventajas que tiene este tipo de energía renovable, es el que no ocupa espacio en tierra, donde encontrar un lugar correcto para otro tipo de energías renovables cada vez es más complicado debido a zonas protegidas y ciudades entre otras cosas. Al estar en alta mar tampoco molesta a la vista desde tierra ni a posibles bañistas que pudieran haber.

El lado negativo de este elemento es la posible afectación que pueda tener al tráfico marítimo, aunque si la idea es trasvasar la energía de un buque a otro puede ser una ventaja. Es por ello por lo que para este estudio se trata de encontrar una zona en la que haya tráfico marítimo. Aunque tampoco se pretende interrumpir el tráfico marítimo ni provoque desviaciones en la ruta de otros buques.

Por otra parte, es posible aprovechar la extracción energética undimotriz para almacenar y poder dar energía eléctrica a otros buques para el uso de la misma. También puede darse que, en un futuro, existan granjas de extracción de energía undimotriz empleando este método, pudiendo ser los buques de diferentes tamaños y en diferentes zonas del mundo, siempre que el oleaje sea suficiente como para extraer energía de ellas.

Para llevar a cabo el trabajo, inicialmente se partió de una idea teórica del nuevo sistema de extracción de energía. Esta idea inicial se ha basado en una mezcla de otros sistemas que no funcionaron o tienen otras aplicaciones.

Para conocer estos sistemas se ha hecho una búsqueda en la documentación de la extracción de energía eléctrica y undimotriz.

Una vez teniendo la idea de la extracción de energía clara, se estudiaron diferentes zonas en las que la potencia por metro de frente de ola y la batimetría es la más adecuada. Al tener diferentes zonas en las que puede instalar el buque, se estudia particularmente cada zona y las características de ese oleaje para cada zona, teniendo en cuenta que olas son las más adecuadas el sistema que se quiere implementar. Además, se necesita que el fondo marino no se encuentre a una profundidad excesiva para poder colocar el anclaje del buque en el propio fondo.

Después, teniendo en cuenta las olas adecuadas que más tiempo se repiten, se lleva a cabo el dimensionamiento de las máquinas eléctricas, además del diseño del buque en el que se instalaran dichas máquinas eléctricas. Para realizar los cálculos de comportamiento de la máquina eléctrica para trenes de ola de diferentes alturas y diferentes periodos entre olas, se emplean los programas de ordenador LabVIEW y Excel.

También se llevarán a cabo una serie de simulaciones mediante el programa de ordenador MAXSURF, para comprobar si el diseño del buque es óptimo para el correcto funcionamiento del sistema de extracción energética además de la estabilidad del buque, entre otras cosas.

De esta manera, se tratará de cargar los diferentes elementos necesarios en el buque observando si los aparatos se cargan en la mejor posición posible para tener una buena estabilidad del buque y que el comportamiento de las máquinas eléctricas sean buenos, sin que afecte el cargar los diferentes elementos en el buque.

Por lo tanto, en este trabajo se tratará de calcular y analizar la extracción de la mayor cantidad de energía undimotriz posible empleando un buque offshore. Además, se ha de emplear un método de buen rendimiento para la extracción de energía undimotriz y su correcto almacenamiento en un banco de baterías que se tendrá en el propio buque sumado a un aerogenerador para alimentar componentes del propio buque.

Este trabajo se estructura en diferentes secciones o apartados. Inicialmente se tiene una memoria en la que se incluyen los objetivos del trabajo. Así mismo, este apartado cuenta con un repaso a los avances que se han hecho en el campo de la extracción de energía undimotriz. De este modo se puede conocer la forma en la que se extrae la energía undimotriz hoy en día, además, de ver sistemas que pueden aplicarse al que se quiere realizar.

Acto seguido, se tiene la metodología empleada para poder realizar el proyecto, así como los cálculos que se han tenido que emplear para el desarrollo del mismo. En estos cálculos se tendrán en cuenta los cálculos de diseño del buque y de la máquina eléctrica. En esta sección también se mencionan los materiales empleados para realizar el trabajo, como pueden ser programas de ordenador, entre otras cosas.

En un tercer apartado se tienen los resultados de esos cálculos realizados y se analizarán tanto individualmente como en su conjunto. En el siguiente apartado se tiene una discusión de los resultados obtenidos. Y Finalmente, en el último apartado, el de las conclusiones, se verá si se ha cumplido con los objetivos marcados inicialmente.

1.2. Objetivos

Los objetivos propuestos para este proyecto son los siguientes:

- 1. Localización de una zona de explotación adecuada para el dispositivo.**
- 2. Diseño conceptual del prototipo experimental, incluyendo la máquina eléctrica y almacenamiento de la energía extraída.**
- 3. Simulación del comportamiento del dispositivo en el mar ante diferentes condiciones de oleaje.**

1.3. Beneficios del proyecto

La mayoría de sistemas de extracción de energía undimotriz hasta la fecha, son sistemas nearshore u onshore, es decir, cerca o en la propia costa. Mediante este proyecto se puede dar a conocer un nuevo método de extracción de energía undimotriz offshore, que tendría como principal ventaja la poca contaminación visual que genera, ya que estaría en ultramar. Además, al estar tan lejos de la costa, puede ser capaz de extraer energía de las olas antes de que estas la pierdan.

A esto hay que sumarle que, al tratarse de un buque, se pueden colocar varias máquinas eléctricas en su interior. Es decir, que podría extraerse mayor cantidad de energía por cada instalación.

Cabe destacar que, en este proyecto, los cálculos han sido desarrollados para una sola máquina eléctrica.

2. Estado del arte

2.1. Historia de la energía

En el Pleistoceno y en el Paleolítico Superior solamente se conocían como fuentes de energía el fuego, que se empleaba para la cocción de alimentos, y la tracción animal o humana. Al avanzar al Neolítico (4.500-3.000 años a.C.), con los primeros asentamientos se empezó a emplear la navegación a vela, empleando la energía del viento. El avance en técnicas agrícolas impulsó la ingeniería hidráulica.

Ya en la Europa feudal, se mejoró esa ingeniería hidráulica en la que se recogía el agua de lluvia. Además, se difunde el molino hidráulico, ya conocido por el Imperio Romano, habiendo 50000 molinos en Inglaterra a finales del siglo XI. Estos molinos tenían una potencia de 1-3,5 CV. A inicios del siglo XII se trasladaron a Europa los molinos de viento (de origen persa) de potencias entre 10 y 30 CV.

Con la revolución industrial se dio un salto enorme en el descubrimiento de nuevas fuentes de energía cambiando el aprovechamiento de una fuente de energía primaria y gratuita por otra de carácter comercial como es el carbón mineral. Ese carbón es empleado para transformar el calor en trabajo y tras el descubrimiento de la máquina de vapor para el transporte e industria. Después del carbón se empezó a emplear gas en el alumbrado y en motores y más adelante el petróleo. En la gráfica inferior se puede observar el disparo en el consumo de carbón por esta época.

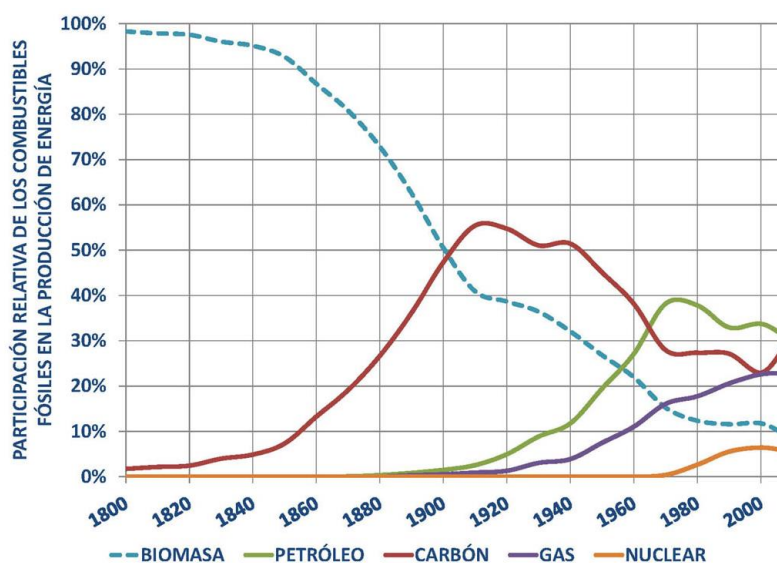


Figura 1: Evolución del consumo de diferentes elementos para la obtención de energía (66)

Es precisamente el petróleo el método de conversión de energía más usado en la industria moderna, desarrollado junto con la industria química a partir de la primera mitad del siglo XX, teniendo la petroquímica. Esa petroquímica da como resultados combustibles, explosivos, plásticos, fármacos, etc, que se usan a día de hoy.

En los últimos años, debido a la primera crisis de la energía y debido al cambio climático atribuido a la quema de combustibles fósiles, se ha tendido a la búsqueda de nuevas fuentes de energía que no dependan de las de origen fósil. En los últimos 25 años, esas fuentes de energías se han madurado y perfeccionado, aumentando su confianza y rentabilidad en muchas aplicaciones. (1)(2)

2.2. Energías alternativas

Las energías alternativas son fuentes de energía que no son de origen fósil y pueden ser tanto no renovables como renovables. Ambas son energías "limpias" ya que no generan gases de efecto invernadero, aunque si pueden provocar algunas catástrofes naturales como fue el de Chernóbil o modificar ecosistemas como es el caso de la presa de generación hidroeléctrica de Iguazú.

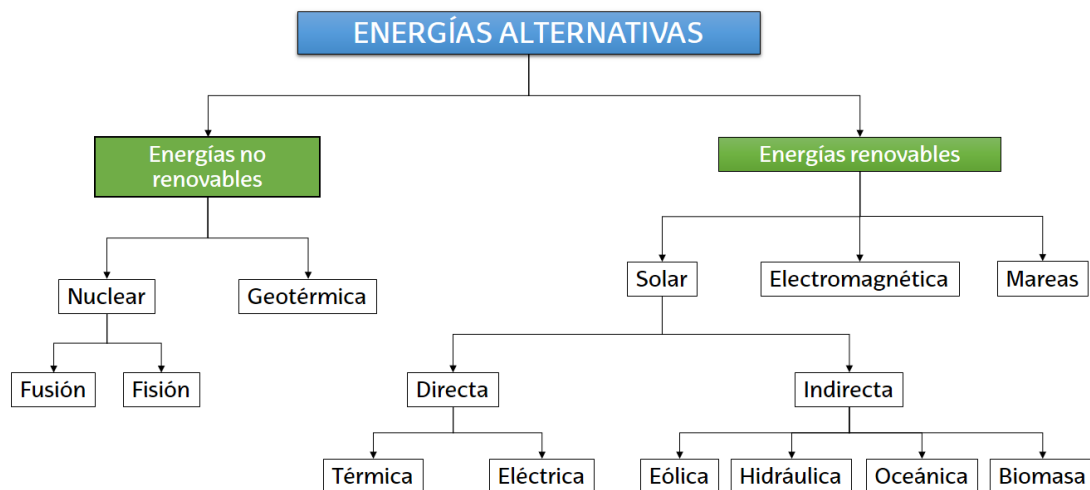


Figura 2: Clasificación de las energías alternativas

Las energías no renovables, como su propio nombre indica, son las que se algún día se agotarán, ya que no se pueden renovar. Dentro de estas se encuentran las energías nucleares (tanto de fusión como de fisión) y la geotérmica.

Las energías renovables con aquellas que se originan debido a mareas, electromagnetismo y al sol. Esta última genera diferentes tipos de energía debido a si se producen directamente, térmica y eléctrica, o indirectamente que son las energías hidráulicas, eólicas, oceánicas y la biomasa, ya que estos cuatro tipos de energías las produce la radiación solar como se verá en el caso de la energía eólica y undimotriz. (2)

2.3. Energía eólica

El viento tiene una enorme cantidad de energía, entre $2,5 \cdot 10^5$ y $5 \cdot 10^5$ kWh al año, aunque solo un 2% de la energía que llega del Sol a la Tierra se transforme en energía eólica. De esa energía, solo una parte puede ser aprovechada, ya que se presenta de forma muy diluida. Además, la velocidad del viento cerca del suelo es frenado debido al rozamiento del suelo. A esto hay que sumarle que el relieve del terreno no es completamente plano, por lo que habrá zonas en las que el propio terreno ejerza de barrera del viento y otras en las que genere turbulencias. (3)(4)

Desde que se comenzó a emplear la energía eólica, se ha ido desarrollando, sobre todo los aerogeneradores, que son dispositivos que, mediante la rotación, convierten energía cinética del viento en mecánica que después se transformará a eléctrica. (5)

Para esa transformación energética, los aerogeneradores disponen de:

- **Base:** En la parte más inferior del aerogenerador de suelen ubicar los armarios de baja tensión y las celdas de maniobra de alta tensión, situados en la parte exterior en algunas ocasiones, en instalaciones prefabricadas.
- **Torre:** Levantada sobre la base hasta la góndola. En su interior se encuentran un elevador de servicio para el transporte de trabajadores a diferentes alturas y una escala. También se encuentra en la torre cableado que transmite energía eléctrica del generador de la góndola a los armarios eléctricos de la base.
- **Góndola:** Se encuentra en la parte superior de la torre. En ella se encuentran los elementos principales de funcionamiento del aerogenerador:

- **Generador:** Se encarga de transformar esa energía mecánica de rotación procedente de la multiplicadora en energía eléctrica. Puede producir corriente alterna (AC) o continua (DC). Este elemento permite extraer un amplio rango de potencias, dependiendo de la longitud de las palas de la turbina. A mayor tamaño de palas, más energía se generará. Consta de un rotor que gira en el interior de un bobinado o estator.
- **Multiplicadora:** También llamada caja de cambios. Es un elemento formado por un sistema de engranajes que transforma la baja velocidad de giro del rotor accionado por el viento en una alta velocidad que llega al generador. El eje rápido lleva un freno de disco que se encarga de bloquear el rotor.
- **Rotor:** Se encuentra en la parte delantera de la góndola. Consiste en unas palas con superficies aerodinámicas para captar la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica, haciendo girar las palas, mayoritariamente de fibra de vidrio. Esas palas, para conseguir un ángulo de ataque respecto al viento, en algunos casos son giratorias, de paso variable. Esto permite también, que en caso de vientos altos el rotor no gire, controlando la velocidad de giro del rotor. En otros casos en cambio son fijas, de paso fijo. Además de las palas se encuentra el buje, que transmite la energía captada por las palas a la multiplicadora a través de un eje primario o eje lento. (6) (7)

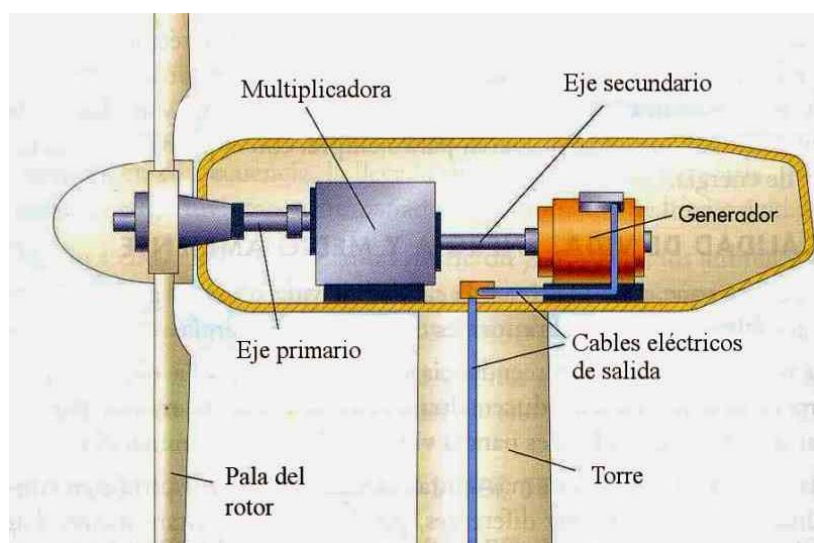


Figura 3: Partes internas del aerogenerador(67)

Los aerogeneradores pueden clasificarse de dos tipos según la posición del eje de rotación respecto al viento, pudiendo ser aerogeneradores de eje horizontal, paralelo a la dirección del viento, o de eje vertical, perpendicular respecto al viento. (8)

- **Aerogeneradores de eje horizontal:** Necesitan un sistema de orientación al viento. Las palas pueden estar tanto a barlovento como sotavento, aunque es conveniente la primera manera, ya que de este modo no se distorsiona el viento por entrar en contacto con la góndola antes que con las palas. Aunque hay que señalar, que el tenerlas a barlovento implica disponer de un rotor más rígido. Dentro de esta clase de aerogeneradores se pueden tener palas con perfil de ala (bipala o tripala generalmente) y multipalas.
- **Aerogeneradores de eje vertical:** Son capaces de captar el viento con cualquier dirección, por lo que no es necesario que dispongan de un control de la orientación. Hay que mencionar como punto negativo, que tienen peor rendimiento aerodinámico que los molinos de eje horizontal. (4)(9)



Figura 4: Aerogeneradores: Izquierda, eje horizontal y derecha, eje vertical (68)

Cabe destacar que hoy en día se están instalando aerogeneradores en el mar, donde el terreno no afecta al viento, por lo que la velocidad del viento es mayor. (10) Además, se está investigando un método en el cual se tenga un aerogenerador sin palas llamada "*Vortex Bladeless*", en la cual un cilindro (mástil) oscila en un rango de velocidad de viento que se transforma en energía mecánica y después en eléctrica mediante el generador que se encuentra en la base. (11)

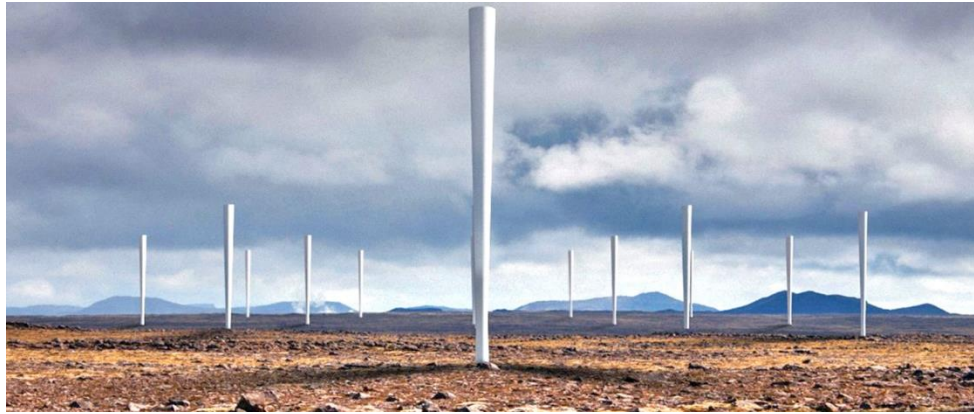


Figura 5: Simulación de una granja aerogeneradores "Vortex Bladeless" (69)

2.4. Energías renovables procedentes del mar

La existencia de estas energías se debe a la influencia de la radiación solar y campos gravitatorios provocados por el sol, la tierra y la luna sobre los océanos terrestres. Estas energías renovables se encuentran en una fase inicial de desarrollo, por lo que aún no son muy usadas, aunque el potencial de alguna de ellas es muy elevado. Entre las fuentes de energía procedentes del mar más importantes se encuentran las siguientes:

- **Mareomotriz:** Se basa en el aprovechamiento del ascenso y descenso del agua del mar, las mareas, para producir energía. Generalmente el agua se almacena en un embalse en la pleamar para abrir las compuertas del embalse en la bajamar aprovechando esa caída de agua para mover una turbina y generar movimiento que se puede convertir en electricidad. El extraer esta energía requiere obras civiles y supone un gran impacto medioambiental, es por esto por lo que su desarrollo está bastante limitado. (12)

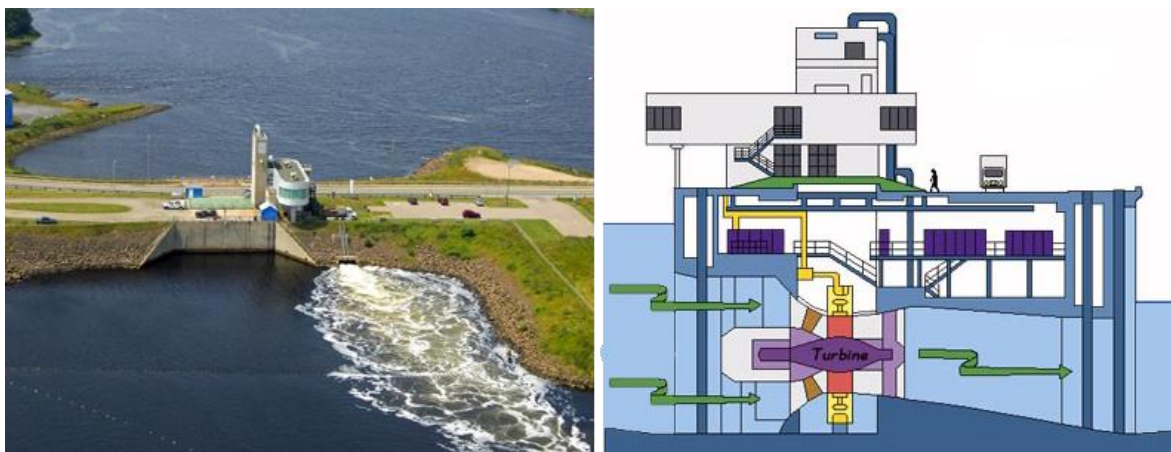


Figura 6: Central mareomotriz de Francia, río Rance (70)

- **Corrientes marinas:** Es una energía producida por los efectos inerciales de variación lenta (movimiento de la tierra) y por el efecto de las mareas. Se estima una potencia de 800 TWh al año, habiendo localizaciones concretas en las que se pueda aprovechar. Para la transformación de energía mecánica en eléctrica se emplean turbinas marinas. Para hacer girar el rotor de la turbina es necesario una velocidad superior a 5 nudos.

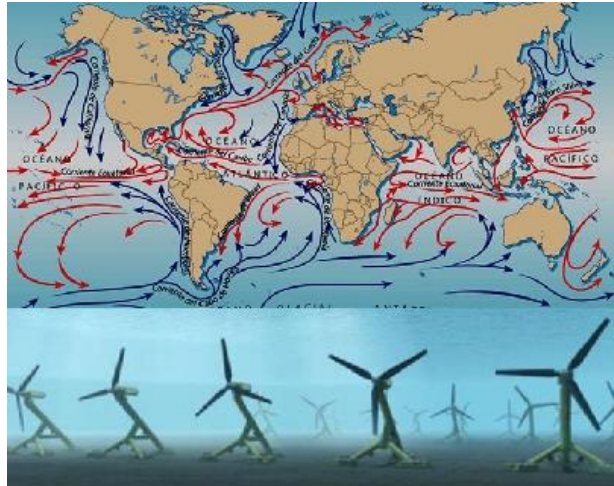


Figura 7: Corrientes marinas del mundo y método para extraer su energía (71)(72)

Además de estos dos tipos de energías marinas se encuentran otras de menor aprovechamiento, ya sea por la energía que se puede extraer de las mismas o que el coste de construcción sea demasiado elevado. Entre esas energías se destacan las siguientes:

- **Térmica oceánica:** Se consigue mediante la diferencia de temperaturas entre la superficie del mar y varios metros más debajo de la misma. Para poder producir energía mediante este método es necesario que se dé una diferencia de temperaturas al menos de 20°C.
- **Gradiente salino:** Consiste en obtener energía debido a las diferencias de presión osmótica.
- **Biomasa marina:** En el mar hay una gran cantidad de biomasa que se puede emplear para la producción de biocombustibles.

Entre las energías marinas de mayor aprovechamiento y con una gran previsión a futuro por la energía que se puede extraer también se encuentra la energía undimotriz, que se explica con mayor extensión en el siguiente apartado.

Se estima que todas estas energías tienen un potencial superior a 100.000 TWh/año, mientras que los humanos consumimos 16.000 TWh/año. (13)(14)

2.5. Energía undimotriz u olamotriz¹

Las olas se generan sobre todo debido la radiación del sol. Esa radiación solar incide en la superficie terrestre y provoca en la atmosfera zonas de altas y bajas presiones lo cual produce desplazamientos de aire. Esos desplazamientos de aire hacen que haya rozamiento del aire sobre la superficie del mar, lo que provoca el oleaje. Se estima que aproximadamente un 0,267% de la energía solar es transmitida al oleaje. El oleaje actúa como un acumulador de energía, transportándola de un lugar a otro y almacenándola. La intensidad del oleaje varía según la intensidad, duración y longitud del viento que transmite a la energía de la ola. Se estima que el potencial que tiene la energía de las olas de todo el mundo, es de entre 30.000 y 45.000 TWh/año.

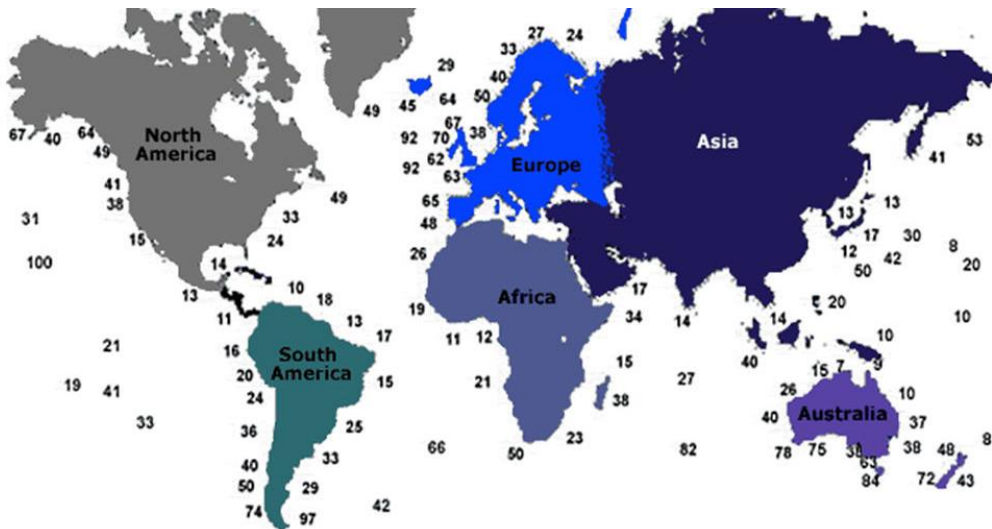


Figura 8: Mapa de potencia (kW) por metro de frente de ola del mundo (73)

Como se aprecia en la figura superior, la actividad de las olas es mayor entre las latitudes de 30 y 60°. Esto se debe a que en estas regiones existen vientos alisios predominantes.

Para la extracción de esta energía hoy en día se han desarrollado diferentes métodos y aparatos. Se estima que hay en torno a 80 prototipos diferentes de convertidores de olas. Algunos de esos aparatos son los que se describen a continuación:

¹ Citas bibliográficas del apartado "2.5. Energía undimotriz u olamotriz" son las siguientes: (13)(14)(15)(16)(17)(18)(19)(20)(21)

- Columna de agua oscilante (OWC):** Es uno de los convertidores de energía undimotriz mas empleada en la actualidad. Se basa en que el movimiento del mar producido por el oleaje se introduzca en una cámara de captación. En ella, la subida y bajada del nivel de agua provocado por el oleaje hace que la masa de aire de esa cámara sea expulsada o introducida de la misma. En ese orificio por el que el aire escapa o entra en la cámara se coloca una turbina a la que se le transfiere el movimiento del aire. Esa turbina acoplada a un generador hace que se produzca energía eléctrica que puede inyectarse a la red. Al emplear energía neumática para generar energía mecánica, el mantenimiento es más sencillo y económico. Este sistema se puede colocar en instalaciones cerca de la costa o en los rompeolas.

Ejemplos de plantas de OWC son las de PICO en las Azores, PORT KEMBLA a 100km de Sydney y MOWC de Mutriku.

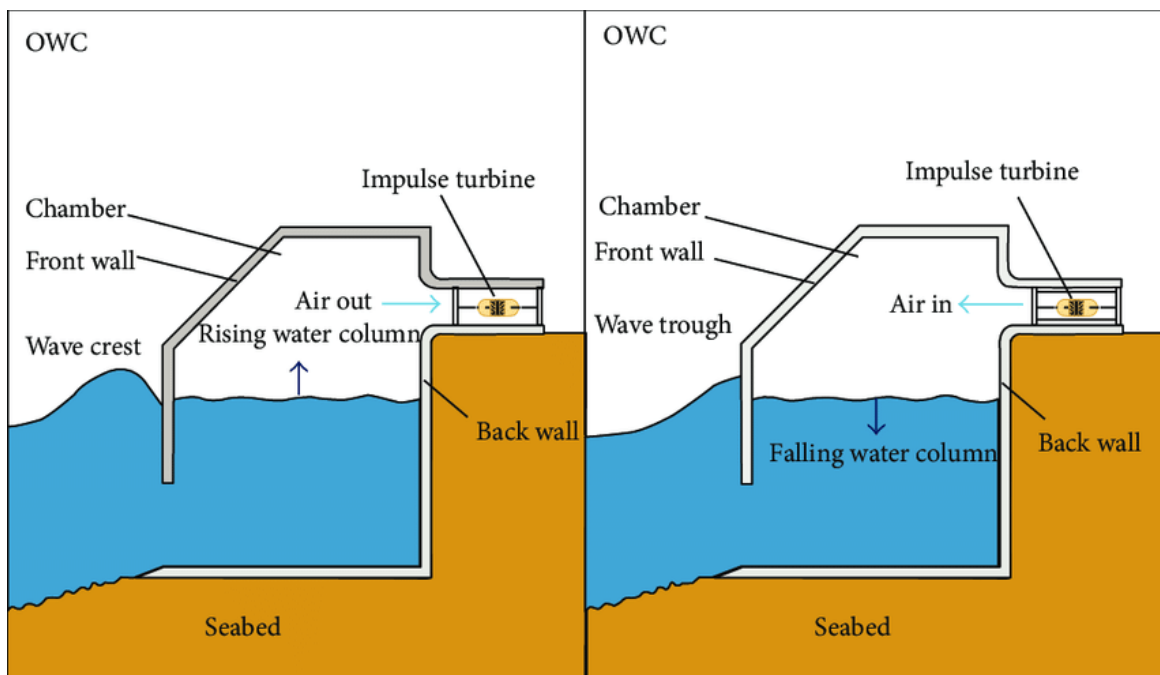


Figura 9: Esquema de funcionamiento de un OWC (74)

- TAPCHAN:** También conocido como estrechamiento de canal. Dicho canal se va estrechando a lo largo de su longitud. Ese canal llega a un embalse situado en la costa varios metros por encima del nivel del mar. Las olas avanzan por el canal, que a medida que se estrecha, hace que las olas aumenten su amplitud, desbordándose en el embalse, por lo que la energía cinética de las olas pasa a ser energía potencial. A partir

de ese momento el agua almacenada pasa por una turbina Kaplan acoplada a un generador, como ocurre en las centrales hidroeléctricas. Una vez el agua pasa por la turbina se devuelve al mar.

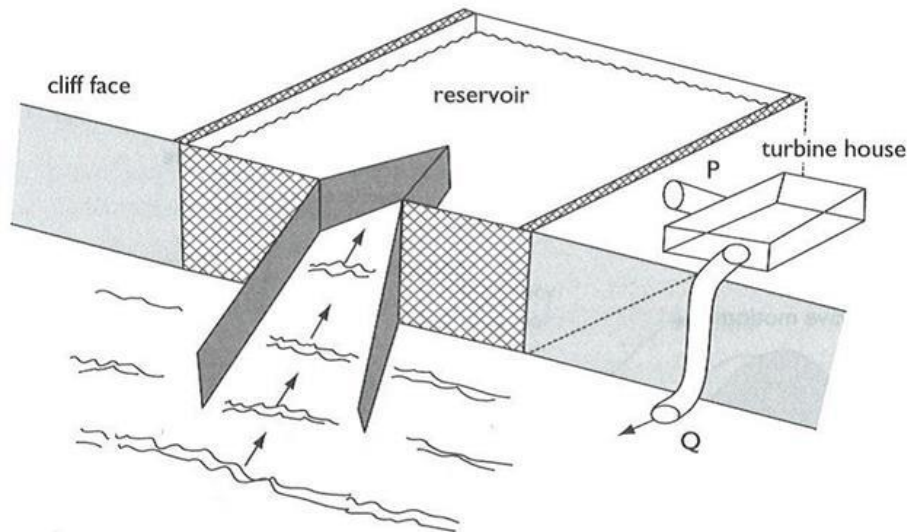


Figura 10: Esquema de extracción de energía undimotriz TAPCHAN (75)

- **Wave Roller (placa pivotante):** Consiste en una placa subacuática fijada en el fondo del mar. Con las ondas bajas del agua consigue que esa placa se mueva en sentido horizontal. Ese movimiento es absorbido por unas bombas hidráulicas, de pistón, que están conectadas a las placas y bombean los fluidos hidráulicos al interior de un motor hidráulico. Este a su vez, acciona un generador eléctrico. La energía eléctrica producida es enviada a través de cables submarinos a la red eléctrica.

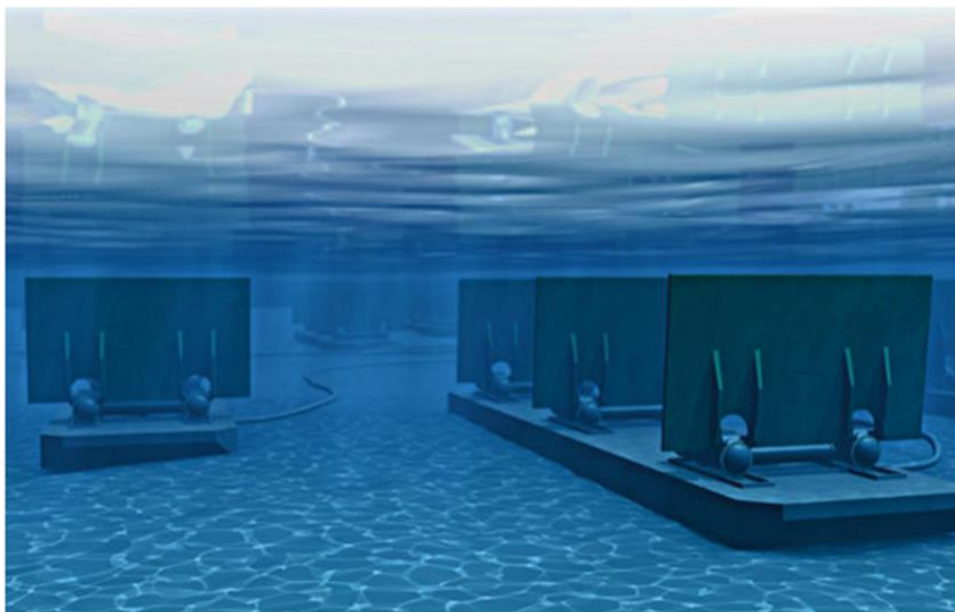


Figura 11: Simulación de una granja de Wave Roller (76)

- **Oyster:** Es un dispositivo semi-sumergido, cuya base es la que está sumergida y apoyada en el lecho marino, al igual que el Wave Roller. Su aleta de 18 metros, que se mueve adelante y atrás por el movimiento de las olas, gira en torno a un eje paralelo al fondo del mar. Esto activa unos pistones hidráulicos que mandan agua marina a altas presiones a través de un conducto subterráneo a tierra. Allí se acciona una turbina Pelton que está acoplada a un generador eléctrico.

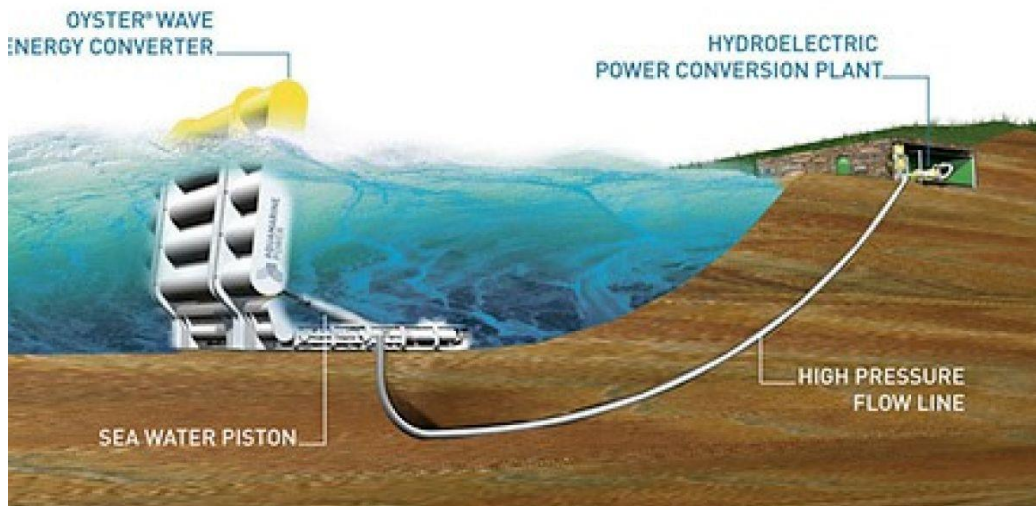


Figura 12: Convertidor de energía Oyster y su planta de conversión en tierra (77)

Este dispositivo se probó entre los años 2009 y 2012 en las costas del norte de Escocia.

- **Wave Dragon:** Es un dispositivo para aguas profundas. Mediante su rampa eleva las olas marinas a un embalse dentro de su propia estructura que esta unos metros por encima del nivel del mar. Después, esa agua se deja caer por gravedad por unas turbinas generando la energía eléctrica.

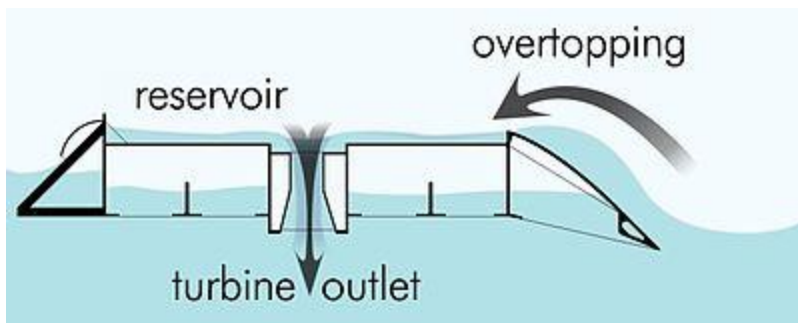


Figura 13: Esquema de funcionamiento del Wave Dragon (78)

La estructura tiene dos reflectores de onda para enfocar las olas hacia la rampa de doble curva que es corta y bastante empinada. Esto se hizo con la idea de minimizar la pérdida de energía de las olas, como ocurre en las playas.



Figura 14: Wave Dragon en el mar (79)

- **Serpiente marina (Pelamis):** Se basa en una estructura compuesta de cilindros articulados mediante bisagras que se amoldan al movimiento del oleaje. En esas bisagras se encuentran unas bombas hidráulicas que dan presión a los aceites que se encuentran en su interior. Después, el aceite es mandando a unos motores hidráulicos que accionan un generador eléctrico, produciendo electricidad que se manda a tierra.

Su sistema de anclaje está compuesto por cables, flotadores y pesas. Este sistema se encarga de mantener al Pelamis en una posición fija, además de permitir el vaivén de los cilindros y da la posibilidad de conectar unos Pelamis a otros para exportar la electricidad por un solo cable.

En las costas de Portugal se han instalado tres equipos de 750kW cada uno. Tienen 150 metros de largo y 3 metros de diámetro.



Figura 15: Serpiente marina, Pelamis (80)

- **Columpio de Arquímedes (AWS):**

Se trata de un equipo que está sumergido en el mar a una profundidad aproximadamente de 6 metros. La energía se obtiene mediante la subida y bajada de las olas del mar.

Consta de dos cilindros: Un flotador, en la parte superior y en cuyo interior hay aire o nitrógeno, y un silo, en la parte inferior, adherido al fondo mediante un bloque de acero fijado sobre hormigón.

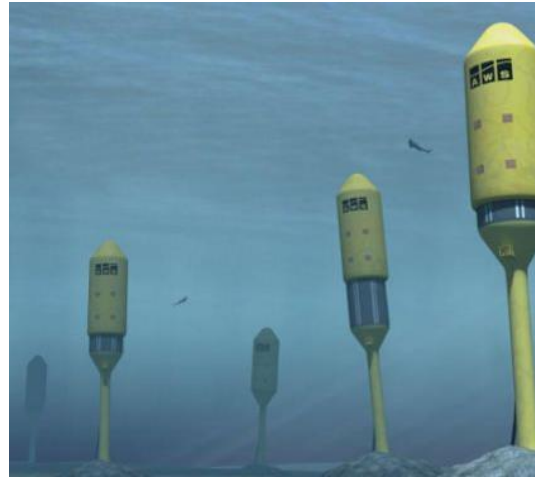


Figura 16: Simulación de una granja de AWS en la que se distinguen los dos cilindros (81)

Funciona mediante la presión hidrostática provocada por el agua de mar. Cuando justo encima se encuentra la cresta de la ola, aumenta la presión hidrostática, contrayendo el aire o nitrógeno en el interior del aparato y bajando el flotador. Ese movimiento vertical se transforma en energía eléctrica mediante el uso de un generador lineal, en el que dos imanes se encuentran en el flotador, siendo la bobina la parte estática (en el silo). Al tener encima el seno de una ola la presión será menor, por lo que el flotador subirá.

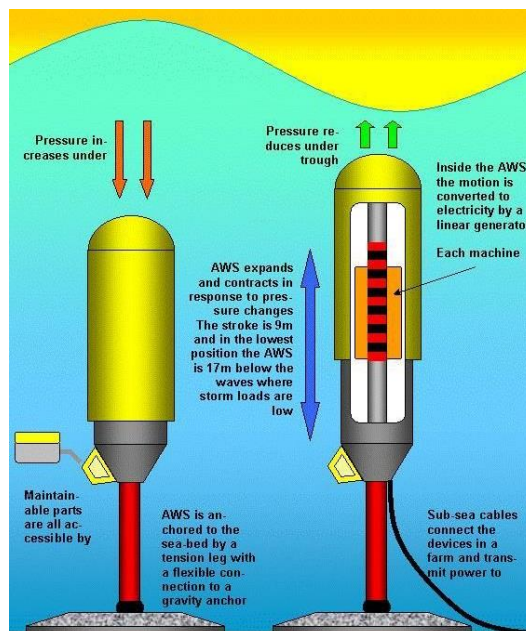


Figura 17: Esquema de funcionamiento de un AWS (82)

- **Power Buoy:** Conocido en castellano como "**Boya de potencia**", es una boya marina que aprovecha el movimiento vertical y pendular de las olas. Ese movimiento se traslada a una bomba hidráulica situada en la parte baja de la boya, bombeando aceite. Ese aceite es el encargado de accionar un motor hidráulico que está colocado en el fondo marino y este a su vez acciona un generador eléctrico. Este tipo de convertidores están diseñados para instalarse en grupo y obtener así una cantidad de energía rentable.

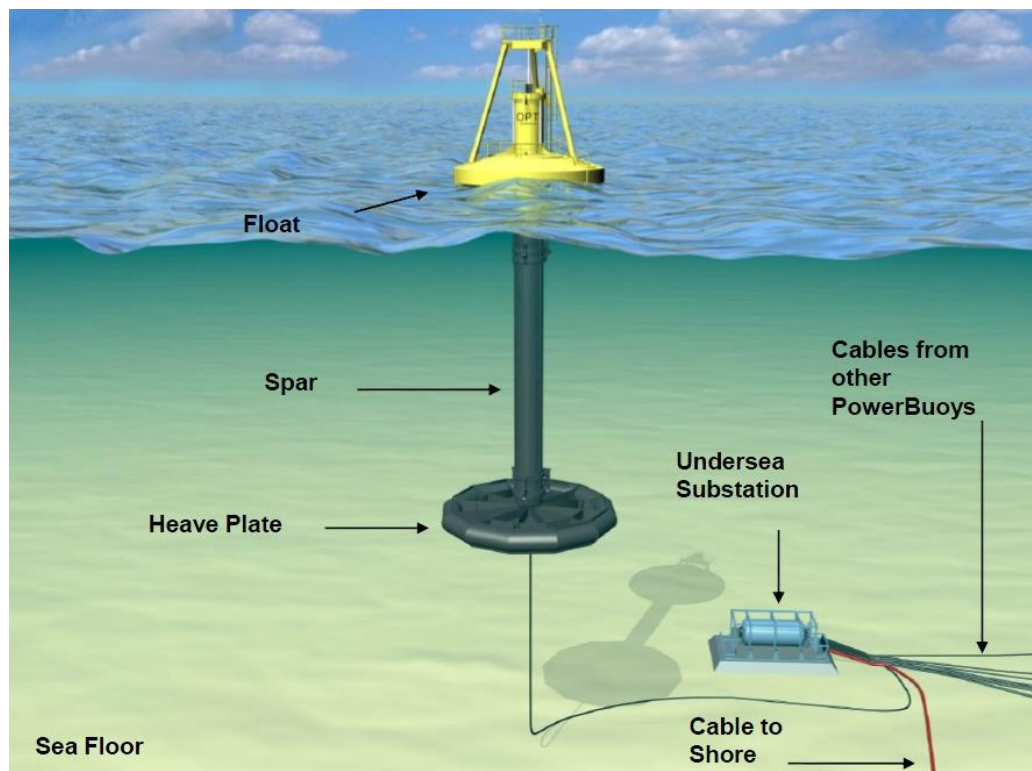


Figura 18: Simulación de una Power Buoy(83)

Todas estas instalaciones pueden ser divididas en varios bloques. Puede deberse a su ubicación, es decir, distancia respecto a la costa, al tamaño y orientación que tengan o en función del principio de captación.

- **Ubicación:** Dependiendo de las millas a las que esté de la costa el elemento se pueden tener sistemas onshore o 1ª generación, que son los que se encuentran en tierra, nearshore o 2ª generación, instalados en aguas entre 10 y 40 metros de profundidad y offshore o 3ª generación, que se sitúan en aguas profundas, de más de 50 metros.

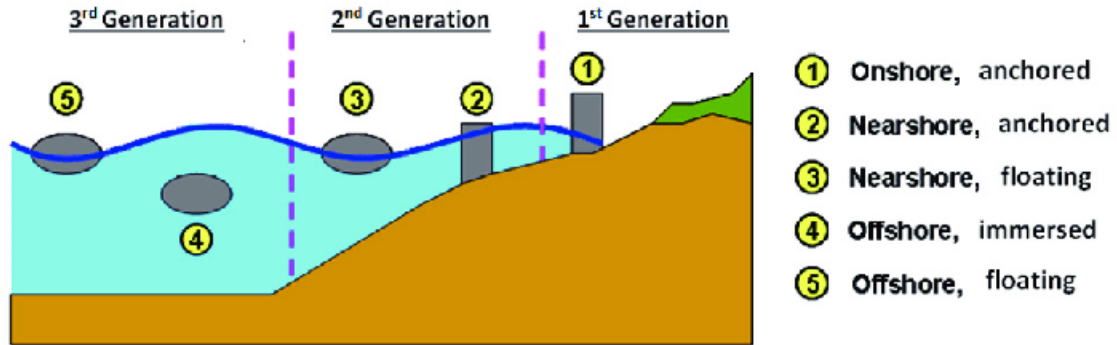


Figura 19: Clasificación según ubicación en el mar (84)

- **Tamaño y orientación:** Pueden ser absorbedores puntuales, es decir, que sean pequeños respecto a la longitud de la onda que incide en ellos (la ola). También se tienen absorbedores lineales, que tienen forma alargada y se desplazan con la variación de las olas, colocados en paralelo al movimiento de las olas. Por último, puede tratarse de totalizadores o terminadores, aquellos que se sitúan en perpendicular al oleaje para captar toda la energía de una vez.

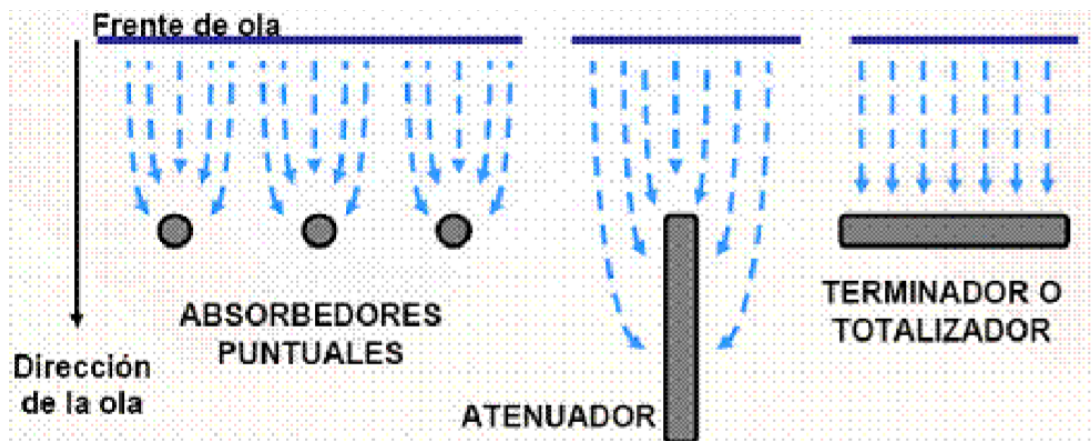


Figura 20: Clasificación según tamaño y orientación (85)

- **Principio de captación:** En función del sistema de captación que utilicen se pueden tener aparatos que funcionen mediante diferencias de presión en un fluido, que sean cuerpos boyantes activados por olas o sistemas de rebosamiento e/o impacto. Se clasificarían siguiendo la figura inferior:

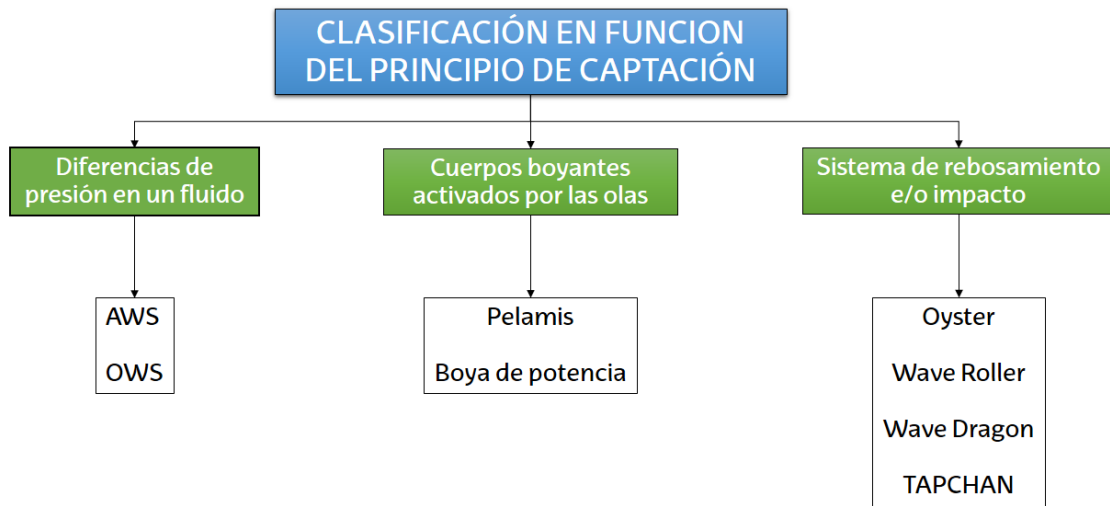


Figura 21: Esquema de clasificación en función del principio de captación

2.5.1. Dispositivo de OCEANTEC

Esta idea de crear un nuevo sistema de extracción de energía undimotriz mediante la colocación de una máquina eléctrica en el interior de una embarcación que se fondeará en ultramar, nace de la idea de TECNALIA.

En ella, se tiene un sistema de aprovechamiento de energía situado offshore, flotante, del tipo atenuador en el que se tiene un movimiento relativo inercial basado en un volante de inercia. Dentro de la estructura flotante, se instala un dispositivo giroscópico que comprende el volante de inercia mencionado. Ese dispositivo giroscópico gira por accionamiento de un motor que está situado en el eje del volante de inercia. Ese volante de inercia es el que alimenta el generador, aprovechando el par de cabeceo al que está sometida la embarcación. (22)

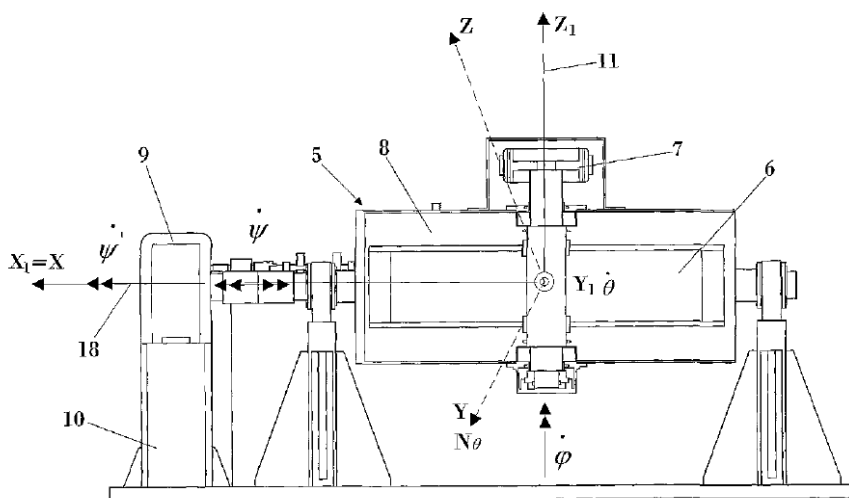


Figura 22: Esquema del dispositivo giroscópico de la patente (22)

En inicios de 2007, desarrollaron un test en un tanque de olas con un modelo a escala 1:37,5, que más tarde se hizo con un modelo a escala 1:15. En él, se hicieron diferentes pruebas tales como: Pruebas de deriva, de decaimiento, con olas regulares, de cresta larga y corta y variando el periodo de las olas. En esas pruebas se pudo observar que el amarre no afecta al movimiento del WEC (Wave Energy Converter) y que pasaba todas las pruebas.

Siendo los resultados positivos construyeron otro modelo a escala 1:4 para unas pruebas en el mar realizadas en 2008. El prototipo se amarró desde 4 puntos y se monitorizó en todo momento. Esta prueba se desarrolló en la cala de Murgita, entre Donosti y Pasaia, y en ella se observó el comportamiento del prototipo en el mar. De los resultados obtenidos se extrajo que el prototipo tiene una buena supervivencia al mar y que el sistema es fiable. Se ideó un segundo prototipo ya con la máquina eléctrica, pero nunca llegó a ver la luz. (23)



Figura 23: Modelo a escala 1:4 en las pruebas de mar del prototipo de TECNALIA (23)

2.6. Generador eléctrico

Existe una gran variedad de convertidores de energía, siendo los más comunes los motores eléctricos, que transforman la energía eléctrica en mecánica, y los generadores eléctricos, que hacen la función contraria transformando la energía mecánica en eléctrica. Ambos son máquinas eléctricas. (24)

Centrando la vista en los generadores eléctricos, su funcionamiento se basa en el giro de una bobina, originado por una fuerza exterior dentro de un campo magnético. Aunque en la extracción de energías renovables, suele ser más normal, el giro de ese campo magnético (mediante el giro del imán permanente o de un electroimán) mientras la bobina o el bobinado permanecen inmóviles (25). En ambos casos los alambres de la bobina cortan las líneas del campo magnético induciendo una fuerza electromotriz o fem entre los terminales de la bobina:

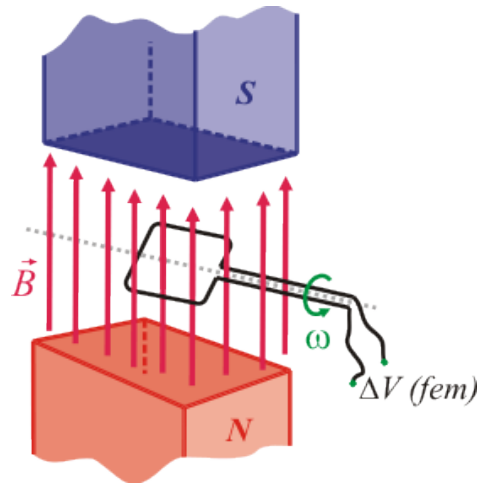


Figura 24: Giro de espira en un campo magnético (B) para crear la fuerza electromotriz (fem) (86)

$$\mathcal{E} = 2\pi \cdot N \cdot A \cdot B \cdot f \cdot \cos(2\pi ft)$$

Donde N es el número de espiras (cada una con un área A) en la bobina y f es la frecuencia a la que gira. (26) Existen diferentes generadores eléctricos dependiendo del movimiento del imán en el interior de la bobina o viceversa: Generadores eléctricos rotativos, en los que el imán gira y de movimiento lineal, en el que el imán se desplaza linealmente, traslada.

2.6.1. Generadores eléctricos rotativos

Dentro de este tipo de generadores eléctricos existen otros grupos y subgrupos. Entre los grupos se distinguen máquinas de las que se extrae electricidad en forma de corriente continua (DC) o de corriente alterna (AC). (24)

- En los generadores eléctricos de corriente continua el estator tiene los polos salientes y el rotor es cilíndrico. El campo inductor es originado por el estator y el rotor es el inducido. Por el bobinado del estator circula corriente continua y por el del rotor corrientes alternas. Estos elementos se empleaban en dinamos.
- Por otra parte, los generadores de corriente alterna, se clasifican en diversos subgrupos debido a las diferencias en su rotor, bobinados, etc. Se tienen entonces máquinas síncronas y asíncronas:

- **Las máquinas síncronas se caracterizan por tener una velocidad constante sin importar la carga a la que se le someta, manteniendo la velocidad de sincronismo. En estas máquinas el estator es cilíndrico y por el bobinado circula corriente alterna trifásica. Por el rotor circula corriente continua y pueden ser tanto de forma circular como con polos salientes. Estos generadores se emplean en centrales eléctricas hidráulicas, térmicas, etc. (27) (21)**

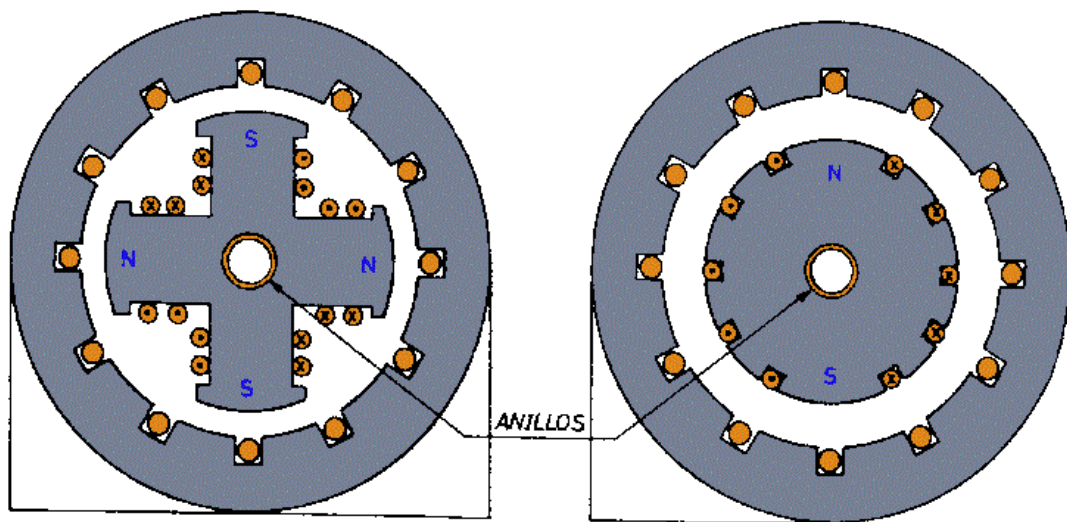


Figura 25: Generadores síncronos. Izquierda, de polos salientes; derecha, rotor circular (87)

- **En las máquinas asíncronas en cambio, la velocidad a la que se mueve su rotor en vacío o con carga no es la misma ya que disminuye al aumentar la carga. Tanto el estator como el rotor son de forma cilíndrica y por ambas circula corriente alterna. Existen dos clases de generadores asíncronos. Por un lado, se tiene el rotor de jaula de ardilla que está formado por barras longitudinales cortocircuitadas en los extremos. Y por otro lado, se tiene uno formado por bobinas realizadas de manera idéntica a la del estator, denominado rotor bobinado. (24)**

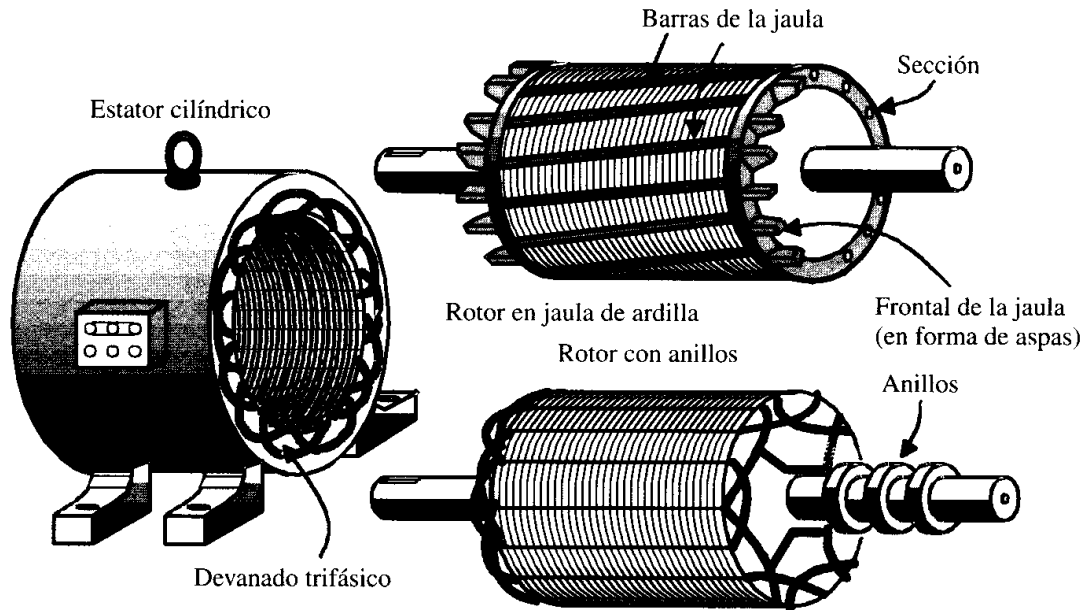


Figura 26: Tipos de máquinas asíncronas. Arriba, rotor en jaula de ardilla; abajo, rotor bobinado (88)

2.6.2. Generador lineal

Como su propio nombre indica, no se da ningún giro, sino que se tiene un

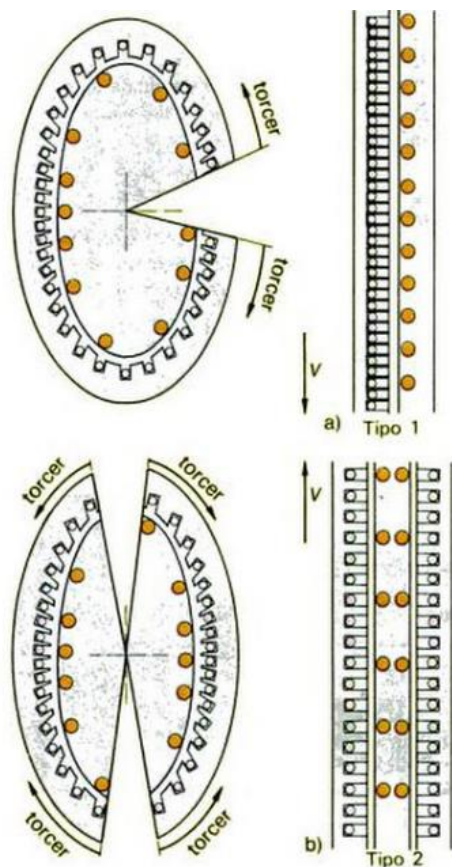


Figura 27: Obtención de un generador lineal a partir de un generador asíncrono trifásico (28)

movimiento rectilíneo de traslación, aunque el principio de funcionamiento es el mismo que el de los generadores rotativos, solo que en este caso el imán circula en un movimiento lineal entre dos bobinados o estatores. Es importante que el imán siempre se encuentre ocupando el estator para cerrar el campo magnético a lo largo de todo el estator.

Para visualizar un generador lineal hay que imaginarse que se tiene un generador en jaula de ardilla. Realizando un corte en dirección longitudinal hasta su eje y desplegando el rotor y estator hasta que quedaran rectilíneos, se obtendría el primer tipo de generador lineal. Mientras que

cortando el jaula de aradura por la mitad y dejándolo plano se obtendría el de segundo tipo. (28) Estas máquinas lineales se emplean en transporte, ya que además de propulsión, generan levitación que evita el rozamiento. (21)

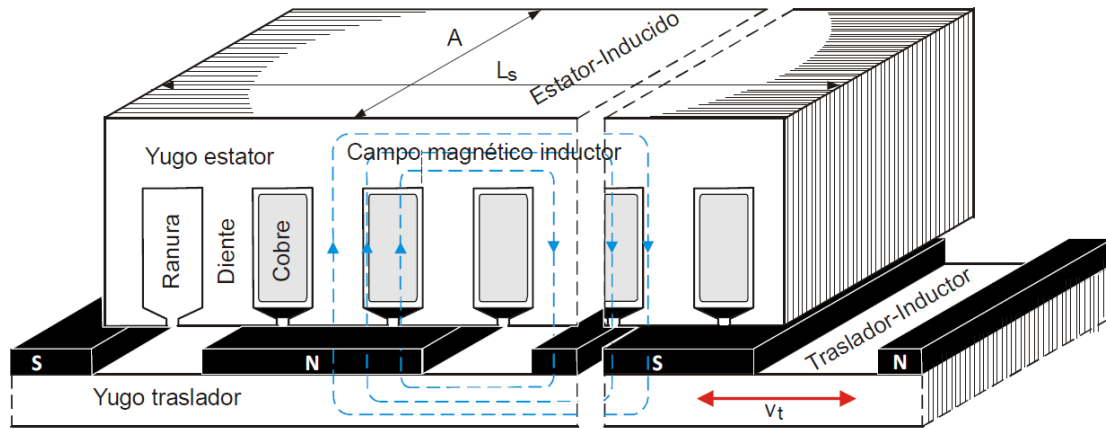


Figura 28: Partes que constituyen un generador lineal de imanes permanentes (21)

2.7. Almacenamiento de energía

En la actualidad existen diferentes sistemas para almacenamiento de la energía. Principalmente se tienen baterías, supercapacitores y volantes de inercia.

Respecto a las baterías, hoy en día se emplean baterías de metal-azufre, donde el metal es magnesio, sodio o litio y baterías de metal-oxígeno o metal-aire, donde los metales son zinc, litio o sodio.

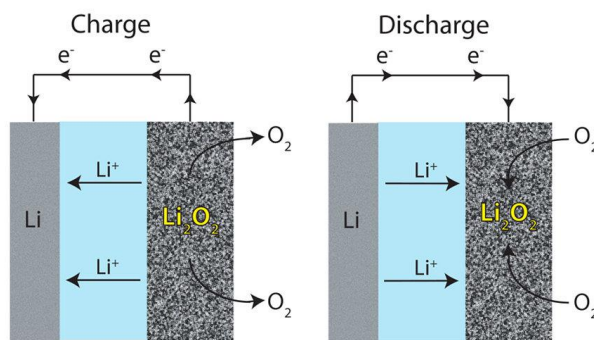


Figura 29: Carga y descarga en baterías litio-aire (89)

La más usada de todas es la de litio-aire, que puede liberar 11,78 kWh por la oxidación de un kilo de litio. Además, este tipo de batería, absorbe oxígeno de la atmósfera en la descarga y la libera en la carga. También son ligeras, pero requiere de un medio de

suministro y renovación de aire parecido a los motores de fuel. Cabe destacar que el desarrollo de este tipo de baterías aún está en fase de desarrollo. El punto negativo está en que los recursos de litio que hay en el mundo son limitados, se estiman en unas 10-11 toneladas, por lo que el precio del litio puede encarecerse en un futuro muy cercano. Aunque para evitar que se

agote el litio, se están desarrollando nuevas baterías como las “all-electron”, que pueden almacenar mayor cantidad de energía. (29)

Otro recurso para el almacenamiento de energía son los supercapacitores, ultracapacitores o supercondensadores, que ya se han empezado a emplear en buques de pasaje de menos de 22 metros de eslora (29) y en sistemas ferroviarios (30).

Los supercondensadores son capacitores electroquímicos hechos a partir de material carbonado del grafeno. Tiene una buena resistencia térmica y rapidez de respuesta, por lo que son capaces de soportar 500.000 ciclos de carga/descarga. Además, no pesan mucho y tienen mayor capacidad de almacenamiento que otros sistemas. (31) La principal desventaja es su coste. (30)



Figura 30: Banco de supercapacitores (90)

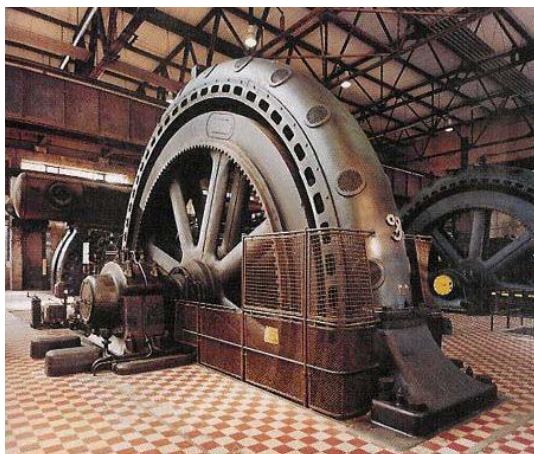


Figura 31: Volante de inercia (91)

Además de baterías y supercondensadores, también se tienen volantes de inercia, que es un sistema de almacenamiento de energía cinética que usa la inercia restante de un sistema. (32) Es capaz de absorber y ceder energía en poco tiempo, por lo que se aplica generalmente a sistemas mecánicos de ciclo energético discontinuo con

periodo de tiempo corto. Es decir, en motores y compresores alternativos, prensas, etc. (33)

3. Material y métodos

3.1. Materiales

Para la realización de este trabajo, será necesario emplear diferentes programas informáticos. Se emplean desde los más simples como es el caso del Google Earth, hasta algunos más complejos como MAXSURF.

3.1.1. Google Earth

Google Earth es un programa informático que muestra un globo virtual que da la posibilidad de visualizar la múltiple cartografía a base de fotografías satelitales entre otras funciones. (34)

Mediante el uso de esta herramienta se puede explorar en imágenes de satélite todo el globo terráqueo, así como ver edificios en tres dimensiones e imágenes en relieve de muchas ciudades. También ofrece la posibilidad de ir a casi cualquier sitio con una perspectiva de 360° mediante el uso de Street View. (35) Aparte, también es capaz de mostrar con bastante precisión las coordenadas en las que se encuentra, la altitud y profundidad sobre el nivel del mar, medir distancias de rutas o entre puntos y da la capacidad de añadir marcadores.

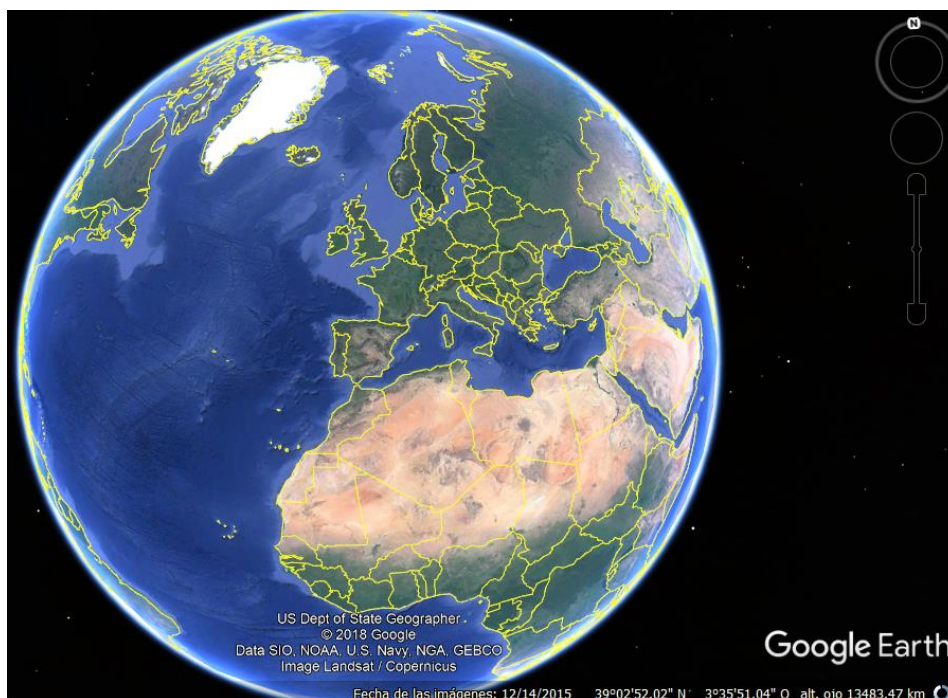


Figura 32: Globo terráqueo en Google Earth

Google Earth permite realizar estudios de diferentes localizaciones del planeta, como estudiar e investigar la morfología urbana. (36) También da la opción de reconocer y cartografiar rasgos geológicos a escala regional en

cualquier parte del planeta, visualizar la zona de estudio a diferentes escalas, conocer la altitud terrestre y batimetría del fondo marino y conocer distancias entre puntos entre las funciones más importantes. Además, se puede emplear como un medio didáctico en las escuelas e institutos. (37)

3.1.2. Microsoft Excel

Excel es un sistema informático de la compañía de Microsoft Corporation por lo que está disponible en la mayoría de ordenadores y da la oportunidad de desarrollar una hoja de cálculo. Esa hoja de cálculo es un software por el cual se pueden emplear una serie de datos numéricos, permitiendo realizar cálculos de manera automática de esos números dispuestos en una tabla conformada en un conjunto de celdas ordenadas en una matriz bidimensional de filas y columnas. Además, permite efectuar esos cálculos (ya sean sencillos o complejos) con rapidez y con la precisión que se desee. (38) (39)

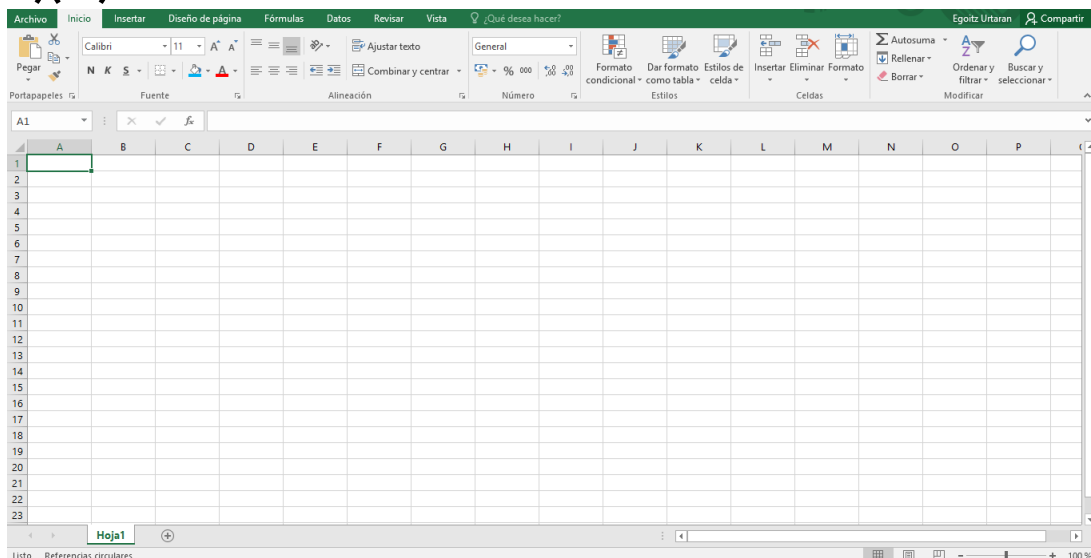


Figura 33: Hoja de cálculo de Microsoft Excel 2016

Microsoft Excel es una buena herramienta para cálculos matemáticos, financieros y también para la investigación. La captura y edición de datos en esta aplicación tiene múltiples facilidades. (40) (41)

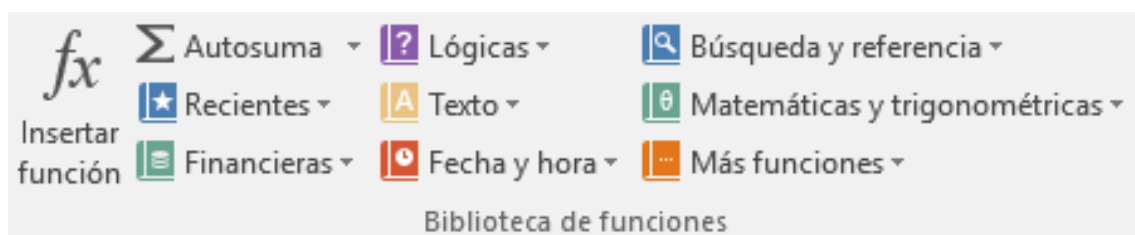


Figura 34: Funciones de Microsoft Excel

Aunque solamente se ha mencionado la capacidad de realizar cálculos y la exposición clara y ordenada de estos, existen otras funciones de gran utilidad. Entre ellas destacan el poder realizar tablas dinámicas y mostrar gráficas que ayudan a representar los datos para entenderlos de manera más sencilla. También permite una programación de marcos que sirve para automatizar acciones que se ejecutan en los datos cotidianamente mediante el uso de un lenguaje de programación conocido como VBA (Visual Basic for Applications (42)), ahorrando tiempo. (43)

3.1.3. LabVIEW (44) (45)

LabVIEW es un software que proporciona un potente desarrollo gráfico para diseñar aplicaciones de adquisición de datos, análisis de medidas y presentación de datos gracias al uso de un lenguaje de programación que no tiene la complejidad de otras herramientas de desarrollo. Además, tiene un rápido acceso a hardware e información de datos.

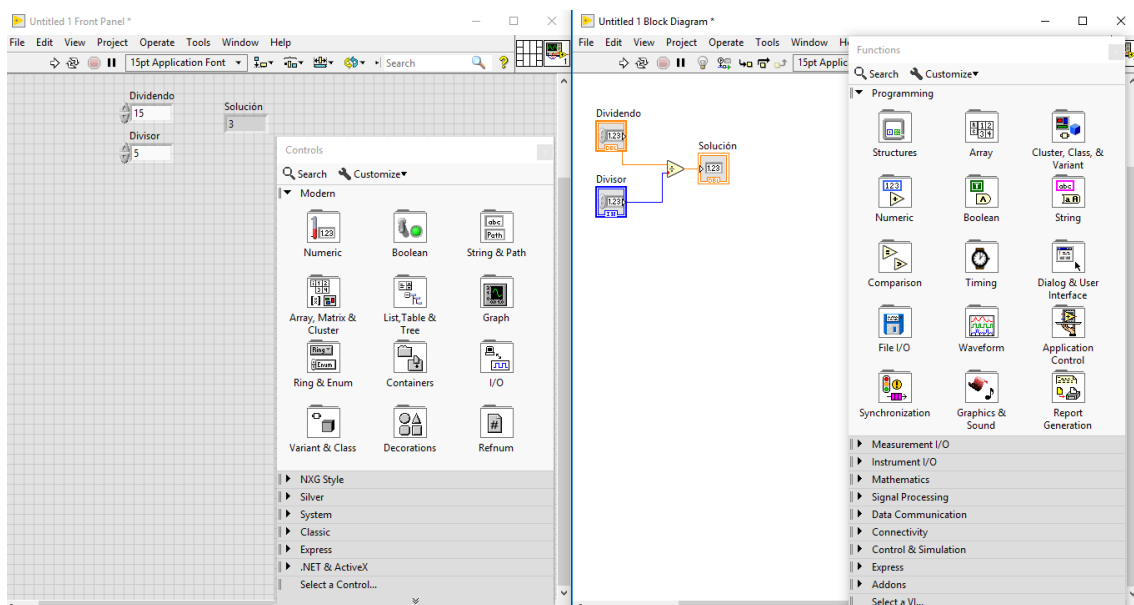


Figura 35: Ejemplo de operación matemática con LabVIEW y muestra de controles y funciones, dependiendo de estar en el panel frontal o diagrama de bloques

Como se ha mencionado, una de las características más importantes de LabVIEW es que dispone de un lenguaje de programación intuitivo y fácil de emplear. Aunque también dispone de herramientas de desarrollo y librerías de información de alto nivel, diversidad de funciones para control, análisis y presentación de datos, posibilidad de crear aplicaciones de medida genéricas

sin programación y una depuración grafica integrada y control del código fuente entre otras.

Este software puede usarse para diversas aplicaciones entre las que destacan tres:

- **Análisis automatizado y plataformas de medida:** En este caso se emplea para realizar test de fabricación, validación y medioambiental, adquisición de datos e imágenes, etc.
- **Medidas industriales y plataformas de control:** Mediante LabVIEW se pueden monitorizar las condiciones de máquinas, de potencias o de control, además de emplearse para pruebas y controles integrados y es capaz de dar una visión artificial.
- **Diseño integrado y plataformas de prototipaje:** Se pueden realizar diseños de control, de filtros digitales, de algoritmos, de circuitos electrónicos y demás diseños.

3.1.4. MAXSURF

MAXSURF es un software de arquitectura naval integrada para todo tipo de buques, un producto de Bentley. En él se pueden visualizar y optimizar los diseños de buques. Permite crear quillas con la forma que se desee, verificar que un buque cumpla con los requisitos de estabilidad, minimizar los requerimientos de energía, etc. En definitiva, ayuda a redefinir la excelencia del diseño de embarcaciones de cualquier tamaño. Para la realización de estas operaciones se emplean diferentes herramientas que pone a disposición el MAXSURF como son el Modeler, Stability y Motions, que se emplearán para el desarrollo del proyecto, entre otros. (46) (47)



Figura 36: Diferentes software de Maxsurf (47)

El MAXSURF Modeler es un modelador de cascos en 3D. Proporciona un modelado rápido, flexible e intuitivo de cascos, superestructuras, etc. Para el modelado se pueden emplear un número ilimitado de superficies NURBS (Non Uniform Rational B-Spline (48)) recortadas para modelar cualquier embarcación.(49)

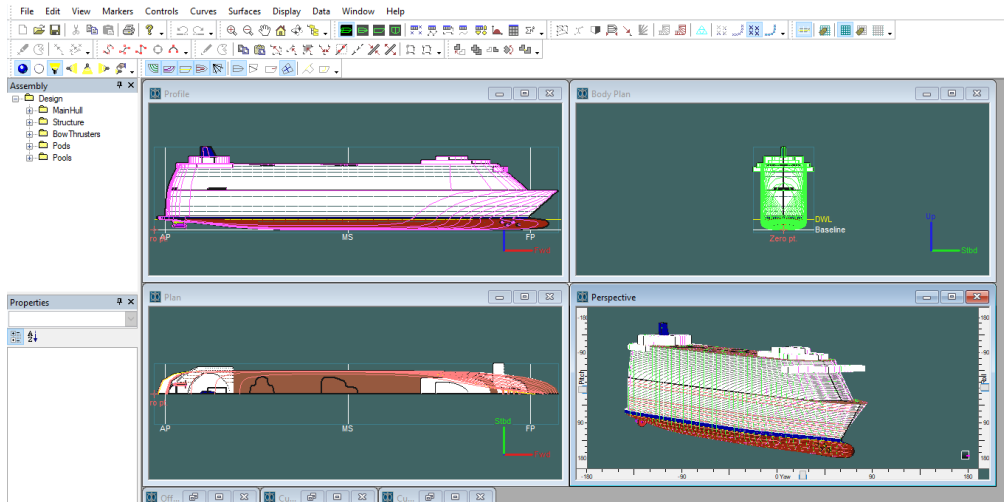


Figura 37: Modelado en el MAXSURF Modeler de un crucero

Por otra parte, el MAXSURF Stability da un cálculo de la estabilidad y resistencia para buques intactos o dañados (daños que el usuario especifique). Después muestra los resultados mediante tablas y gráficos de fácil interpretación, donde entre otras se muestran las curvas de KN y GZ. Además, se pueden añadir tanques y compartimentos en el interior del buque.

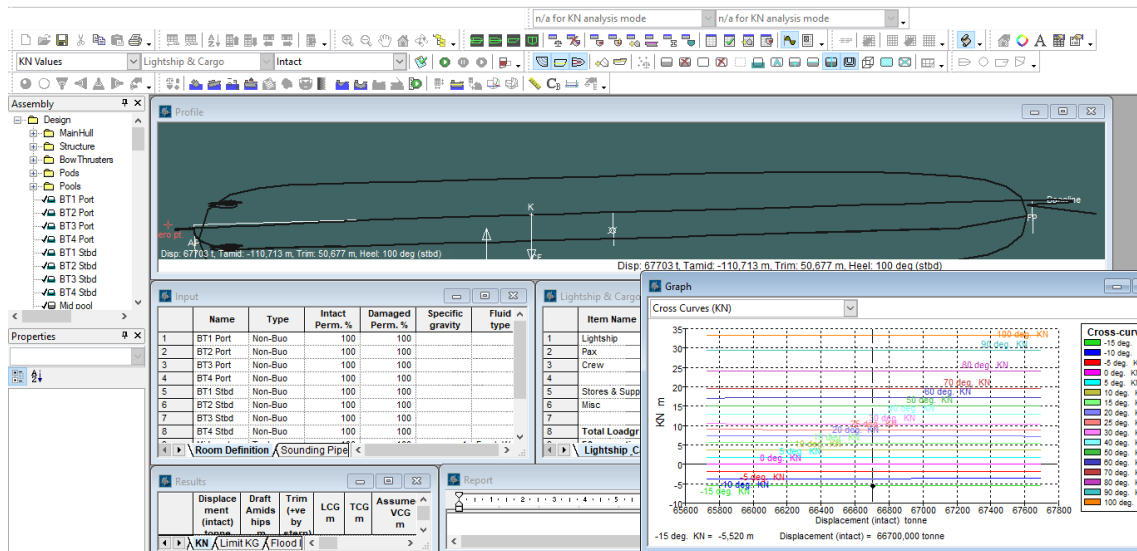


Figura 38: Análisis de los valores KN del crucero de la figura 37 en el MAXSURF Stability

También proporciona una lista de criterios de estabilidad, que el usuario elegirá cuales se aplican. Todos esos criterios se basan en diferentes normativas. (50)

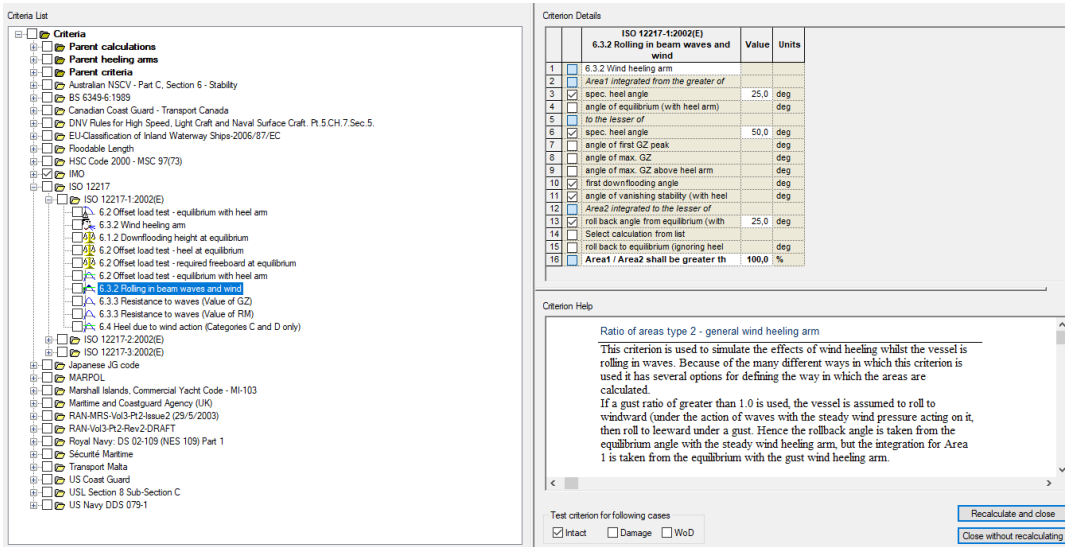


Figura 39: A la izquierda todos los criterios para analizar en el MAXSURF Stability, seleccionando uno a la derecha muestra lo que ha de cumplir el buque

Por último, MAXSURF Motions es un módulo de análisis hidrodinámico del buque. Esta herramienta ofrece un cálculo rápido de la respuesta del buque seleccionado dependiendo del estado del mar que se haya introducido. Los datos se muestran en forma gráfica y tabular y se actualizan automáticamente si se realiza algún cambio. También da la capacidad de visualizar, mediante una simulación, los cambios de mar con varios estados del mismo y la respuesta del buque a mares desde diferentes ángulos, especificados por usuario. (51)

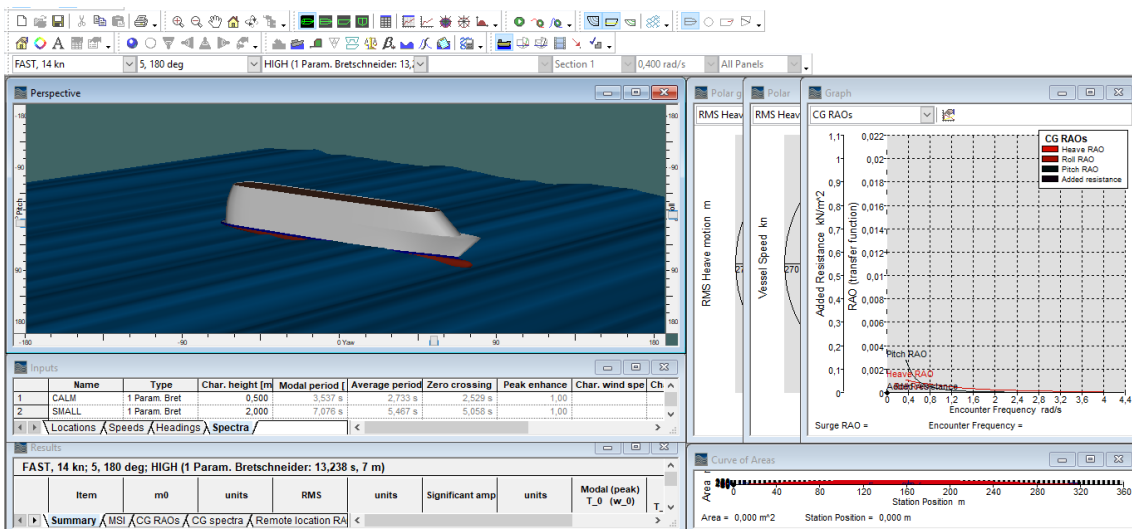


Figura 40: Simulación y resultados del crucero de la figura 37 en el MAXSURF Motions

3.2 Metodología

Ante la importancia que adquieren las energías renovables a cada día que pasa y sobre todo al medio desde el cual mayor cantidad de energía se es capaz de extraer se pensó en idear un nuevo método de extracción de energía undimotriz.

Por ello se comenzó con la idea de desarrollar una máquina eléctrica colocada de manera horizontal, y de proa a popa, en el interior de un buque que tuviese coeficiente de bloque elevado para que pudiera montarse sobre la ola. Ese buque no irá propulsado, sino que estará amarrado a una boya que esta a su vez estará fondeada en posición fija. Además, también se pensó en colocar un aerogenerador eólico, ya que en los lugares en los que hay oleaje fuerte suele haber rachas de viento fuerte.

Teniendo esta información como punto de partida se empezó a buscar el lugar más adecuado en el que colocar el dispositivo. Para ello se tuvieron en cuenta cinco cosas:

1. La existencia de un oleaje con una potencia suficiente como para extraer una gran cantidad de energía.
2. Que haya un viento lo suficientemente fuerte como para hacer que el aerogenerador eólico se encargue de suministrar un mínimo de energía a aparatos que se vayan a instalar en buque, como las luces de posición. Hay que tener en cuenta que la energía principal a extraer es la energía undimotriz, por lo que tendrá preferencia en la búsqueda de una zona en la que colocar el buque.
3. Al tratarse de un dispositivo offshore (ultramar) y hay que amarrar el buque al fondo marino mediante una monoboya anclada al fondo del mar mediante 3 puntos, deberán ser profundidades menores a 200m.
4. Se ideó emplear el dispositivo como fuente de alimentación a buques eléctricos que haya por la zona o traslado de energía a tierra, por lo que ha de estar en una zona con tráfico marítimo y no muy lejos de la costa.
5. Para mantener el buque en buen estado es necesario tener un equipo de mantenimiento en tierra. Por ello el buque ha de estar relativamente cerca de la población.

3.2.1. Localización

Con estas cinco ideas en mente se procedió a la búsqueda de la zona más adecuada para el buque. Para ello se empleó Google Earth para contar con la función en la que muestra la profundidad marina. También se emplean diversas páginas web para:

- Conocer los datos de oleaje de diferentes zonas se emplea entre otras la página web de "Puertos del Estado" (52) en el apartado de oceanografía.



Figura 41: Boyas oceanográficas en las que se mide el oleaje en la página web de "Puertos del Estado"

- Saber el tráfico marítimo de una zona a tiempo real se usa "Marine Traffic" (53).
- Calcular la media de viento de una zona en concreto se puede hacer un estudio entrando a páginas web de predicciones de viento con regularidad, siendo una de las más fiables "Wind finder" (54) y otras de estadísticas mensuales, de registro gratuito obligatorio, como "Wind guru" (55).
- Estudiar las batimetrías de diferentes zonas del mundo para poder encontrar la más adecuada y que sirva de apoyo a la aplicación del Google Earth.

Además, mediante la figura 42 se pudo realizar una aproximación a zonas del mundo en las que el oleaje tuviera mayor energía. Sumando todo eso y teniendo en cuenta las condiciones que teníamos en el punto de partida se encontraron diferentes localizaciones posibles:

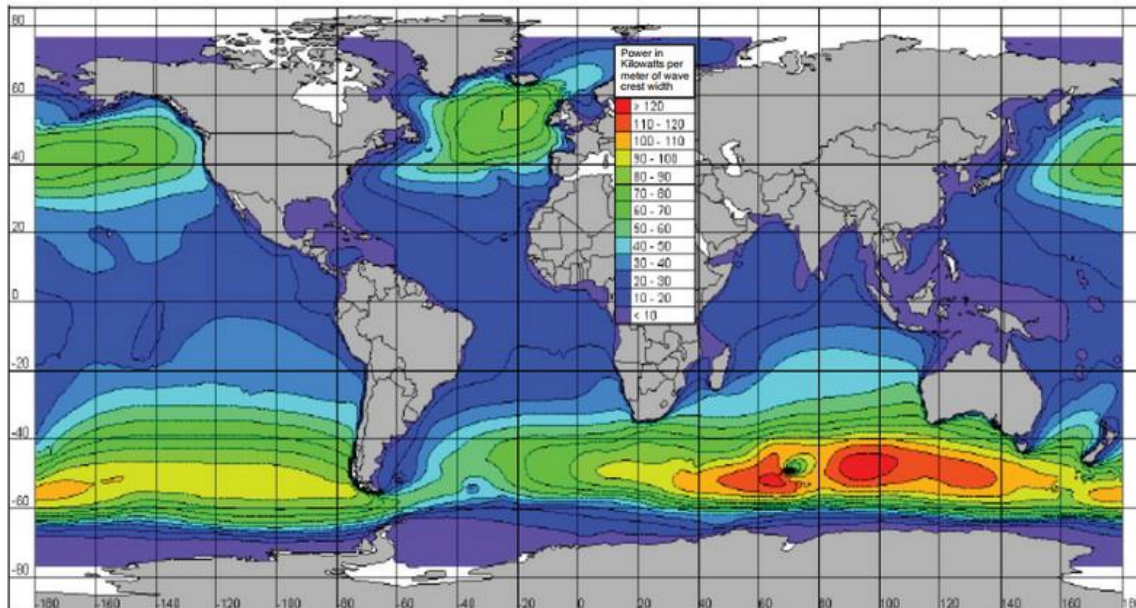


Figura 42: Potencia por metro de frente de ola en todo el mundo (92)

- Hawái:** En cuanto a oleaje es una de las zonas con mayor potencia y, por lo tanto, una de las zonas de las que mayor energía se puede extraer, teniendo un tráfico marítimo considerable. Pero en cuanto a la generación eólica no se puede decir lo mismo, ya que en comparación a otras zonas no tiene tanto viento, sin tener en cuenta que dependiendo de donde se coloque el buque, el propio archipiélago puede actuar como barrera. Además, el fondo marino donde hay oleaje considerable se encuentra a más de 500 metros de profundidad.
- Sudáfrica e islas al sudeste:** Sudáfrica es otra de las zonas que cumple con una energía en el oleaje más que aceptable. Esta zona al contrario que con lo que ocurría con Hawái sí que tiene una cantidad de viento aceptable. El mayor inconveniente es el tráfico marítimo, que en esa zona es excesivo, además de la batimetría de la zona. Cuanto menor profundidad que se tiene menor es la potencia de la ola.

En cuanto a las islas al sudeste de Sudáfrica, son lugares en los que el oleaje en torno a ellas es el que mayor potencia tiene con tierra en comparación con el resto del mundo. La parte negativa está a que son islas despobladas, por lo que para llevar el mantenimiento del buque de manera regular sería tarea imposible.
- Chile:** Por su parte sudoeste, este país recibe unas olas con una potencia elevada, pero su batimetría vuelve a ser un serio problema.

En cuanto se entra mar adentro la profundidad del mar aumenta de manera considerable.

- **Irlanda:** El oleaje por la parte norte y oeste de este país es considerablemente elevado, aunque no tanto como en el caso de las islas al sudeste de Sudáfrica o en la parte sur del Cabo de Hornos. En esta zona si se tiene un viento importante la mayoría de tiempo del año y un tráfico marítimo moderado, sobre todo de pesqueros. También se tiene una profundidad adecuada debido al *"Porcupine Bank"* teniendo una profundidad mínima de 155 metros, punto en el que se colocaría el buque. Pero al igual que en los anteriores casos también se tienen partes negativas como son la distancia a la que se encuentra ese punto de la costa y a que las boyas oceanográficas se encuentran muy alejadas de ese punto.

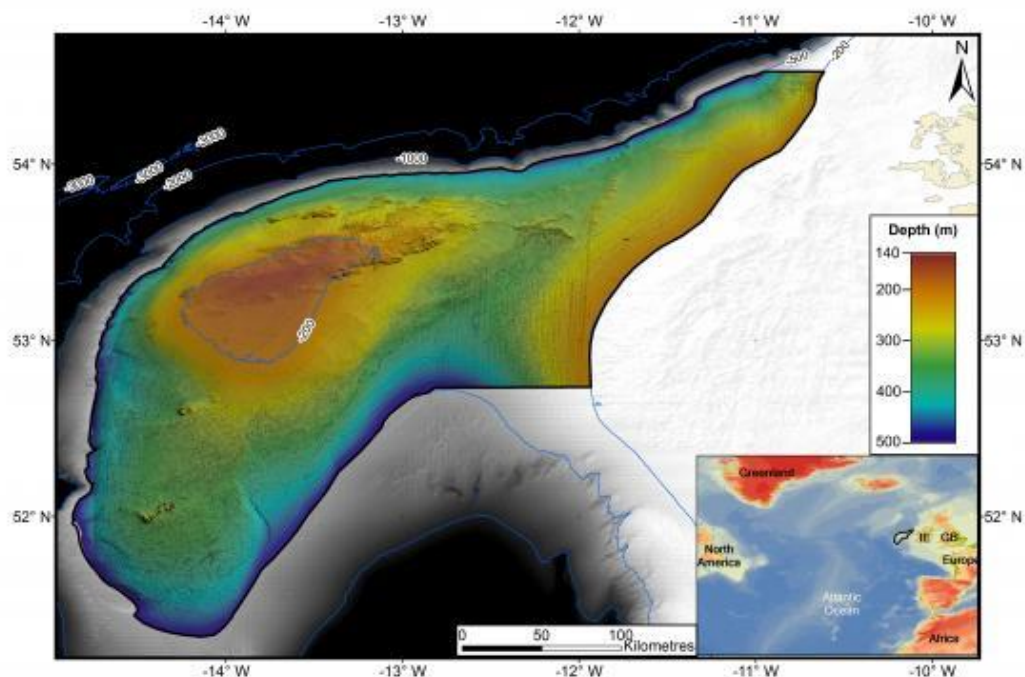


Figura 43: Batimetría del "Porcupine Bank" (93)

De todas las zonas se escogió esta última debido a sus condiciones favorables. Además, los datos de las boyas oceanográficas se pueden coger directamente de la web de "Puertos del Estado", la cual es una página totalmente fiable. En la figura inferior se puede observar cual será la localización final del buque.

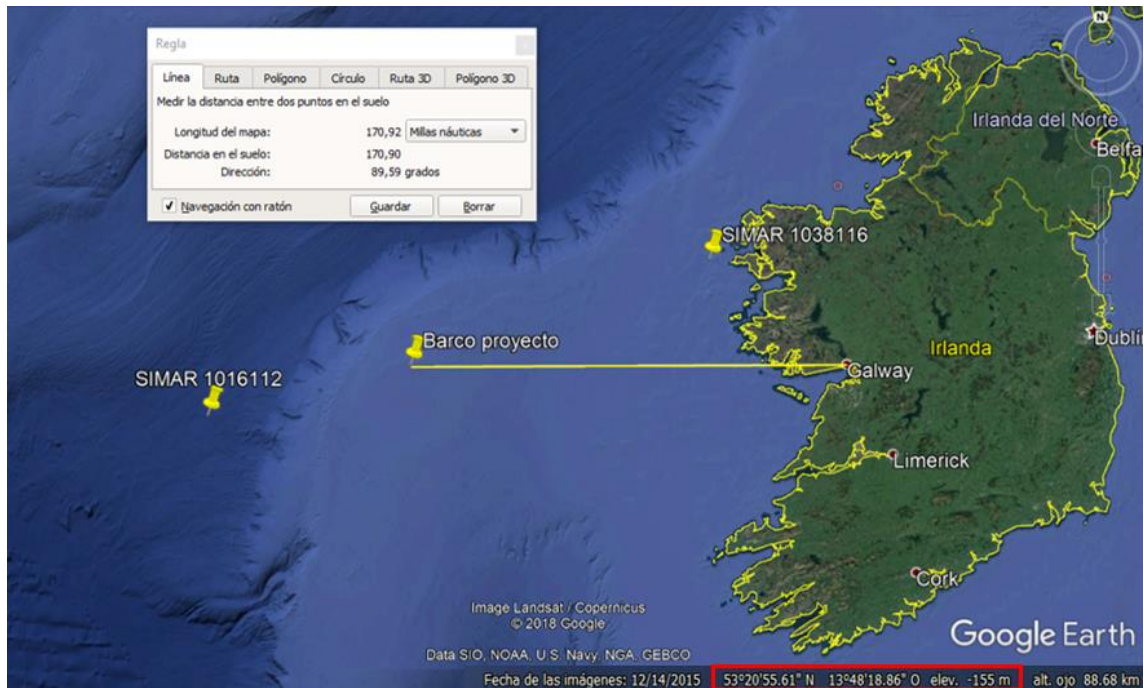


Figura 44: Posición del buque, sus coordenadas, batimetría y distancia de Galway y de las boyas SIMAR de donde se toman los datos del oleaje

Como se puede apreciar, el buque se encuentra en las coordenadas $53^{\circ}20'55,61''\text{N}$ y $13^{\circ}48'18,86''\text{O}$, es decir, a unas 171 millas náuticas (redondeando, a 316km) al oeste de Galway. Esas coordenadas pueden variar ligeramente, ya que el Google Earth no es totalmente fiable en la medición del fondo marino, que se encuentra a 155 metros de profundidad, aunque sí lo suficiente como para conocer una zona cercana adecuada.

3.2.2. Estudio del oleaje

Tras encontrar una localización adecuada después del estudio de diferentes zonas, se parte a obtener la información del oleaje de esa zona. Como la ubicación mencionada se encuentra entre varias boyas oceanográficas, pero no hay datos de la zona en concreto, se sacó la media de dos boyas oceanográficas cercanas la "SIMAR 1016112" y la "SIMAR 1038116". Ambas representadas en unas tablas de altura significativa de ola (H_s), en metros, vs periodo pico de la ola (T_p), en segundos, dando los siguientes valores de porcentajes en las que se repite ese oleaje:

		Periodo pico de ola (s)											TOTAL
		<1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	15>	
Altura significativa de la ola (m)	<=1	0	0,002	0,125	0,5277	1,757	1,083	0,299	0,074	0,024	0,012	0,001	3,905
	2	0	0,001	0,211	1,792	5,852	9,82	5,095	0,958	0,273	0,058	0,02	24,080
	3	0	0	0,006	0,482	3,499	8,245	9,529	3,29	0,861	0,162	0,038	26,112
	4	0	0	0,001	0,008	0,67	3,972	7,216	4,783	1,836	0,33	0,054	18,870
	5	0	0	0,001	0,001	0,027	1,166	4,153	4,125	2,315	0,592	0,094	12,474
	6	0	0	0	0	0	0,114	1,597	2,581	1,984	0,753	0,13	7,159
	7	0	0	0	0	0	0,006	0,35	1,403	1,203	0,638	0,159	3,759
	8	0	0	0	0	0	0	0,026	0,458	0,801	0,503	0,109	1,897
	9	0	0	0	0	0	0	0,003	0,078	0,422	0,357	0,096	0,956
	10	0	0	0	0	0	0	0	0,006	0,14	0,224	0,078	0,448
	10>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,018	0,172	0,163	0,353
	TOTAL	0	0,003	0,344	2,811	11,805	24,406	28,268	17,756	9,877	3,801	0,942	100,0

Tabla 1: Datos de altura significativa y periodo de la ola de la boya SIMAR 1016112. Histórico de 1958 a octubre de 2018

		Periodo pico de ola (s)											TOTAL
		<1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	15>	
Altura significativa de la ola (m)	<=1	0	0,095	1,28	0,915	2,1	2,205	0,999	0,327	0,145	0,047	0,011	8,124
	2	0	0,273	2,902	2,327	4,288	9,037	7,118	2,478	0,844	0,221	0,074	29,562
	3	0	0,21	1,944	0,809	1,753	5,266	8,359	4,511	1,799	0,406	0,114	25,171
	4	0	0,088	0,765	0,371	0,226	1,944	5,03	4,625	2,472	0,63	0,165	16,316
	5	0	0,02	0,247	0,147	0,039	0,328	2,381	3,257	2,343	0,088	0,18	9,03
	6	0	0,005	0,07	0,58	0,016	0,012	0,682	1,876	1,782	0,753	0,244	6,02
	7	0	0	0,03	0,018	0,007	0,001	0,072	0,775	1,087	0,691	0,228	2,909
	8	0	0	0,007	0,009	0,003	0	0,002	0,178	0,604	0,454	0,154	1,411
	9	0	0	0,001	0	0	0	0	0,19	0,215	0,3	0,137	0,843
	10	0	0	0	0,001	0	0	0	0	0,044	0,155	0,088	0,288
	10>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0,076	0,131	0,211
	TOTAL	0	0,691	7,246	5,177	8,432	18,793	24,643	18,217	11,34	3,821	1,526	100,00

Tabla 2: Datos de altura significativa y periodo de la ola de la boya SIMAR 1038116. Histórico de 1958 a 2018

Para el estudio de estas dos boyas, hay que tener en cuenta que la primera se encuentra más al oeste del buque, a unas 82 millas náuticas. También se ha de conocer que el punto en la que está dicha boya se encuentra a una profundidad en torno a 3300 metros por lo que el oleaje en esta zona será mayor, ya que el fondo marino no interferirá en el movimiento que genera las olas. Por otro lado, la boya "SIMAR 1038116", se encuentra a 125 millas al este del barco y en ese punto la profundidad es de 125 metros. Cabe destacar que el punto más cercano a tierra está a 9 millas, lo que sumado al "Porcupine Bank", reduce la energía del oleaje, que será menor a la que haya en la localización del buque. Fueron precisamente estos motivos por los que se decidió sacar la media de ambas boyas para el estudio de la localización del buque.

		Periodo pico de ola (s)											TOTAL
		<1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	15>	
Altura significativa de la ola (m)	<=1	0	0,049	0,7025	0,72135	1,9285	1,644	0,649	0,2005	0,085	0,03	0,006	6,01435
	2	0	0,137	1,5565	2,0595	5,07	9,4285	6,1065	1,718	0,559	0,14	0,047	26,821
	3	0	0,105	0,975	0,6455	2,626	6,7555	8,944	3,9005	1,33	0,284	0,076	25,6415
	4	0	0,044	0,383	0,1895	0,448	2,958	6,123	4,704	2,154	0,48	0,11	17,593
	5	0	0,01	0,124	0,074	0,033	0,747	3,267	3,691	2,329	0,34	0,137	10,752
	6	0	0,003	0,035	0,29	0,008	0,063	1,1395	2,2285	1,883	0,753	0,187	6,5895
	7	0	0	0,015	0,009	0,0035	0,0035	0,211	1,089	1,145	0,665	0,194	3,334
	8	0	0	0,0035	0,0045	0,0015	0	0,014	0,318	0,703	0,479	0,132	1,654
	9	0	0	0,0005	0	0	0	0,0015	0,134	0,319	0,329	0,117	0,8995
	10	0	0	0	0,0005	0	0	0	0,003	0,092	0,19	0,083	0,368
	10>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,011	0,124	0,147	0,282
TOTAL	0	0,347	3,795	3,99385	10,119	21,6	26,456	17,987	10,61	3,811	1,234	100,00	

Tabla 3: Datos de altura significativa y periodo de ola a partir de los históricos entre 1958 y 2018 de las boyas SIMAR 1016112 y 1038116

Una vez teniendo los datos, es importante conocer la distancia de la pendiente de la ola desde el valle hasta el pico para saber cuál puede ser la eslora máxima del buque. Si la eslora fuera mayor a la longitud de la pendiente, el buque no cogería toda la pendiente, por lo que quedaría entre medias y no cogería toda la energía aprovechable, cosa que pasará con olas más pequeñas a las óptimas de diseño del buque. En cambio, si la eslora fuera menor a esa longitud de pendiente, el buque montaría en la ola, pero no sería capaz de sacar toda la energía si el buque se diseñara para esa ola, sino que extraerá la energía máxima para la ola para la que haya sido diseñado. Es importante tener en cuenta que los cálculos se han realizado como si las olas fueran ondas senoidales.

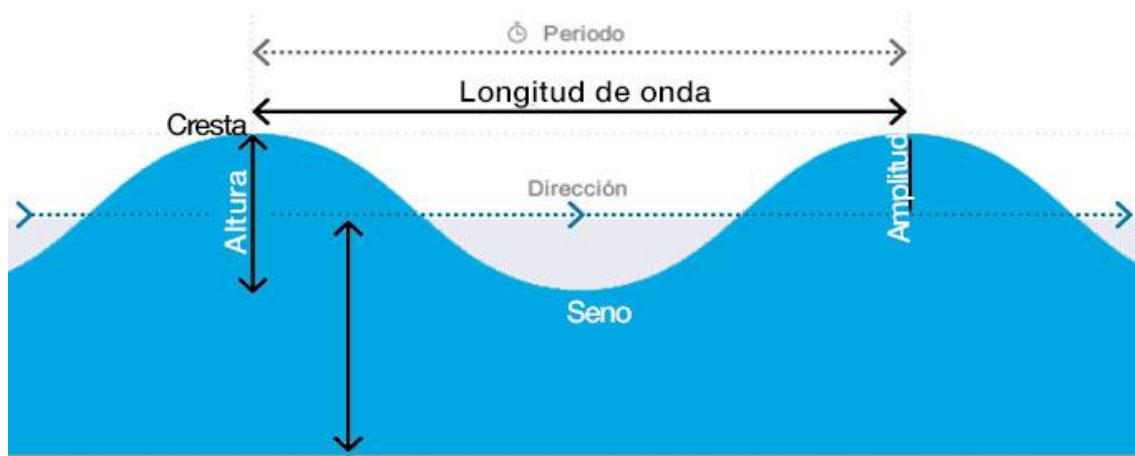


Figura 45: Características de la ola como onda senoidal (94)

Partiendo de las tablas se tienen tanto el periodo de la ola (T_p) como la altura significativa (H_s). La longitud de la ola (λ) es la distancia que hay entre crestas de la ola o entre valles o senos de la misma, por lo que la distancia entre cresta y seno en el plano horizontal será la mitad de la longitud de la ola ($\lambda/2$):

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{1,56 \cdot T_p^2}{2}$$

Para calcular la longitud de la pendiente entre cresta y seno habrá que utilizar el Teorema de Pitágoras, ya que se considerará como si fuese una pendiente recta:

$$\text{hipotenusa} = \sqrt{\text{cateto}^2 + \text{cateto}^2}$$

O como se muestra en la imagen, que son las unidades de la ola:

$$L_{max} = \sqrt{H_s^2 + \frac{\lambda^2}{2}}$$

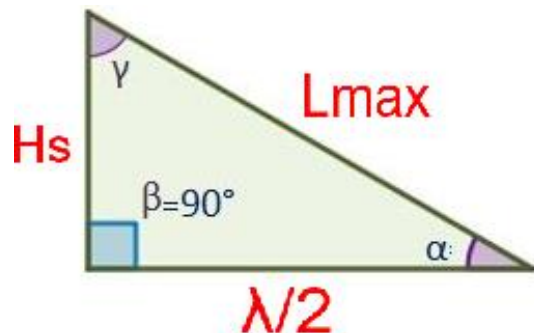


Figura 46: Triángulo rectángulo con las características de las olas (95)

De donde se consigue obtener la eslora máxima que pueda tener nuestro buque (L_{max}).

Para calcular el ángulo de pendiente de la ola desde el seno hasta la cresta (α), también llamado ángulo crítico, hay varias formas, pudiendo utilizar el seno, coseno o tangente. En este caso se empleó la última manera:

$$\tan \alpha = \frac{H_s}{\lambda/2}$$

Teniendo el ángulo calculado, se pasa a calcular la aceleración con la que caerá el imán dentro de la máquina eléctrica. Para eso se calcula como si fuera una masa que cae por un plano inclinado. El ángulo del plano inclinado será el de la pendiente de la ola del seno a la cresta (α), ya que, en teoría, el buque se monta sobre la ola y la máquina eléctrica está en posición horizontal dentro del buque. Además, se calculó la masa (m) del imán de 160kg. Se pensó en un imán que recorriese de 2 metros de largo, que circulará en un estator de 4 metros de longitud. Partiendo de la ecuación de la segunda ley de Newton:

$$F = m \cdot a$$

Donde las fuerzas en el plano inclinado son el peso del imán ($P=m \cdot g$) y la fuerza de rozamiento de los patines por los que circula, siendo el factor de rozamiento (μ) de 0,04 para superficies de teflón contra teflón (56):

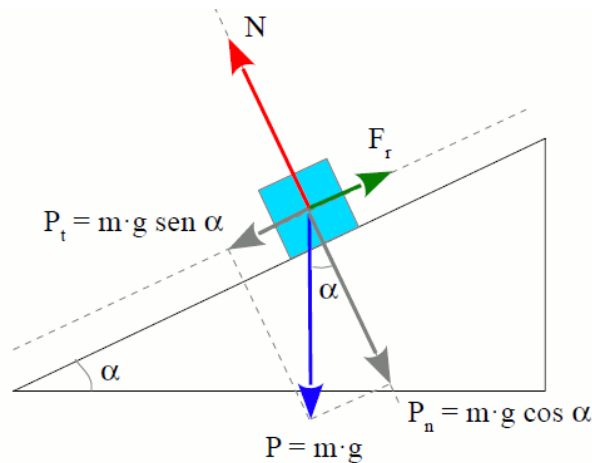


Figura 47: Fuerzas que actúan sobre una masa estando en un plano inclinado (96)

$$\sum Fx = Px - Froz = m \cdot g \cdot \sin \alpha - m \cdot g \cdot \mu \cdot \cos \alpha = m \cdot a$$

Simplificando se tiene que la aceleración (a) es:

$$g(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha) = a$$

En las olas que dan como resultado una aceleración del imán permanente un valor negativo, son eliminadas debido a que el imán no puede vencer la fuerza de rozamiento, por lo que no se moverá de esa situación inicial.

Conociendo la aceleración, se pretende calcular el tiempo que tarda el imán en realizar todo ese recorrido (t), que debería ser menor a la mitad del periodo de la ola, y de la velocidad al final del recorrido del imán (v) se parte de las ecuaciones de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, teniendo en cuenta que se parte del reposo ($V_0=0$):

$$d = V_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \qquad t = \sqrt{\frac{2 \cdot d}{a}}$$

$$V = V_0 + a \cdot t \qquad V = a \cdot t$$

Para el cálculo de la potencia de las olas hay una formula general para según qué periodo de ola (T_p) y que altura significativa se tenga (H_s):

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot Hs^2 \cdot Tp}{64\pi}$$

Donde la densidad del agua de mar (ρ) es de $1,025\text{kg/m}^3$ y la gravedad (g) es de $9,8\text{m/s}^2$.

En este cálculo de potencia extraíble posible, se han de tener en cuenta las posibles pérdidas en cableado antes del almacenamiento en las baterías de 0,96. Por todo esto, para una altura significativa de ola de 3,5 metros y un periodo pico de 9 segundos, se tiene que la potencia extraíble es de en torno a 343kVA.

Seguidamente, y teniendo en cuenta que se trata de una máquina eléctrica, hay que tener en cuenta el cogging, que son las fuerzas de atracción que se encuentran en los motores eléctricos debido al uso de imanes permanentes (21), la fuerza de Maxwell.

Para calcularlas inicialmente se ha de calcular el área de entrehierro ($A\delta$), pero previamente hay que calcular el esfuerzo cortante en el entrehierro de la máquina (F), que es la relación entre la potencia, que en este caso es la potencia previamente calculada (P) y la velocidad del imán permanente (v) también calculada:

$$F = \frac{P}{v}$$

Una vez obtenido el esfuerzo cortante y sabiendo que el valor máximo de esfuerzo cortante por unidad de superficie (f_s) para una máquina de inducción es de 40kN/m^2 , se procede a calcular el área en el entrehierro:

$$A\delta = \frac{F}{f_s}$$

Después se calculará la fuerza de Maxwell (F_{st}), conociendo los valores de la inducción magnética máxima en el entrehierro ($\beta\delta_0$) es de $0,7\text{T}$ y el coeficiente de permeabilidad magnética (μ_0) es de $4\pi 10^{-7}\text{H/m}$:

$$F_{st} = \frac{\beta\delta_0^2 \cdot A\delta}{2 \cdot \mu_0}$$

A continuación, habría que descomponer esta fuerza para contraponerlos con los obtenidos del plano inclinado, lo que hará que esos valores aumenten o disminuyan dando como resultado que la potencia total que la máquina eléctrica sea capaz de extraer sea mayor o menor, ya que el imán permanente bajará con mayor o menor aceleración.

Finalmente, con las nuevas velocidades obtenidas (v) en el nuevo cálculo de plano inclinado y movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, y conociendo que el esfuerzo cortante por unidad de superficie (f_s) para la máquina de inducción es de 40kN/m^2 y que el área de entrehierro (A_δ) para la máquina ideada es de $10,64\text{kN}$, se calcula la potencia (P) que se puede extraer para cada tipo de ola, que dependiendo de la pendiente que tenga tendrá una velocidad u otra:

$$P = A_\delta \cdot f_s \cdot v$$

La realización de estos cálculos se ha llevado a cabo en Microsoft Excel, calculando para cada altura significativa y cada periodo de ola todos estos valores, dando como resultado cálculos desarrollados en tablas de 25 columnas y 46 filas. Finalmente, se obtendría una tabla, de menor tamaño, de potencias que se verá en el apartado de resultados.

3.2.3. Máquina eléctrica

Para la realización de los cálculos eléctricos se emplearán varias fórmulas sacadas de diferentes libros y trabajos. Entre ellos que destacan un libro "CÁLCULO INDUSTRIAL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TOMO II" (57) y un trabajo de fin de grado de la Universidad de Cantabria, "DISEÑO, DIMENSIONADO Y SIMULACIÓN DE UN GENERADOR LINEAL PARA EL DESARROLLO DE UNA BOYA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ" (21).

Los primeros cálculos para el diseño de la máquina eléctrica se llevaron a cabo en el LabVIEW. Después, teniendo los datos iniciales se pasó a una hoja de Microsoft Excel. Antes de realizar todos los cálculos, es importante conocer que se está calculando. Muchos de los parámetros que se van a dar a conocer mediante fórmulas matemáticas aparecen descritas en la figura inferior:

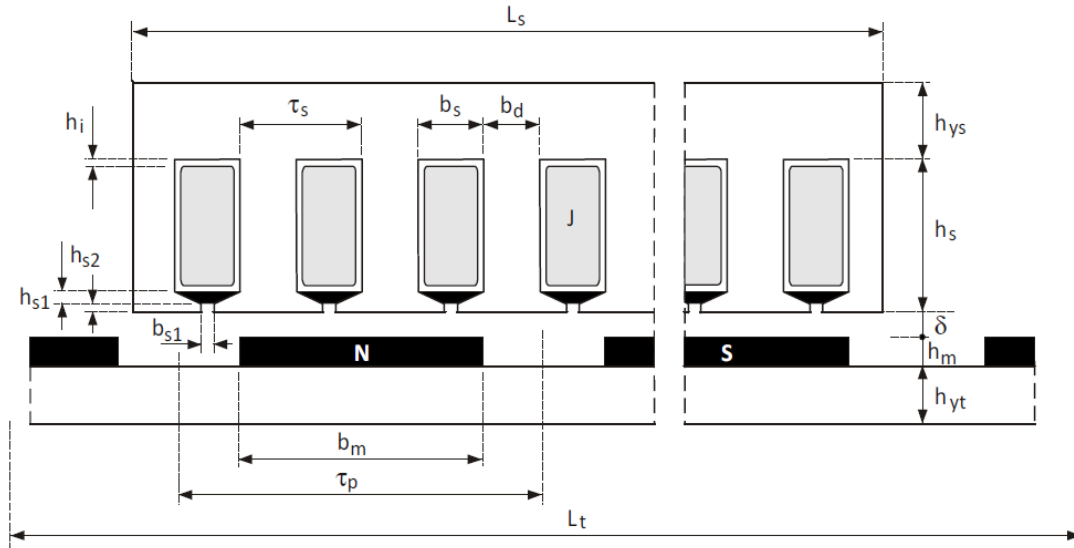


Figura 48: Esquema del traslator y estator de la máquina eléctrica y medidas de los mismos (21)

Se parte desde los datos que se tienen en los cálculos anteriores de longitud del estator (L_s) y área de entrehierro (A_δ), para conocer el ancho del inducido (A_s):

$$A_s = \frac{A_\delta}{L_s}$$

Después, se obtiene el paso polar (τ_p). Además, se ha de tener en cuenta que tiene que mantener una relación con el ancho del inducido:

$$\tau_p = \frac{L_s}{2p} \quad 8 \leq \frac{A_s}{\tau_p} \leq 14$$

Donde p es el número de pares de polos. Es por ese motivo por el que se tiene la relación del paso polar con el ancho del inducido, para ir jugando con el número de pares de polos hasta encontrar un paso polar adecuado.

Conociendo el número de pares de polos y el paso polar, junto con los últimos cálculos, se calcula el paso de la ranura (τ_s), donde m es el número de fases del devanado y q el número de ranuras por polo y fase:

$$\tau_s = \frac{\tau_p}{m \cdot q} \quad q = \frac{Q}{6p}$$

Siendo Q el número total de ranuras. El número de fases del devanado, m , es igual a 3.

El entrehierro mecánico (δ), debe ser el menor posible para minimizar el volumen de los imanes permanentes (21). Además, como ocurría con el paso polar, se tienen una relación entre el paso polar y el entrehierro. Si estuviera fuera de esos límites la onda de inducción en el entrehierro en carga podría deformarse.

$$\delta = 0,001 \cdot \frac{Ls}{\pi} \quad 12 \leq \frac{\tau_p}{\delta} \leq 32$$

La anchura equivalente de núcleos de hierro estator y traslador (A_e) se calcula:

$$A_e = A_s + 2 \cdot \delta$$

Y la anchura útil de núcleos de hierro estator y traslador (A_u) de esta otra manera:

$$A_u = K_{fe} \cdot A_s$$

Donde K_{fe} es el factor apilado de las chapas magnéticas, que en este caso es de 0,97.

El ancho del imán (b_m) viene determinado por:

$$b_m = 0,7 \cdot \tau_p$$

Para la longitud media de las espiras (L_{esp}), previamente hay que conocer la longitud media de una cabeza de bobina (L_{cb}):

$$L_{cb} = 2 \cdot \tau_p \quad L_{esp} = 2 \cdot (A_s + L_{cb})$$

La altura del yugo estator (h_{ys}) y la altura del yugo traslador (h_{yt}) vienen definidas por las siguientes formulas:

$$h_{ys} = \frac{B_{\delta 0} \cdot b_m \cdot A_e}{2 \cdot B_{ys} \cdot A_u} \quad h_{yt} = \frac{B_{\delta 0} \cdot b_m \cdot A_e}{2 \cdot B_{yt} \cdot A_u}$$

Donde $B_{\delta 0}$ es la inducción máxima en el aire del entrehierro, que tiene un valor de 0,78T. B_{ys} y B_{yt} son los campos magnéticos en el yugo estator y

traslador respectivamente y ambos tienen un valor de 1,2T, por lo que la altura del yugo estator y traslador van a tener el mismo valor.

En cuanto a los dientes, se puede saber su ancho (b_d) mediante la siguiente fórmula:

$$b_d = \frac{B\delta o \cdot \tau_s \cdot Ae}{Bdo \cdot Au} \qquad b_d > \frac{hs}{4}$$

La segunda fórmula se trata de la rigidez y sollicitaciones mecánicas de los dientes de hierro del inducido, y a de verificarse esa relación que tiene con la altura de la ranura (h_s) que se calculará más adelante. De la primera fórmula hay que comentar que B_{do} es la inducción máxima en el aire en los dientes y tiene un valor de 1,64T.

Una vez se tenga el valor del ancho del diente, se puede calcular también la anchura de la ranura (b_s):

$$b_s = \tau_s - b_d$$

Para saber la altura del devanado (h_{s3}) primero hay que conocer la altura de la ranura (h_s), del diente (h_{s1}) y de la cuña de la ranura (h_{s2}):

$$h_{s3} = h_s - h_{s1} - h_{s2} \qquad h_s = \frac{1'8 \cdot Ar}{b_s}$$

Los valores de las alturas del diente y de la cuña de la ranura son de 2 y 4 milímetros respectivamente. En cambio, para conocer el valor de la altura de la ranura, y por tanto la del devanado habrá que saber qué valor tiene la sección de la ranura (A_r), expresada en metros cuadrados:

$$A_r = \frac{Z_q \cdot S_{cu}}{10^6}$$

Donde Z_q es el número de conductores que hay por ranura, que serán 11, y S_{cu} es el área de cada conductor, que tiene un valor de 40 milímetros cuadrados. El divisor de la ecuación será para convertir los milímetros cuadrados a metros cuadrados.

Aun con todas las operaciones realizadas hasta el momento, faltaría conocer las dimensiones del cobre en la ranura, tanto el ancho (b_{cu}) como la altura

(h_{cu}), pero para ello hay que conocer el espesor del aislamiento de la bobina (h_i) que en este caso es de 0,001 metros:

$$bcu = bs - 2 \cdot hi \quad hcu = hs3 - 2 \cdot hi$$

En lo que al factor de devanado ($\xi_{w(1)}$) respecta, que es la componente fundamental de la onda de inducción del entrehierro, se expresa en función de los factores de distribución ($\xi_{d(1)}$) y de paso ($\xi_{p(1)}$):

$$\xi_{d(1)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}\right)} \quad \xi_{p(1)} = \cos\left[\frac{2}{\pi}\left(1 - \frac{Q}{2 \cdot m \cdot q}\right)\right]$$

$$\xi_{w(1)} = \xi_{d(1)} \cdot \xi_{p(1)}$$

Para saber qué número total de conductores (Z), de conductores por fase (Z_f) y de espiras por fase (N_f) se harán los siguientes cálculos:

$$Z = Q \cdot Zq \quad Zf = \frac{Z}{m} \quad Nf = \frac{Zf}{2}$$

También hay que calcular el número total de bobinas (B), el número de bobinas por fase (B_f) y el número de espiras por bobina (N_B):

$$B = \frac{Q}{2} \quad Bf = \frac{B}{m} \quad NB = \frac{Nf}{Bf}$$

Entrando más en la parte de potencias y dejando a un lado el diseño de la máquina eléctrica, se tiene que la densidad de corriente (J_{rms}), previamente hay que calcular la intensidad de fase (I_f), o intensidad por conductor es:

$$I_f = \frac{1000 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U_f} \quad Jrms = \frac{I_f}{Scu}$$

Donde en las ecuaciones, P es la potencia previamente calculada para la ola a la que se diseñará la máquina que es de 379kVA y U_f es la tensión por fase, que es de 440V.

Teniendo el valor de la densidad de corriente, se puede calcular la carga específica lineal (q_e):

$$q_e = \frac{J_{rms} \cdot Zq \cdot Q \cdot S_{cu}}{L_s}$$

La resistencia por fase del inducido (R_f) se calcula como:

$$R_f = \frac{I_f \cdot \rho_{cu}}{S_{cu}}$$

En la ecuación, ρ_{cu} es la resistividad del cobre, que en este caso es de 1/58, aunque suele variar con la temperatura.

Por último, se calculará la potencia total que se saca de la máquina desarrollada mediante los cálculos, para conocer si se podría obtener la potencia para la que ha sido diseñada:

$$P = \frac{2 \cdot \left[\left(\frac{A_{cu}}{10000} \right) \cdot B\delta o \cdot J_{rms} \cdot \left(\frac{A\delta \cdot 100}{2} \right) \cdot v \cdot \xi \cdot Bdo \right]}{0,27 \cdot 1000}$$

Donde δ es el factor de bobinado que tiene un valor de 0,96 y A_{cu} es la sección transversal del cobre en las ranuras que se calcula de la siguiente manera:

$$A_{cu} = 2 \cdot p \cdot Zq \cdot S_{cu} \cdot q \cdot m$$

3.2.4. Aerogenerador

Como se pensó desde un inicio, el buque debería llevar un molino eólico en cubierta para poder generar energía a los componentes del buque, tales como las luces de posición, bombas de sentina, etc.

Teniendo ya una zona elegida para colocar el buque, se requerían aerogeneradores capaces de captar la máxima potencia del viento en esa zona de Irlanda. Según el historial de la página web de "Windguru" (55) la media en 2018 en la ciudad de Clifden (punto más cercano del buque a la costa) fue de 8,01 m/s, llegando a alcanzarse días en los que se tienen medias de 20 m/s, aunque lo más habitual es que no se superen los 13 m/s en al menos 30 días al año. Datos similares a los de 2017, en el que la media de viento fue de 7,93 m/s.

Ireland - Clifden (The White Lady), Lat: 53.4883, Lon: -10.0843, Zona horaria: GMT+1 [Detalle / Mapa], archivo disponible: 03.01.2012 - 26.05.2019

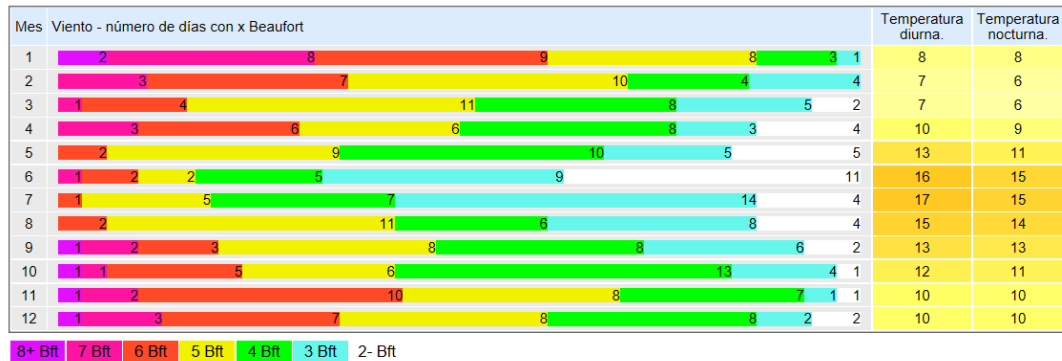


Figura 49: Días de viento en escala Beaufort en 2018 por cada mes en Clifden, Irlanda (97)

En ese apartado los aerogeneradores de eje horizontal son los mejores, pero entre sus desventajas está el que el rotor del molino tiene que orientarse para buscar el viento de la mejor manera posible. Al tratarse de un buque que está en constante movimiento dificulta que el aerogenerador se oriente de manera adecuada, por lo que se descartó el de eje horizontal. Es por ese motivo por el que se decidió por colocar un aerogenerador vertical, que no tiene que auto orientarse y además a la hora de realizar la distribución de masas de su rotor se puede considerar que permanece en la misma posición.

Tras una búsqueda de aerogeneradores de eje vertical en internet, se decidió incorporar al buque un "Kliux Zebra" (58), ya que es ligero, alto y adecuado para el viento de la zona. Además, está compuesto de 9 álabes, lo que da una mayor capacidad de coger el viento, incluso con el oleaje del mar.

Está compuesto de una torre de 6 metros de altura y un peso de 351kg, un generador de 0.83 metros de alto cuya potencia nominal es de 1800 W a unas revoluciones por minuto de 70, y un rotor de 9 álabes de poliuretano expendido con una altura de 3,1 metros y un diámetro de 2,3 metros. El peso del conjunto generador y rotor es de 375 kg.

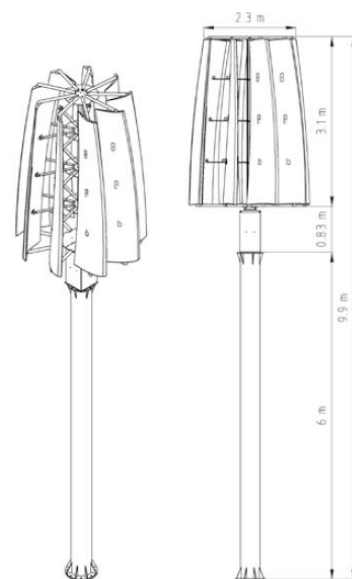


Figura 50: Dimensiones del aerogenerador Kliux Zebra (58)

En lo que respecta a la energía producida según la media de viento se puede apreciar en la siguiente tabla y figura:

Media de viento (m/s)	Energía anual generada (kWh)
4	736
5	1789
6	2616
7	3717
8	4793
9	5693
10	6296
11	6892

Tabla 4: Energía anual generada (kWh) por media de viento (m/s) por el "Kliux Zebra" (58)

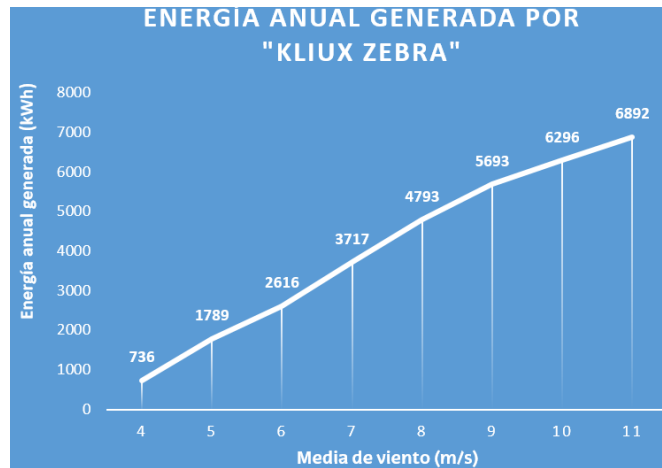


Figura 51: Gráfica de la energía anual generada (kWh) por media de viento (m/s) por el "Kliux Zebra" (58)

Observando tanto la tabla 6 como la figura 41 comparandola con la figura 38, se puede decir que al ser la velocidad media del viento ronda los 8 m/s se extraerán entre 3717 y 4793 kWh al año de este aerogenerador.

3.2.5. Almacenamiento de energía

Para terminar con los componentes eléctricos, se calculó la capacidad y las dimensiones de las baterías del buque. Se comenzó por tratar de introducir las baterías bajo cubierta. Pero dado que se pretendía tener un buque que fuera capaz de albergar grandes cantidades de energía a bordo, por si en un futuro se colocan más máquinas eléctricas en el buque y con la idea de tratar de elevar el centro de gravedad del buque para ayudar al balanceo en las olas, finalmente se optó por colocar las baterías en forma piramidal sobre cubierta. Dichas baterías quedarían cubiertas por chapas para protegerlas de la intemperie, como se mostrará en el modelado del buque.

Después, se pensó en un posible buque que pudiese requerir de energía eléctrica. Dado que en la zona del oeste de Irlanda hay una zona de pesca, se pensó en derivar energía a unos arrastreros. Algunos de ellos requieren 6 MW de potencia, por lo que se ideó suministrar un cuarto de dicha potencia, es decir, 1,5MW, por dos horas de funcionamiento del arrastrero empleando solo la energía suministrada. Para calcular las baterías que es necesario que se tengan en el buque, se emplea la siguiente fórmula:

$$E_{\text{baterías}} = \frac{kW (\text{arrastrero}) \cdot h (\text{arrastrero})}{DoD \cdot \eta}$$

Donde el DoD es el “Depth of Discharge” que en este caso será de 0,8 para que las baterías no se vacíen más de un 80%, aumentando su vida útil, y η es el rendimiento de la instalación de almacenamiento del buque proyecto. La ecuación da como resultado que se han de almacenar 3947,368kWh. Para facilitar la búsqueda se redondeó a 4000kWh de energía de almacenamiento. Además, de este modo, si algún módulo fallara se tendrían de repuesto.

Una vez calculada la energía que se quería almacenar, se comenzó a buscar diferentes compañías de venta de módulos de baterías. La compañía que mejor se adaptaba es “Leclanché” (59) que además ha trabajado con Kongsberg (60), lo que demuestra que esas baterías pueden emplearse en ambientes marinos.

Esta empresa suministra dos tipos de módulos de baterías, que se muestran en sus catálogos. Un tipo de módulos son con baterías de litio grafito (G-NMC)(61) y otro tipo son las de litio titanio (LTO) (62). Se eligen estas últimas por las ventajas respecto a las primeras en los ciclos de carga y descarga que pueden realizar (15000 ciclos completos), tiempo de carga y descarga y temperatura a las que deben operar (-20°C-55°C).



Figura 52: Baterías de litio de Leclanché (62)

Para la colocación en el buque se opta por el módulo de baterías colocados 11 en serie y 3 en paralelo y poder tener 33 células en uno. Este tipo de módulos tiene una capacidad nominal de 90 Ah y una potencia nominal de 2,3 kWh. Es capaz de dar un voltaje máximo de 29,7 V y un mínimo de 18,7 V, siendo el nominal de 25,3 V. Cada módulo tiene 334 mm de alto, 175 mm de ancho y 537 mm de largo y pesa 49,5 kg.

Para alcanzar los 4MWh de energía que puedan almacenar, será necesario colocar 1740 de estos módulos. En total se alcanzará un peso de 86,13 toneladas y llegará a ocupar un volumen total de 58,29 metros cúbicos. Es por este último dato por lo que se decide poner sobre la cubierta del buque un tronco pirámide en el que cada lateral de la base grande, la que está en contacto con la cubierta, sea de 6 metros y cada lateral de la base pequeña sea de 3 metros. La altura del tronco pirámide será de 4 metros, por lo que será capaz de albergar un volumen de 84 metros cúbicos, suficiente como para que quepan todas las baterías en su interior.

Cabe destacar que el aerogenerador irá montado sobre la base pequeña del tronco pirámide con el objetivo del rotor del mismo esté lo más elevado posible y evitar que el oleaje haga de barrera para el viento.

3.2.6. Buque

Por último, se procede a desarrollar un buque de acuerdo a las características del oleaje de la zona. Para el desarrollo del buque se emplea el MAXSURF Modeler, Stability y Motions.

Se parte empleando el Modeler con la idea de que ha de tener un coeficiente de bloque elevado, y que la máquina eléctrica y el paquete de baterías que más adelante haya que colocarle quepa en el buque. Además, se ha de tener claro para que tipo de olas ha de diseñarse, que debería ser para el mismo tipo de ola que para la máquina eléctrica. Como punto de partida se toma la eslora que ha de tener como máximo, que para el caso de olas de 4 metros de altura significativa y un periodo de 10,5 segundos será de 86,09 metros.

La parte negativa de tener una eslora tan elevada es que olas de menor periodo a misma altura de ola no podrían ser aprovechadas correctamente. Es por ese motivo por el que la eslora del buque será menor, así el buque será

capaz de captar energía de olas de menor periodo, manteniendo la ventaja de poder captar energía de la ola de diseño de la máquina eléctrica.

Además de la eslora, se ha de tener en mente, que para que el buque se monte encima de la ola ha de tener un coeficiente de bloque lo más elevado posible. El coeficiente de bloque (K_b), es la relación adimensional establecido por el volumen desplazado por el buque (∇) y el volumen de un prisma rectangular que tiene por dimensiones la eslora (E), manga (M) y calado (C) del propio buque hasta la línea de flotación (63):

$$K_b = \frac{\nabla}{E \cdot M \cdot C}$$

Con estos datos, se inició el diseño del buque en el MAXSURF Modeler. En la librería del propio programa se encontró un buque de estas características, aunque se retocó la eslora para reducirla, además de modificar la popa y proa del buque para elevar el coeficiente de bloque. También se le colocó la cubierta para aislar la máquina eléctrica del exterior. Finalmente se colocó el espacio donde se guardan los módulos de baterías y el aerogenerador eólico.

Después se pasa al uso del MAXSURF Stability para comprobar la estabilidad del buque. Primero, continuando con el buque en rosca, se comprueba su flotabilidad, para observar si se tiene alguna fuga o no y el programa ofrece una visión del centro de gravedad y de flotación.

Después, se introducen diferentes pesos en el buque, como es la máquina eléctrica, el aerogenerador y las baterías. Con esos datos introducidos se calculará el nuevo centro de gravedad del buque en su sentido longitudinal, transversal y vertical. Seguido, se calcularán las hidrostáticas para continuar con el valor del GZ y del KN.

Por último, teniendo en cuenta el tipo de buque que es, se probará que cumpla con los criterios de la normativa. En este caso los criterios de la norma UNE ISO 12217-1 de "Evaluación y clasificación de la estabilidad y la flotabilidad. Parte 1: Embarcaciones no propulsadas a vela de eslora igual o superior a 6m" (64) y la resolución de la IMO A.749(18) Capítulo 3: "Criterios

de diseño aplicable a todos los buques”, sobre todo el primer punto “Criterios generales de estabilidad intacta para todos los buques” (65).

Para terminar con el estudio del buque, se pasa a emplear el MAXSURF Motions. En este software se ponen las características de mar que se desean, entre ellas las de diseño del buque. Después, se observará el comportamiento del buque a esas condiciones para completar un análisis hidrodinámico del buque. Además, mediante este método puede observarse los movimientos del buque a cierto tipo de oleaje con una simulación muy aceptable. Esto es un valor añadido, ya que nos permite conocer si el buque es capaz de montarse en la ola, cosa muy importante para tener una mayor captación de la energía de la ola.

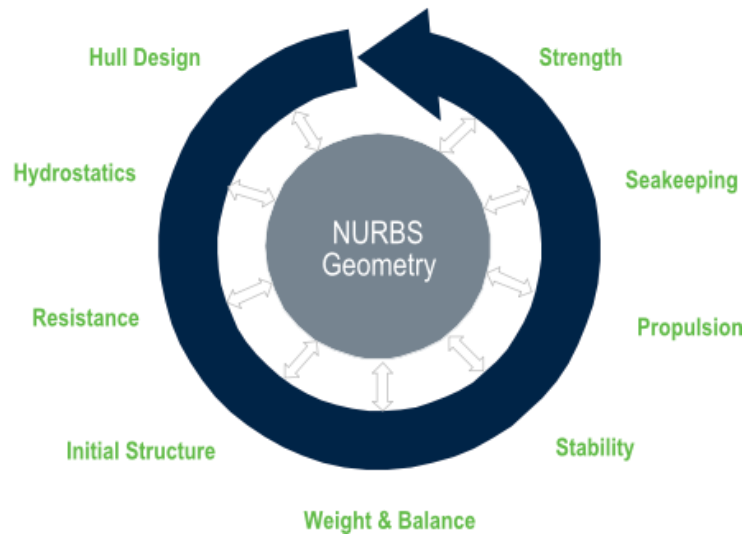


Figura 53: Espiral de optimización del diseño del buque (47)

Con todos estos pasos se finalizaría la primera parte del proyecto, que es la parte en la que mayor desarrollo se le dan a las fórmulas matemáticas y simulación.

4. Resultados

De todos los pasos seguidos en el apartado de métodos se extraen algunos resultados muy importantes, sin tener en cuenta los subapartados de localización, aerogenerador y baterías que ya se calcularon completamente en dicho lugar:

4.1. Potencia extraída según característica de oleaje

Dependiendo de las características del oleaje la máquina eléctrica será capaz de extraer diferentes cantidades de potencia. Hay que mencionar que las características de ola para que el funcionamiento de la máquina eléctrica sea óptimo es de una altura significativa de 4 metros y un periodo pico de 10,5 segundos. Todas esas potencias se muestran en la siguiente tabla, también denominada matriz de potencias:

		Periodo pico de ola (s)											
		<1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	15>	
Altura significativa de la ola (m)	<= 1	-	1.052,19	591,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	1.504,41	982,97	659,68	360,65	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	1.804,66	1.229,87	885,92	636,43	397,25	-	-	-	-	-	-
	4	-	2.024,00	1.421,67	1.052,19	797,34	591,70	379,00	-	-	-	-	-
	5	-	2.189,02	1.580,35	1.188,84	922,45	718,78	540,12	336,71	-	-	-	-
	6	-	-	1.715,49	1.306,62	1.027,99	820,02	647,97	485,20	269,29	-	-	-
	7	-	-	1.832,37	1.410,79	-	906,46	734,45	582,36	426,54	-	-	-
	8	-	-	-	1.504,41	-	-	808,56	659,68	519,51	360,65	-	-
	9	-	-	-	-	-	-	874,32	725,70	591,70	456,74	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	784,18	652,63	527,42	-	-
	10>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 5: Potencia capaz de extraer con una máquina eléctrica para cada tipo de ola en KW

En verde claro se muestra la potencia de diseño, por lo que el resultado será muy preciso. Precisión que disminuye en el verde oscuro, ya que el buque no se adaptará al máximo a la ola. En el amarillo aun disminuye más esa precisión, aunque no tanto como en las de color naranja. Las olas de color rojo no se tomarán, debido a que la velocidad que alcanza el imán permanente es muy elevada, por lo que se dispondrá de un mecanismo que impida deslizarse al imán. Por último, en el gris se representan olas que por las características del buque no se pueden aprovechar.

Para comprobar si se trata de un sistema del que se pueda sacar provecho, otra de las cosas más importantes es observar el tiempo en el cual se pueda utilizar el dispositivo. Para ello se han eliminado de la tabla 3 las olas en las que la máquina eléctrica no vaya a extraer potencia, bien por tamaño o por velocidad final del imán permanente demasiado elevada. Eso da como resultado la tabla 6:

	Periodo pico de ola (s)												TOTAL
	<1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	15>		
Altura significativa de la ola (m)	<=1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	2	-	-	-	-	5,07	-	-	-	-	-	-	5,07
	3	-	-	-	-	2,626	6,756	-	-	-	-	-	9,3815
	4	-	-	-	-	0,448	2,958	6,123	-	-	-	-	9,529
	5	-	-	-	-	0,033	0,747	3,267	3,691	-	-	-	7,738
	6	-	-	-	-	0,008	0,063	1,14	2,229	1,883	-	-	5,322
	7	-	-	-	-	-	0,004	0,211	1,089	1,145	-	-	2,4485
	8	-	-	-	-	-	-	0,014	0,318	-	-	-	0,332
	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	10>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	TOTAL	0	0	0	0	8,185	10,53	10,75	7,327	3,028	0	0	39,82

Tabla 6: Tiempo que la máquina eléctrica extraerá energía

Se puede apreciar que, en los últimos 60 años, de 1958 a 2018, la máquina eléctrica habría extraído energía de las olas en un 39,82% del tiempo. Por lo que se puede concluir que este dispositivo en comparación con otros de energía undimotriz es capaz de extraer energía en un alto porcentaje del tiempo.

4.2. Características de la máquina eléctrica

Como se ha mencionado anteriormente, una parte de los cálculos, los de mayor importancia, se ha desarrollado en el LabVIEW, dando los siguientes resultados:

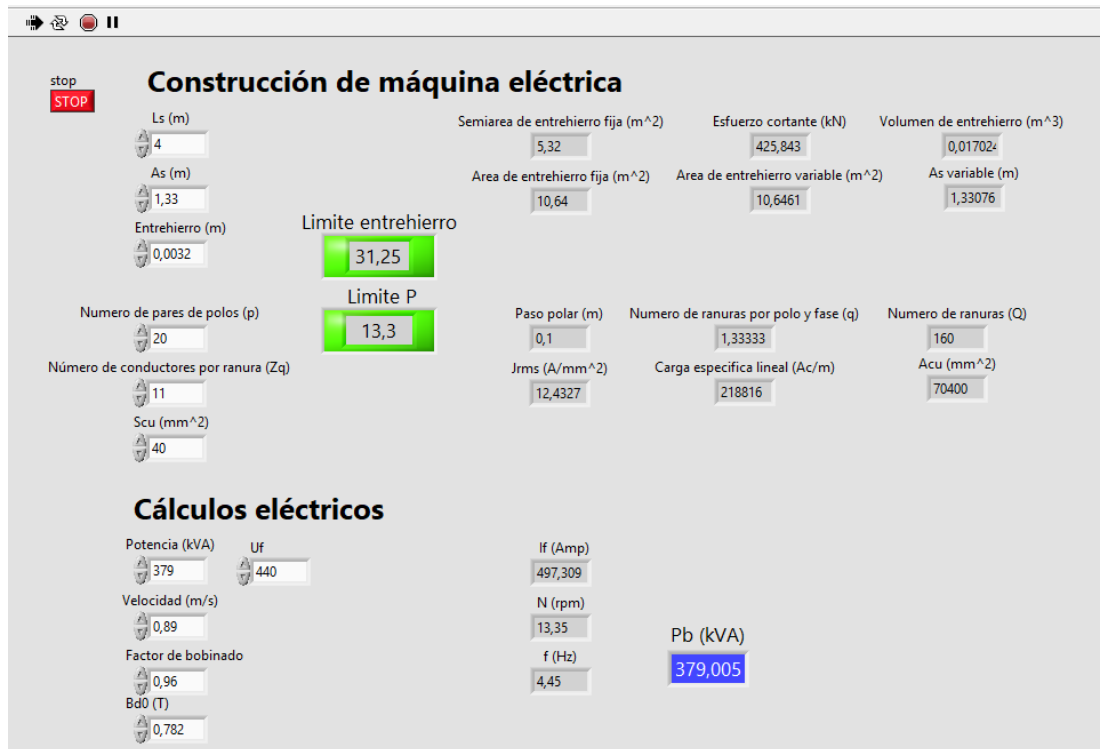


Figura 54: Panel frontal de LabVIEW donde se muestran resultados de los cálculos desarrollados en el diagrama de bloques

Además de los resultados en LabVIEW, el resto de resultados obtenidos de todas las fórmulas se fueron colocando en la siguiente tabla Excel:

Cálculo de elementos que componen un generador lineal			
Nombre	Abreviatura	Valor	Unidades
Longitud de estator	Ls	4	m
Anchura de estator	As	1,33	m
Nº de pares de polos	p	20	
Altura de la ranura	hs	0,044043035	m
Campo magnético vacío entrehierro	Bg0	0,77	T
Campo magnético vacío diente	Bd0	1,64	T
Densidad de corriente	Jrms	3,5	A/mm ²
Nº de fases	m	3	
Nº de ranuras por polo y fase	q	1,333333333	
Factor de apilado de chapas magnéticas	Kfs	0,97	
Espesor aislamiento	hi	0,001	m
Campo magnético en el yugo del rotor	Byt	1,2	T
Campo magnético en el yugo del estator	Bys	1,2	T
Altura del diente	hs1	0,002	m
Altura de la cuña de ranura	hs2	0,004	m
Sección de ranura	Ar	0,00044	m ²
Paso polar	rp	0,1	m
Paso de ranura	rs	0,025	m
Anchura de ranura	bs	0,012845	m
Altura del devanado	hs3	0,038043	m
Altura del cobre en ranura	hcu	0,036043	m
Ancho del cobre en ranura	bcu	0,010845	m
Ancho del imán	bm	0,07	m
Longitud media de la cabeza de bobina	lcb	0,2	m
Longitud media de las espiras	lesp	3,06	m
Anchura útil núcleos de hierro estator y trasladador	Au	1,2901	m
Anchura equivalente núcleos de hierro estator y trasladador	Ae	1,336	m
Entrehierro mecánico	g	0,003	m

Nombre	Abreviatura	Valor	Unidades
Altura yugo estator	hys	0,02325737	m
Altura yugo trasladador	hyt	0,02325737	m
Ancho de diente	bd	0,01215542	m
Primer armónico del campo magnético del entrehierro	Bg(1)	0,77	T
Nº de ranuras por fase	Qf	53,33333333	
Factor de devanado	Zw(1)	0,822793449	
Factor de distribución	Zd(1)	0,841475215	
Factor de paso	Zp(1)	0,977798792	
Nº de conductores por ranura	ZQ	11	
Carga específica lineal	qe	61600	Ac/m
Nº total de ranuras	Q	160	
Nº total de conductores	Z	1760	
Nº de conductores por fase	Zf	586,6666667	
Nº de espiras por fase	Nf	293,3333333	
Nº total de bobinas (una capa)	B	80	
Nº bobinas por fase	Bf	26,66666667	
Nº de espiras por bobina	Nb	11	
Sección de hilo o pletina	Acu	40	mm ²
Resistencia por fase del inducido	Rf	0,386896552	Ω
Resistividad del cobre	pcu	0,017241379	(Ω·mm ²)/m
Intensidad por conductor	Ic	140	Amp

Tabla 7: Resultados de parámetros de la máquina eléctrica

4.3. Diseño, estabilidad y simulación del buque

Para el diseño del buque, en el que se empleó el MAXSURF Modeler, tras hacerle todas las modificaciones al buque y dejarlo en las dimensiones en las que se quería quedó un buque con una eslora de 33 metros, una manga de 10 metros y un calado de 4 metros. También, se consiguió que el coeficiente de bloque fuera bastante elevado, de 0,952 para tratar que el buque se monte encima de la ola. El diseño del buque como algunos de los datos del mismo se pueden observar en la siguiente figura.

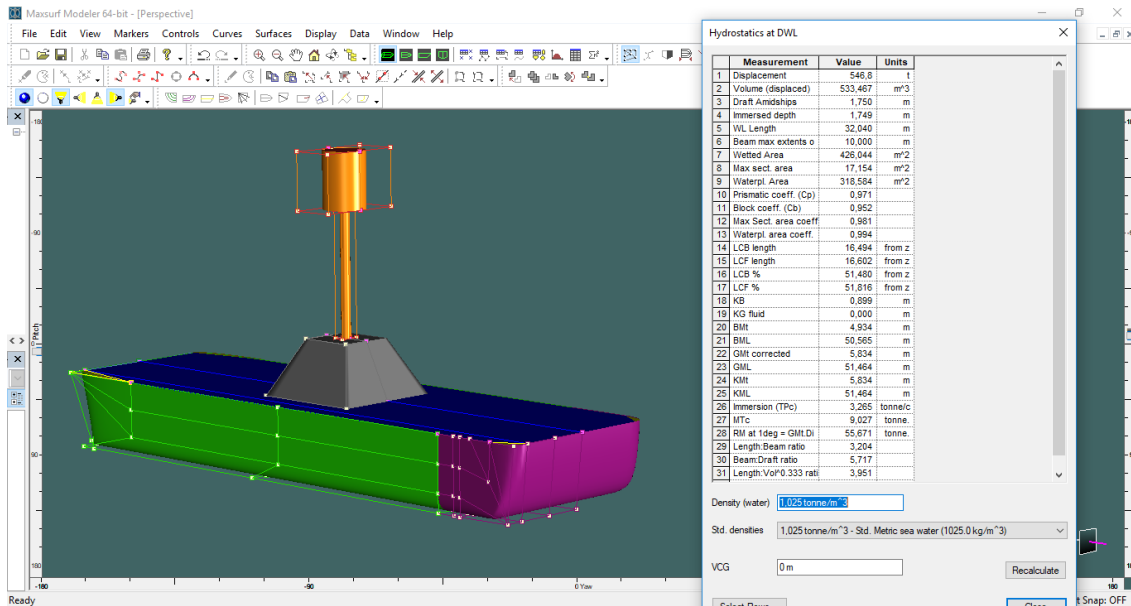


Figura 55: Diseño del buque en el MAXSURF Modeler y algunas de sus características

Hay que comentar que el peso de las baterías, la máquina eléctrica y el aerogenerador aún no se han añadido, por lo que el desplazamiento que se observa en la figura 43, es el desplazamiento en rosca del buque.

En el cálculo de estabilidad del buque desarrollado en el MAXSURF Stability, el resultado obtenido tras sumar los pesos de aerogenerador, baterías y máquina eléctrica es el siguiente:

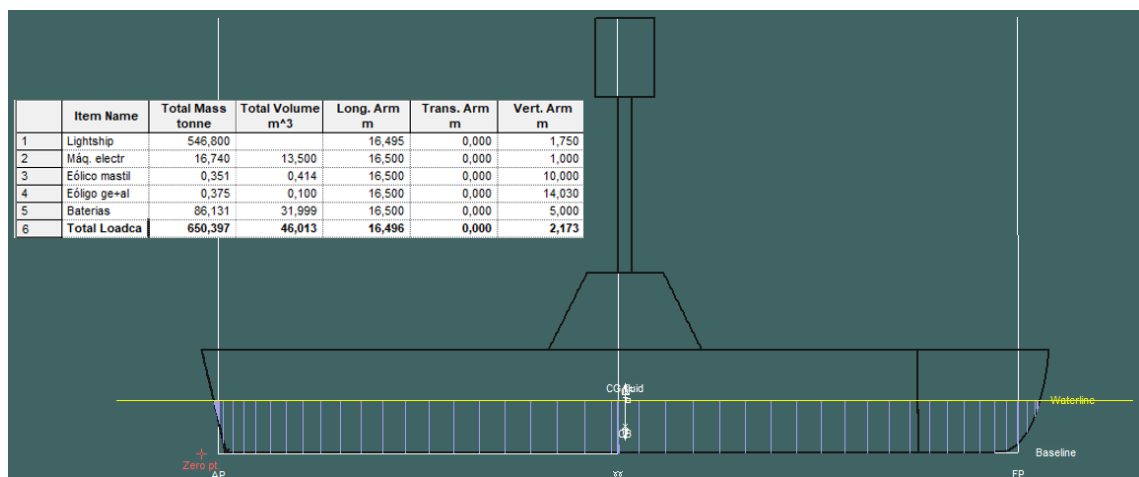


Figura 56: Resultados del cálculo de equilibrio del buque. Nueva línea de flotación y centro de gravedad

A continuación, se calculan las hidrostáticas del buque:

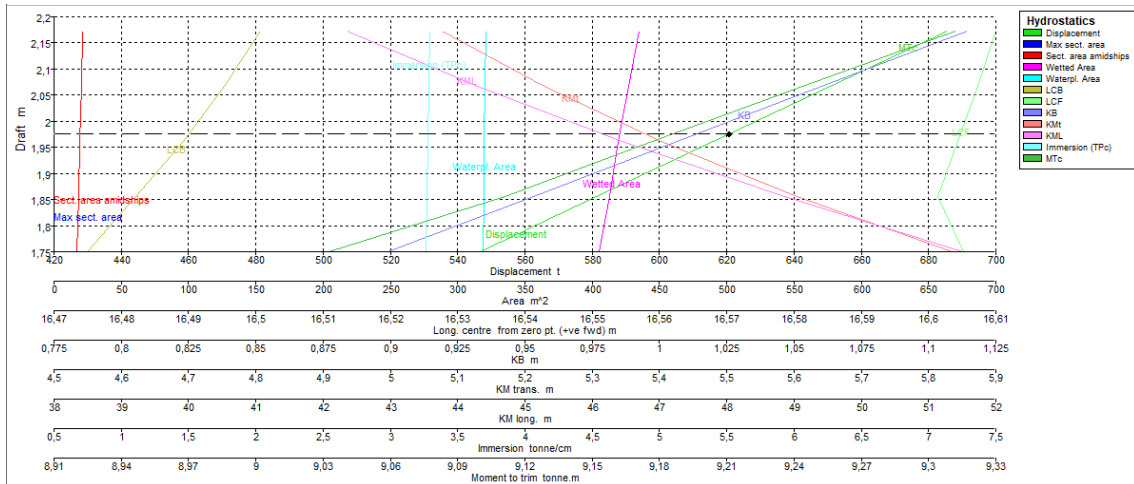


Figura 57: Curvas hidrostáticas del buque

Después de obtener estos datos se calculará el KN para diferentes desplazamientos del buque y diferentes escoras del mismo:

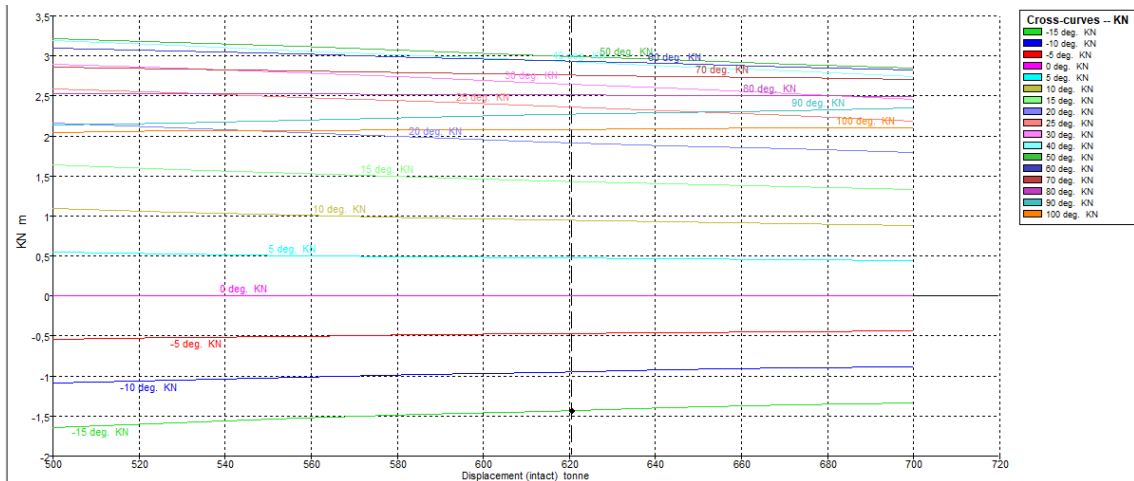


Figura 58: Curvas KN a diferentes ángulos para diferentes desplazamientos del buque

También se calculará el GZ del buque, que alcanza su valor máximo de 1,496 metros a una escora a estribor de 32, 2°.

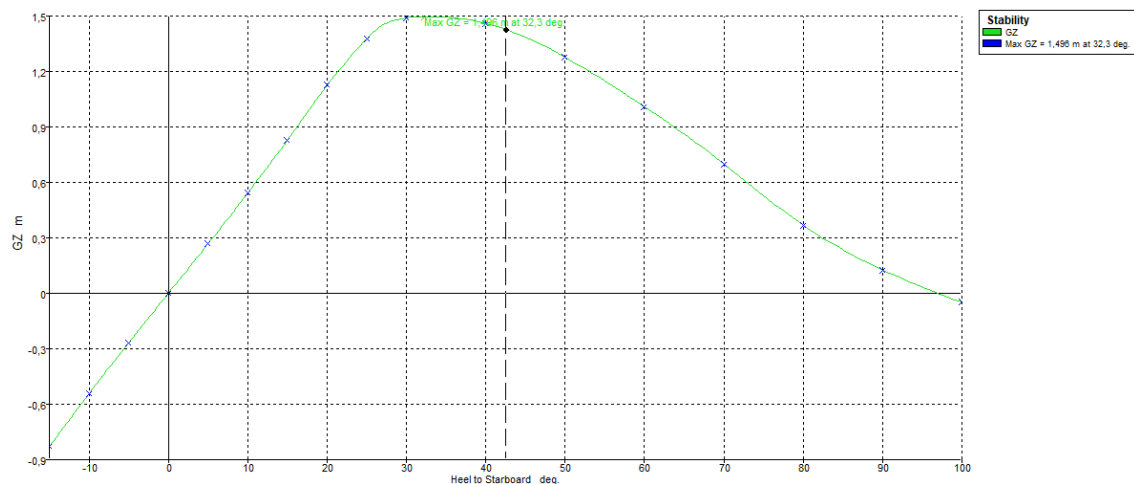


Figura 59: Curva GZ del buque

En último lugar, se comprueba que el buque cumpla con los criterios de la norma UNE ISO 12217-1 y la IMO A.749(18) Capítulo 3. Tras introducir los criterios, el buque de diseño cumple con todos los requisitos de estabilidad.

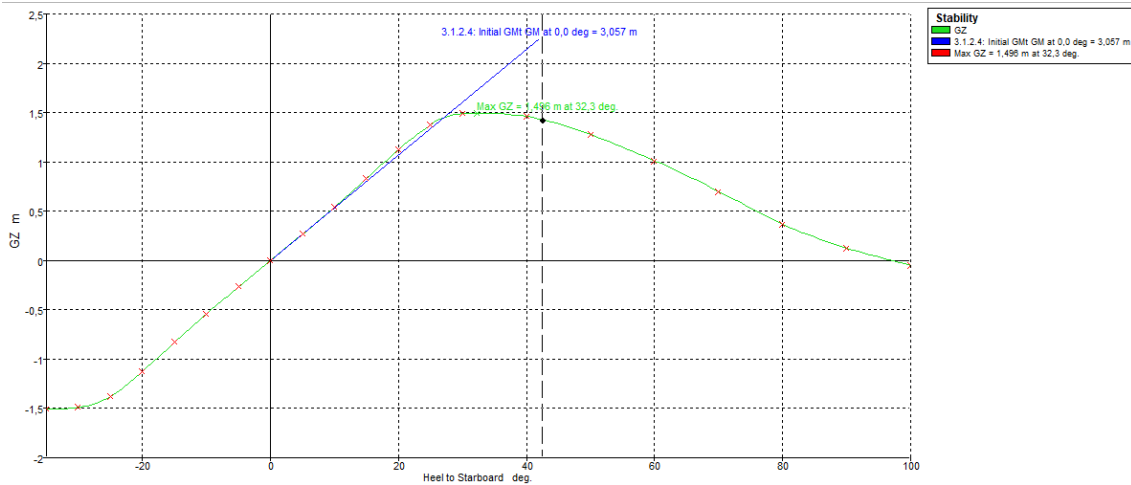


Figura 60: Criterio de diseño A.749(18) 3.1.2.4: GMt inicial, que debe ser al menos de 0,15 metros y en este caso es de 3,057 metros

Por último, en el MAXSURF Motions, tras introducir los datos de oleaje que se deseaban, los ángulos de ataque y la velocidad del buque, que en este caso es de 0 nudos, ya que está fondeado. El programa muestra un gráfico en el que aparece la curva de balance del buque (Roll RAO), la arfada del buque (Heave RAO), cabeceo del buque (Pitch RAO) y la resistencia añadida (Added resistance).

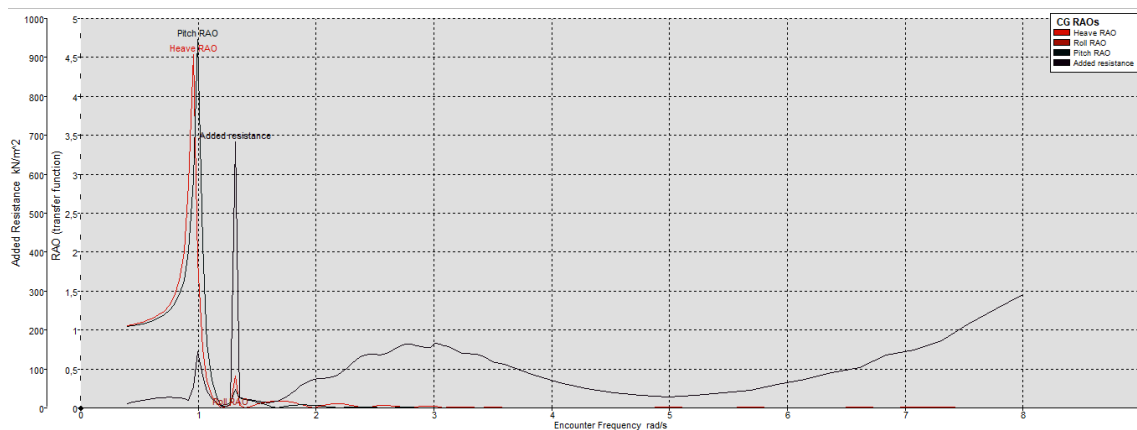


Figura 61: Gráfico de frecuencia de encuentro de las olas y efecto en la respuesta de oscilación del buque y el aumento de su resistencia

Como se aprecia en el gráfico, cuanto menor es la frecuencia de la ola más afecta a estos parámetros, siendo el valor máximo cuando la frecuencia de

encuentro es de 1 rad/s, excepto la de resistencia añadida que es en torno a 1,4 rad/s.

Por último, la simulación del buque permite observar el efecto del mar en el buque de manera muy intuitiva:

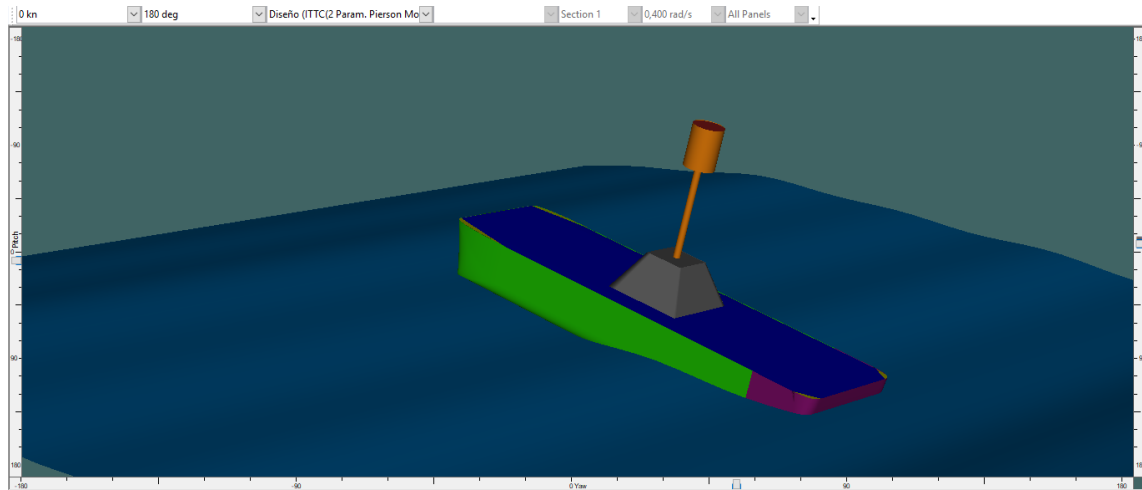


Figura 62: Simulación del buque con olas de diseño del mismo

En la simulación se aprecia que con olas irregulares es capaz de generar la suficiente pendiente como para que el imán permanente pueda deslizarse entre el estator y generar la energía eléctrica. Además, se puede ver que se monta sobre las olas.

5. Discusión de los resultados

Tras obtener los diferentes resultados se pueden sacar en claro algunas ideas sobre este nuevo método de extracción de energía undimotriz. Esas ideas se pueden mostrar como ventajas y desventajas:

5.1. Ventajas

Entre los principales puntos positivos, destaca que la energía que se puede extraer por máquina eléctrica es bastante elevada, 379 kW, teniendo en cuenta que otros dispositivos de extracción de esta energía no llegan al kilovatio. Además, el buque tiene capacidad para albergar más máquinas eléctricas de este tipo en su interior, sin restar energía al resto, por lo que la energía que pueden extraer diversas máquinas eléctricas será lo obtenido en los resultados multiplicado por el número de máquinas eléctricas que haya en el buque.

Este buque es uno de los pocos dispositivos capaces de extraer energía de olas grandes que solo existen offshore, ya que la mayoría de dispositivos que extraen esta energía son nearshore u onshore. Esto hace que este sistema sea capaz de extraer energía de olas que aún conservan la totalidad de la misma antes de perderla al acercarse a la costa.

Mediante este sistema se puede almacenar energía en su interior. Además, al estar sobre la cubierta permite al buque albergar mayor número de máquinas eléctricas si se deseara. Esto se puede hacer ampliando el tronco pirámide en cuyo interior se encuentran las baterías.

A eso hay que sumarle, que al igual que muchos otros dispositivos de extracción de energía undimotriz, permite colocar varios dispositivos juntos. Siempre manteniendo una distancia de seguridad para que no haya colisiones entre ellos, formando granjas eléctricas.

Esa energía almacenada podría destinarse a buques que pasaran por la zona, dando suministro tanto a sus componentes como a la propulsión si se trata de un buque eléctrico. Esa energía eléctrica, es solamente la energía extraída de las olas, ya que, mediante el aerogenerador, se consigue la energía suficiente como para mantener los equipos del buque que requieran electricidad encendidos.

5.2. Desventajas

El mantenimiento es uno de las desventajas más grandes que tiene este sistema. Ya que a pesar de que las baterías y la máquina eléctrica son aparatos que necesitan muy poco mantenimiento, el resto si pueden tener cualquier avería. Por ejemplo, el aerogenerador puede sufrir algún golpe de ola que destroce alguno de sus componentes; las luces de posición podrían necesitar algún cambio; el fondeo hay que revisarlo cada poco tiempo, ya que es uno de los puntos con mayor criticidad del dispositivo; y la transmisión de datos puede sufrir alguna avería y dejar de mandar información adecuada, por lo que hay que revisarlos periódicamente.

Como otro de los puntos negativos se encuentra el desplazamiento del buque hasta su localización final, ya que el buque carece de máquina que propulse el buque y de puente. A esto hay que sumarle que el buque deberá ir a dique seco cada 5 años para pasar las inspecciones que sean necesarias.

Por último, hay que mencionar que el coste de la fabricación del buque, la máquina eléctrica, las baterías y el aerogenerador es muy elevado.

5.3. Discusión

La desventaja del mantenimiento no hay forma de solucionarla, aunque el estar relativamente cerca de tierra favorezca este aspecto. Aun así, comparando todas las ventajas y desventajas mencionadas, puede decirse que es un método de extracción muy beneficioso, debido a que es capaz de extraer y almacenar mucha cantidad de energía por cada máquina eléctrica que se le instale a bordo. Esa energía extraída, al ser tan elevada, llega a amortizar los costes de fabricación del buque y sus componentes.

El poder entregar energía eléctrica a los buques incluso estando ultramar es un sistema muy adecuado para dar paso a los buques eléctricos. Además, si hay exceso de energía generada con la que se puede almacenar siempre se puede mandar energía a tierra mediante un cable que vaya por el fondo marino.

6. Conclusiones

Finalmente, tras todos estos datos, se puede concluir que el dispositivo ideado cumple con todos los objetivos planteados inicialmente.

Se localizó una zona de explotación al oeste de Irlanda en la que las condiciones del oleaje son más que aceptables. Además, se dispone de la velocidad del viento necesaria como para hacer que el aerogenerador esté la mayoría del tiempo en funcionamiento y pueda alimentar los dispositivos del buque.

También se implementó un prototipo que se adaptara al oleaje de la zona y que pudiera contener: Un generador eléctrico capaz de extraer grandes cantidades de potencia (mayores a 375kW) durante alrededor de un 40% del tiempo al año; un banco de baterías lo suficientemente grande como para dar alimentación a un cuarto de toda la potencia necesaria para un arrastrero que requiere potencia 6MW durante dos horas y un aerogenerador.

Además, se llevó a cabo la simulación de ese prototipo en la que se observó que el buque es capaz de montarse sobre las olas, manteniendo una buena estabilidad y que incluso en oleaje irregular pueden alcanzarse las pendientes necesarias como para que la máquina eléctrica genere electricidad.

Con lo recién comentado sumado a que el prototipo se ajusta a las demandas de mercado actual, así como a las demandas sociales de fuentes de energía respetuosas con el medio, se puede concluir que este primer prototipo experimental es válido.

Por último, cabe destacar, que al ser el prototipo experimental válido, habría que continuar con el proyecto en un tanque de olas con un modelo a escala para comprobar que realmente el dispositivo aguanta diferentes tipos de oleaje de manera adecuada.

7. Bibliografía

7.1. Texto

1. **La energía, historia de sus fuentes y transformación.** Cunningham, Roberto E. 2003, Petrotecnia, págs. 52-60.
2. **Energía y ambiente: Pasado, presente y futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas.** Posso, Fausto. s.l. : Geoenseñanza, 2002, Vol. VII.
3. **Calero Pérez, Roque. Centrales de energías renovables.** s.l. : Pearson Educación, 2009. 8483226006, 9788483226001.
4. **Hernández Agriarte, Javier. Diseño de un aerogenerador de baja potencia.** [En línea] 2005-2006. [Citado el: 12 de Junio de 2019.] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2763/40843-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
5. **De Battista, Hernán. CONTROL DE LA CALIDAD DE POTENCIA EN SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.** [En línea] Septiembre de 2000. [Citado el: 12 de Junio de 2019.] http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1355/Documento_completo.pdf?sequence=29.
6. **Cobreiro Rodríguez, Pablo y Jiménez Simón, Nuria. Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales.** [En línea] 2014. [Citado el: 12 de Junio de 2019.] <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10170-aerogeneradores-i-funcionamiento-y-marco-normativo-de-prevencirn-de-riesgos-laborales.pdf>. 1022.
7. **Hulshorst, Walter y Criado, Víctor. Manual Práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala.** Madrid : Leonardo ENERGY.
8. **Moragues, Jaime y Rapallini, Alfredo. Energía Eólica.** [En línea] 2003. [Citado el: 12 de Junio de 2019.]
9. **Tafur García, Andrés Mauricio y Pizza Espitia, Augusto David. MODELACIÓN Y EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO COMO UNA FUENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA ZONA COSTERA DE CARTAGENA.** [En línea] 2013. [Citado el: 12 de Junio de 2019.] <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/58>.
10. **IBERDROLA. ¿Sabes cómo funcionan los parques eólicos marinos?** [En línea] [Citado el: 12 de Junio de 2019.] <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/como-funciona-la-energia-eolica-marina>.
11. **VORTEX Bladeless. ¿Cómo funciona Vortex?** [En línea] [Citado el: 12 de Junio de 2019.] <https://vortexbladeless.com/es/desarrollo-tecnologia/>.
12. **Energía mareomotriz: perspectiva histórica y estado actual.** Montero Sousa, Juan Aurelio y Calvo Rolle, José Luis. 301, s.l. : Técnica Industrial, 2013.
13. **La energía renovable procedente de las olas.** Amundarin Ormaza, Modesto. 8, s.l. : Ikastorratza, 2012/02/25. 1988-5911.
14. **Modelado Energético de Convertidores Primarios para el Aprovechamiento de las Energías Renovables Marinas.** López, Amable, Somolinos, José Andrés y Nuñez, Luis Ramón. 2, Madrid : Elsevier España S.L., 2014, Vol. 11. 1697-7912.

15. Cendán Carracedo, Noelia. *Estudio de la viabilidad de un parque con energía undimotriz en Galicia comparando diversos convertidores de olas*. A Coruña : s.n., 2017.
16. Gianola Otamendi, Alberto. *Energía producida o extraída del mar*. Buenos Aires : s.n., 2016.
17. González Fernández, Alberto. *Prespectiva y desarrollo de las centrales hidroeléctricas en el 2020*. León : s.n., 2015.
18. Torres Martínez, Joan Marc. *Estudio de las centrales de aprovechamiento de la energía mareomotriz*. Vilanova i la Geltrú : s.n., 2012.
19. *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz*. Pelissero, Mario, y otros. 2, Buenos Aires : Proyecciones, 2011, Vol. 9.
20. Vila, Jesus, y otros. *Recopilación sobre las diferentes fuentes de energía*. Quito : EDICUMBRE. 9978-40-426-0.
21. García Saiz, Carlos. *DISEÑO, DIMENSIONADO Y SIMULACIÓN DE UN GENERADOR LINEAL PARA EL DESARROLLO DE UNA BOYA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ*. Santander : Universidad de Cantabria, 2015.
22. Ruiz Mingúela, José Pablo, y otros. *INSTALLATION AND METHOD FOR HARNESSING WAVE ENERGY USING GYROSCOPE*. WO 2008/040822 Internacional, 3 de Octubre de 2006.
23. Salcedo, F., y otros. OCEANTEC: Sea Trials of a Quarter Scale Prototype. [En línea] 2009. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/OCEANTEC_Sea_Trials_of_a_Quarter_Scale_Prototype_.pdf.
24. Vargas-Machuca Saldarriaga, Federico. *MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS*. Lima, Perú : Megaprint Ediciones, 1990.
25. Enriquez Harper, Gilberto. *EL LIBRO PRÁCTICO DE LOS GENERADORES, TRANSFORMADORES Y MOTORES ELÉCTRICOS*. Mexico : LIMUSA, 2000. 9789681860530.
26. Bueche, Frederick J. y Hetch, Eugene. *Física general*. Mexico : McGraw Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 2007. 978-970-10-6161-9.
27. Cortes Cherta, Manuel. *MAQUINAS SINCRONAS Y MOTORES C.A. DE COLECTOR (T.4)*. s.l. : TECNICOS ASOCIADOS SA , 1993. 9788471460899 .
28. Hörnemann, Ernst, y otros. *ELECTROTECNIA DE POTENCIA. CURSO SUPERIOR*. s.l. : REVERTE, 1984. 9788429134551.
29. Engineering, Royal Academy of. *FUTURE SHIP POWERING OPTIONS Exploring alternative methods of ship propulsion*. Londres : Royal Academy of Engineering, Julio, 2013. 978-1-909327-01-6.
30. Lois, Alejandro E. y Trentádue, Carlos H. *APLICACIONES DE SUPERCAPACITORES EN LOS SISTEMAS FERROVIARIOS* . [En línea] 10-12 de Octubre de 2018. [Citado el: 12 de Junio de 2019.] <https://caim2018.com.ar/gestor/wp-content/uploads/2018/10/220.pdf>. 978-987-46978-0-4.

31. **Almacenamiento de energía usando ultracondensadores en sistemas fotovoltaicos autónomos.** Angulo, Aneider, Martínez, Fernando y López, German. 1, 2017 : Visión electrónica, Bogotá (Colombia), Vol. 11. 1909-9746.
32. Enrique, Claudio M. y Alzugarau, Gloria E. Modelo de Enseñanza-Aprendizaje para el Estudio de la Cinemática de un Volante Inercial usando Tecnologías de la Información y la Comunicación en un Laboratorio de Física. [En línea] 2013. [Citado el: 12 de Junio de 2019.] https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-50062013000100002&script=sci_arttext. 0718-5006.
33. Ripoll Masferrer, Lluís. ANÁLISIS Y DISEÑO DE VOLANTES DE INERCIA DE MATERIALES COMPUESTOS. [En línea] 2005. [Citado el: 12 de Junio de 2019.] <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6415/01LLrp01de01.pdf>.
34. elemental. [En línea] [Citado el: 2 de Mayo de 2019.] <https://elementalict.com/google-earth-la-tierra-desde-una-nueva-perspectiva/>.
35. Google. Google. [En línea] [Citado el: 2 de Mayo de 2019.] https://www.google.com/intl/es_ALL/earth/.
36. **El uso de Google Earth para el estudio de la morfología de las ciudades I, alcances y limitaciones.** Equipo urbano de la universidad de Barcelona. 100, Barcelona: Ar@cne, 2007. 1578-0007.
37. **Actividades didácticas con Google Earth.** Alfaro, Pedro, y otros. 15, s.l.: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2007, Vol. 2. 1132-9157.
38. Definición.de. [En línea] [Citado el: 3 de Mayo de 2019.] <https://definicion.de/?s=excel>.
39. ConceptoDefinicion.de. [En línea] [Citado el: 3 de Mayo de 2019.] <https://conceptoDefinicion.de/hoja-de-calculo/>.
40. Gutiérrez Carmona, Jairo. Modelos financieros con Excel: Herramientas para mejorar la toma de decisiones empresariales. *Modelos financieros con Excel: Herramientas para mejorar la toma de decisiones empresariales.* s.l.: ECOE EDICIONES, 2013.
41. **Microsoft Excel: Una herramienta para la investigación.** Pérez González, Luis Orlando. 3, Cienguegos, Cuba : MEDISUR, 2006, Vol. 4. 1721-897X.
42. Microsoft. Introducción a VBA en Office. [En línea] 2 de Enero de 2019. [Citado el: 3 de Mayo de 2019.] <https://docs.microsoft.com/es-es/office/vba/library-reference/concepts/getting-started-with-vba-in-office>.
43. Exceltotal. La utilidad e importancia de Excel. [En línea] [Citado el: 3 de Mayo de 2019.] <https://exceltotal.com/la-utilidad-e-importancia-de-excel/>.
44. National Instruments. ¿Qué es LabVIEW? [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <http://www.ni.com/es-es/shop/labview.html>.
45. Universidad de Cantabria. Software, Labview. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <https://sdei.unican.es/Paginas/servicios/software/Labview.aspx>.
46. Bentley. MAXSURF. [En línea] [Citado el: 5 de Mayo de 2019.] <https://www.bentley.com/es/products/product-line/offshore-structural-analysis-software/maxsurf>.

47. MAXSURF. MAXSURF: Integrated Naval Architecture Software for all Types of Vessels. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <https://www.maxsurf.net/index.html>.
48. 3DCADPORTAL. NURBS. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <http://www.3dcadportal.com/nurbs.html>.
49. MAXSURF. Modeller 3D hull modelling. [En línea] [Citado el: 4 de Mayo de 2019.] <https://www.maxsurf.net/modeller.html>.
50. —. MAXSURF Stability Intact and Damager Hidrostatics and Stability. [En línea] [Citado el: 5 de Mayo de 2019.] <https://www.maxsurf.net/stability.html>.
51. —. MAXSURF Motions/Motions Advanced Seakeeping Performance Prediction. [En línea] [Citado el: 5 de Mayo de 2019.] <https://www.maxsurf.net/motions.html>.
52. Gobierno de España. Puertos del Estado. [En línea] [Citado el: 15 de Octubre de 2018.] <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>.
53. MarineTraffic. MarineTraffic. [En línea] [Citado el: 20 de Octubre de 2018.] MarineTraffic.
54. WINDFINDER. WINDFINDER. [En línea] [Citado el: 29 de Octubre de 2018.] <https://www.windfinder.com>.
55. WINDGURU. WINGURU. [En línea] [Citado el: 29 de Octubre de 2018.] https://old.windguru.cz/es/historie_statsw.php.
56. Carlos Julian. Fricción, Estática y Dinámica. [En línea] [Citado el: 1 de Junio de 2019.] <https://www.fisimat.com.mx/friccion/>.
57. Corrales Martín, Juan. *CÁLCULO INDUSTRIAL DE MÁQUINAS ELECTRICAS TOMO II*. Barcelona, Mexico : MARCOMBO, 1982.
58. KLIUX energies. AEROGENERADOR DE EJE VERICAL KLIUX ZEBRA. [En línea] [Citado el: 5 de Noviembre de 2018.] <http://www.kliux.com/productos/aerogenerador-de-eje-vertical/>.
59. Leclanche Energy Storage Solutions. Leclanche Energy Storage Solutions. [En línea] [Citado el: 10 de Junio de 2019.] <https://www.leclanche.com/>.
60. Hand, Marcus. Leclanché to supply batteries for Kongsberg hybrid marine power solutions . [En línea] 12 de Noviembre de 2018. [Citado el: 10 de Junio de 2019.] <http://www.seatrade-maritime.com/news/asia/leclanche-to-supply-batteries-for-kongsberg-hybrid-marine-power-solutions.html>.
61. Leclanché Energy Storage Solutions. Energy M2 Modules (G-NMC). [En línea] [Citado el: 10 de Junio de 2019.] <https://www.leclanche.com/wp-content/uploads/2019/04/LECLANCHE-plaquette-G-NMC-KMWEB.pdf>.
62. —. Power M2 Modules (LTO). [En línea] [Citado el: 10 de Junio de 2019.] <https://www.leclanche.com/wp-content/uploads/2019/04/LECLANCHE-M2-LTO-moduleWEB.pdf>.
63. Olivella Puig, Joan. *Teoría del buque: Estabilidad, varada e inundación*. Barcelona : Universidad Politécnica de Catalunya, 1996.

64. UNE Normalización Española. UNE-EN ISO 12217-1:2017. [En línea] [Citado el: 9 de Junio de 2019.] <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0059399>.

65. *RESOLUTION A.749(18) adopted on 4 November 1993 CODE ON INTACT STABILITY FOR ALL TYPES OF SHIPS COVERED BY IMO INSTRUMENTS*. Organización Marítima Internacional. 1993.

7.2. Figuras

66. Wordpress. Wordpress. [En línea] 28 de Agosto de 2017. [Citado el: 03 de Junio de 2019.] <https://aguaenergiadecrecimiento.wordpress.com/2017/08/28/cosas-que-dicen-los-graficos-la-participacion-de-los-combustibles-fosiles-en-el-consumo-energetico-mundial/>.

67. Equipo de Redacción PartesDel.com. Partes del aerogenerador. [En línea] Revista educativa Partesdel.com, Agosto de 2017. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <https://www.partesdel.com/aerogenerador.html>.

68. Arquitectura y diseño. Energía eólica. [En línea] 3 de Abril de 2014. [Citado el: 10 de Junio de 2019.] <https://pedrojherandez.com/2014/04/03/energia-eolica-2/>.

69. ATHA GROUP. Electricity Generation without Rotating Blades – Future of Wind Turbines. [En línea] ATHA GROUP, 9 de Noviembre de 2017. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <https://www.amplcleantech.com/blog/electricity-generation-without-rotating-blades-future-wind-turbines/>.

70. Vercelli, Amilcar. Energías como bienes comunes. *Energías como bienes comunes*. [En línea] 3 de Octubre de 2012. [Citado el: 8 de Junio de 2019.] <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/03/que-es-la-energia-mareomotriz/>.

71. Decología.info. *Decología.info*. [En línea] [Citado el: 8 de Junio de 2019.] <https://decologia.info/fenomenos-naturales/corrientes-oceanicas/>.

72. Fundación Nuestromar. *Fundación Nuestromar*. [En línea] 15 de Marzo de 2018. [Citado el: 8 de Junio de 2019.] <http://www.nuestromar.org/66003-03-2018/m-s-cerca-obtener-energ-corrientes-marinas-gran-profundidad>.

73. Guardado Sánchez, Luis. Academia. *Academia*. [En línea] [Citado el: 1 de Junio de 2019.] https://www.academia.edu/31137839/EL_ENERGÉTICO_ENCANTO_DEL_MAR.

74. *Effects of Solidity Ratio on Performance of OWC Impulse Turbine*. Cui, Ying y Liu, Zhen. 1, Qingdao : Hindawi Publishing Corporation, 2014, Vol. 7.

75. *WAVE ENERGY SYSTEMS: AN OVERVIEW OF DIFFERENT WAVE ENERGY CONVERTERS AND RECOMMENDATION FOR FUTURE IMPROVEMENTS*. Chenari, Behrang, Saadatian, Seyedeh Shiva y Ferreira, Almerindo. Valencia : s.n., 2014.

76. *Estimation of Wave Energy from Wind Velocity*. Blackledge, Jonathan, y otros. 4, s.l. : Engineering Letters, 2013, Vol. 21. 158-170.

77. Flatley, Joseph L. engadget. *engadget*. [En línea] 3 de Septiembre de 2009. [Citado el: 8 de Junio de 2019.] <https://www.engadget.com/2009/03/09/oyster-wave-energy-converter-puts-climate-change-to-good->

use/?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmVzLw&guce_referrer_sig=AQAAAAOlmufJIE8y0gZMT_fNiyE63QF0ziz6C_Nr51JlpPqoRejAAB0RzP
OpV4w3sitEKULGP7ZJ8cw_-.

78. Wave Dragon. *Wave Dragon*. [En línea] [Citado el: 8 de Junio de 2019.] http://www.wavedragon.net/?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=5.

79. Hayward, Jennifer A. y Osman, Peter. CSIRO. *CSIRO*. [En línea] Marzo de 2011. [Citado el: 8 de Junio de 2019.] https://www.researchgate.net/publication/265179985_The_potential_of_wave_energy.

80. EMEC The European Marine Energy Centre LTD. EMEC. *EMEC*. [En línea] 25 de Febrero de 2016. [Citado el: 8 de Junio de 2019.] <http://www.emec.org.uk/press-release-emec-seeks-feedback-from-industry-for-p2-002/>.

81. goconqr. *goconqr*. [En línea] [Citado el: 8 de Junio de 2019.] https://www.goconqr.com/en/p/8861348-energ-a-de-las-olas-flash_card_decks?dont_count=true&frame=true&fs=true.

82. pinterest. *pinterest*. [En línea] [Citado el: 8 de Junio de 2019.] <https://www.pinterest.ca/pin/365213851031252647/>.

83. openei. *openei*. [En línea] 2 de Abril de 2015. [Citado el: 8 de Junio de 2019.] https://openei.org/wiki/Wave_Energy.

84. *Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters*. Blad, Juan, y otros. 17, s.l. : Revista de Investigación Marina, 2010.

85. Teixeira, Luis. [En línea] 9 de Octubre de 2014. [Citado el: 8 de Junio de 2019.] https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/05_-_texeira_-_utilizacion_de_la_energia_de_las_olas_en_uruguay.pdf.

86. Martín Blas, Teresa y Serrano Fernández, Ana. Magnetismo. [En línea] Universidad Politécnica de Madrid. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfísica/magnet/generador.html>.

87. Hernandez Altamirano, Oscar Erasto, y otros. Ingeniería Eléctrica: Maquinas Sincronas y C.D. [En línea] Instituto Tecnológico de Puebla. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <http://iemaquinassinchronasycd.blogspot.com/>.

88. Tipos de motores. [En línea] 1 de Mayo de 2013. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <http://hernandezgt9413.blogspot.com/2013/05/>.

89. Raya, Adrian. Las baterías de litio-aire, que almacenan 5 veces más energía, reciben un gran avance. [En línea] El Español, 23 de Marzo de 2018. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <https://omicrono.elespanol.com/2018/03/baterias-de-litio-aire/>.

90. Dualshop. Banco de supercapacitor 33,33F/15,8V (6x 200F/2,7V em série). [En línea] Dualshop. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <https://www.dualshop.com.br/banco-de-supercapacitor-3333f158v-6x-200f27v-em-serie>.

91. DiegoGV. Almacenamiento de energía mediante volante de inercia. [En línea] NOSOLOINGENIERIA, 8 de Abril de 2013. [Citado el: 13 de Junio de 2019.] <http://nosoloingenieria.com/almacenamiento-energia-volante-de-inercia/>.

92. **A GLOBAL WAVE ENERGY RESOURCE ASSESSMENT.** Cornett, Andrew M. Ottawa, Ontario, Canada : s.n., Julio de 2008.

93. **Maynooth University. The first Quaternary map of an Irish offshore region: the Porcupine Bank, West of Ireland.** [En línea] 17 de Noviembre de 2016. [Citado el: 9 de Junio de 2019.] <https://www.maynoothuniversity.ie/news-events/first-quaternary-map-irish-offshore-region-porcupine-bank-west-ireland> .

94. **masmar. Características de las olas. Longitud de onda, altura, amplitud, dirección.** [En línea] 18 de Noviembre de 2013. [Citado el: 1 de Junio de 2019.] <http://www.masmar.net/esl/Apuntes-Náuticos/Oceanografía/Características-de-las-olas.-Longitud-de-onda,-altura,-amplitud,-dirección>.

95. **Universo Fórmulas. Triángulo rectángulo.** [En línea] [Citado el: 1 de Junio de 2019.] <https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/triangulo-rectangulo/>.

96. **alonsoformula.com. Dinámica.** [En línea] [Citado el: 1 de Junio de 2019.] <https://www.alonsoformula.com/FQBACH/dinamica.htm>.

97. **WINDGURU. Winduru.** [En línea] [Citado el: 10 de Junio de 2019.] https://old.windguru.cz/es/historie_statsw.php?ntype=n&odmes=1&odrok=2017&domes=12&dorok=2017&statype=2&getspot=&id_georegion=150&id_zeme=372&id_region=0&mis_spot=350976&search=&id_typspot%5B1%5D=1&id_typspot%5B2%5D=2&id_typspot%5B6%5D=6&id_typspot%5B4%5.