



TRABAJO FIN DE GRADO

Curso 2013-2014



Aprovechamiento Energías Renovables Offshore: Eólica y Undimotriz

Tutor: Antonio González Marrero

Alumnos: Javier Schwartz Maqueda/Carmen Laura Hernández López

Grado: Ingeniería Náutica y Transporte Marítimo

Índice

	Pág.
Introducción	01
Capítulo 1. Antecedentes Energías Renovables offshore	04
1.1 El Recurso Eólico y su aprovechamiento	13
1.1.1 El Recurso Eólico	14
1.1.2 Aprovechamiento. Aerogeneradores	15
1.2 Los Parques Eólicos	19
1.2.1 Desarrollo de un Parque Eólico	20
1.2.2 Parques Eólicos Offshore	20
1.2.3 Ventajas y desventajas de la energía eólica marina	23
1.3 El recurso de las olas	25
1.3.1 Aprovechamiento	25
1.4 Los Parques Undimotriz	27
1.4.1 Ventajas y desventajas de la Undimotriz	28
Capítulo 2. Objetivos	29
Capítulo 3. Desarrollo del estudio	30
3.1 Eólica	30
3.1.1 Regímenes de viento	35
3.1.2 Variación del viento con la altura	36
3.1.3 Energía que contiene el viento	37
3.1.4 Aprovechamiento mediante aerogeneradores	38
3.1.5 Curva de Potencia	40
3.1.6 Datos obtenidos	40
3.1.6.1 Arico, Santa Cruz de Tenerife	41

3.1.6.2	Morrojable, Fuerteventura	47
3.1.7	Aerogenerador	52
3.1.8	Cálculos	54
3.2	Undimotriz	57
3.2.1	Medición y energía de una ola	57
3.2.2	Aprovechamiento mediante convertidores	58
3.2.3	Datos obtenidos	62
3.3	Estimaciones	63
	Conclusiones	65
	Bibliografía	66

Índice de Ilustraciones

Imágenes

	Pág.
1.1 Mapa eólico Islas Canarias	08
1.2 Ejemplo embarcaciones necesarias	09
1.3 Estructura góndola de un aerogenerador	16
1.4 Potencia generada según diámetro del rotor	17
1.5 Esquema funcionamiento de un Parque Eólico	19
1.6 Ubicación de los 91 aerogeneradores del parque Horns Rev	21
1.7 Parque eólico offshore London Array	22
1.8 Proceso de creación de la ola	25
1.9 Equipo Oyster. Aquamarine Power	27
3.1 Toma de datos en Arico (elaboración propia)	33
3.2 Pantalla multifunción-Anemómetro (elaboración propia)	33
3.3 Tubo de corriente	38
3.4 Visita guiada al ITER	45
3.5 Visita guiada al ITER	46
3.6 Sistema Pelamis	58
3.7 Sistema Robusto	60

Tablas

	Pág.
1.1 Diferencia costes offshore-onshore	06
3.1 Descripción fórmula de estimación de velocidad según altura	35
3.2 Estimación del valor n para distintos terrenos	35
3.3 Descripción fórmula de la potencia que contiene el viento	37
3.4 Datos del viento en Arico en Febrero 2014	41
3.5 Datos del viento en Arico en Marzo 2014	42
3.6 Velocidad y dirección del viento según datos del ITER	44
3.7 Medias de viento de febrero y marzo extrapoladas de 10 a 80 metros	44
3.8 Medias de viento del 2013 extrapoladas de 10 a 80 metros	44
3.9 Datos del viento en Morrojable en Febrero 2014	47
3.10 Datos del viento en Morrojable en Marzo 2014	48
3.11 Datos del viento 2014	49
3.12 Datos del viento 2013	50
3.13 Medias de viento de febrero y marzo extrapoladas de 10 a 80 metros	50
3.14 Medias de viento del 2013 extrapoladas de 10 a 80 metros	50
3.15 Características Gamesa G-128 5.0 MW Off-Shores	52
3.16 Resumen medias del viento (m/s)	54
3.17 Cálculos de potencia suministrada	55
3.18 Tabla de potencia Pelamis	59
3.19 Tabla de potencia Robusto	61
3.20 Datos de olas según altura y periodo	62
3.21 Energía eléctrica disponible por islas	63

Gráficos

	Pág.
3.1 Rosa de los vientos	34
3.2 Media estadística del viento en Arico	43
3.3 Media estadística del viento en Morrojable	49
3.4 Rosa los vientos febrero y marzo 2014, y 2013 en su conjunto	51
3.5 Curva de potencia Gamesa G-128 5.0 MW Off-shore	53

Fórmulas

	Pág.
3.1 Estimar velocidad según altura	35
3.2 Potencia que contiene el viento	37
3.3 Potencia que contiene el viento según coeficiente de potencia	38
3.4 Potencia que contiene el viento según coeficiente de potencia y rendimiento del aerogenerador	39
3.5 Potencia de ola por metro al cuadrado	57

Introducción

Las energías renovables son fuentes de energía que se obtienen de medios naturales en teoría inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Entre ellas están la Biomasa, Hidroeléctrica, Eólica, Solar, Geotérmica, y mareomotriz. Constituyendo una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica.

En la actualidad el crecimiento exponencial de la población mundial ha provocado que empiecen a escasear los recursos fósiles de los que se abastecen las energías no renovables o como en la actualidad las conocemos, las energías tradicionales, y que la contaminación masiva producida por éstas estén provocando cambios medioambientales, deterioro de la capa de ozono, destrucción de ecosistemas, y el conocido efecto invernadero causante del calentamiento del planeta.

En las Islas Canarias la energía eólica es absolutamente relevante, ya que, además de tener un bajo coste de generación de electricidad, tienen numerosas partes del territorio con un potencial de viento en frecuencia y velocidad excelentes.

Sin embargo cuando se habla de este tipo de energía, se suele obviar la posibilidad de que un campo eólico se pueda situar en alta mar, y curiosamente sería en estas ubicaciones donde nos encontraríamos con una mayor captación de energía por parte de los aerogeneradores.

La energía eólica terrestre es una tecnología madura, que únicamente tiene una curva de aprendizaje favorable en cuanto a tamaños de turbina, cierta mejora en rendimientos y especialmente una reducción de costes por KW instalado.

Caracterizándose por ser un tipo de energía que cuenta con excelentes y bien documentados estudios detallados en cuanto a la localización territorial óptima.

En contra la energía eólica offshore no parece que cuente con información similar, donde además de los regímenes de viento, se necesitan datos adicionales como barimetría, corrientes, altura y frecuencia de ola máxima.

Aunque sí es verdad, que comparte muchos de los aspectos tecnológicos de las anteriores, tiene problemas específicos de mayor envergadura, como por ejemplo, los derivados de los problemas de instalación, sustentación y diseño de mecanismos correctores de la inclinación producida por las olas sobre el plano de incidencia del viento en las palas de las turbina o los de anclaje, problemas de corrosión, incluso, de su construcción en zonas de mar agitado. Por razones evidentes, los costes de instalación y mantenimiento de estos equipos serán siempre considerablemente superiores a las onshore, aunque estas desventajas se pueden ver compensadas con un mayor rendimiento.

Este mayor rendimiento vendría dado principalmente porque la energía que contiene el viento en alta mar es mayor que en tierra. Siendo éste un dato que ha podido ser demostrado a medida de los años y atreves de la aplicación de las nuevas tecnologías.

Uno de los últimos estudios realizados fue llevado a cabo por Archer y Jacobson en el 2005, los cuales concluían que los valores medios de viento sobre el mar son dos veces mayores que en tierra. Y los valores del viento en m/s son el componente esencial para el aprovechamiento de la energía eólica.

Todo esto justifica la elaboración de este trabajo, la comparación del aprovechamiento de un parque eólico offshore frente a uno onshore. La cantidad de energía que se podría producir. Y en consecuencia la necesidad de embarcaciones especializadas en la zona para el desarrollo y mantenimiento de las instalaciones.

Alternativamente también estudiaremos un tipo de energía renovable mas actual en el tiempo, y que en gran medida se encuentra en fase experimental, como es la undimotriz. Actualmente ya existen en España parques de undimotriz, concretamente en Bilbao, y en Canarias están empezando a hacerse pruebas experimentales.

Es un tipo de energía que capta la energía que contiene las olas, lo cual resulta interesante debido a que las olas se generan continuamente en todos los mares y costas del planeta.

Eólica y undimotriz, como futuro de captación de energías renovables en el mundo marino.

Capítulo 1.

Antecedentes Energías Renovables offshore

La continua preocupación de la sociedad por el deterioro del medio ambiente alcanza un carácter global, traspasando las fronteras nacionales y locales, por eso, es cada vez más evidente la necesidad de proteger este medio y la promulgación de políticas correctivas.

Esta preocupación debe ser la base fundamental para intentar cambiar nuestro modelo energético, pues un modelo basado en combustibles fósiles, como el carbón y petróleo que por naturaleza son finitos y los responsables del 30% de las emisiones de CO₂ resulta ser un modelo completamente insostenible desde un punto de vista tanto ambiental como social.

Nos enfrentamos a un problema sin precedentes en la historia de la humanidad, la emisión de gases de efecto invernadero son sin duda un grave problema que hay que combatir si queremos evitar el calentamiento global del planeta y por consiguiente el cambio climático.

Ante esta insostenible situación, en el Protocolo de Kioto sobre el cambio climático, se compromete a los países industrializados a estabilizar las emisiones de efecto invernadero, y un camino a seguir, que en Europa incluye como objetivos para el 2020 el aumento de la contribución de las energías renovables hasta un 20%, de una

reducción de los efectos de gases invernaderos en un 20% con respecto a los niveles de 1990, y una mejora de la eficiencia energética del 20%. Es el llamado Paquete de Energía y Cambio Climático o 20-20-20.

Debido a ello, a nivel global se están potenciando el uso de recursos basados en energías renovables, y entre ellas el de la energía eólica, y más concretamente el de las de instalaciones offshore.

En el mundo, a finales de 2010 se encontraban en operación 45 instalaciones eólicas marinas, totalizando unos 2.950 MW, todos ellos en el Norte de Europa. Comparándolo con el desarrollo de la eólica terrestre, los parques eólicos marinos representan un 1,5% de la potencia eólica mundial.

En España, a pesar de existir 4.600 km de costa no existe ningún parque eólico marítimo, ni siquiera en construcción, debido, en parte a la todavía numerosa existencia de emplazamientos terrestres, a la peculiaridad física de nuestras costas y a la farragosa tramitación que se espera haya de preparar ante la multitud de instancias y organismos que han de intervenir.

España cuenta con una plataforma continental muy limitada, donde las altas profundidades de más de 50 metros se encuentran a pocos kilómetros de la costa, lo que dificulta su implementación. Por eso, se hace necesario desarrollar una tecnología específica marina de modelos de aerogenerador con unos costes más bajos, o con tecnología de modelos flotantes. Sólo de esa forma podríamos situarnos en una posición similar a la de otros países como Alemania, Holanda, Dinamarca, o Reino Unido, que, a diferencia de nosotros, disponen de extensas plataformas continentales con poca profundidad y que hacen posible la imbricación de la energía eólica marina en el contexto de fomento de las energías renovables de manera mucho más sencilla y con menos coste que en nuestro caso. Esta limitación de la plataforma continental es mayor en las costas del mar cantábrico, donde además, el recurso eólico es mejor, mientras que, la plataforma continental es más extensa en las costas del levante pero el recurso eólico es menor y aparece un problema añadido como es el impacto del turismo.

La necesidad de contar con una primera toma de contacto del recurso eólico tiene su fundamento en que la evaluación del potencial eólico en el mar es mucho más difícil que en tierra, ya que no se dispone, en buena medida, de datos fidedignos sobre las condiciones del viento en el mar, y la instalación de torres en emplazamientos marinos que certifiquen esos datos resulta muy costosa, por lo que es necesario desarrollar herramientas que permitan hacer predicciones fiables con la tecnología de la que disponemos, como por ejemplo la utilización de imágenes satélite, o modelos de mesoscala.

Sin embargo, la dificultad de evaluar el potencial eólico en aguas profundas no sólo estriba en conocer de antemano la potencialidad del recurso del viento, sino que existen otros factores como por ejemplo, las posibles condiciones meteorológicas que haya en los emplazamientos marinos, o las características oceanográficas del lugar que pueden condicionar la idoneidad de la inversión. Todas estas actuaciones deben ser tenidas en cuenta por el promotor que desee instalar un conjunto de aerogeneradores en nuestras costas, ya que si partimos del hecho de que las características de nuestras costas obligan en gran medida, a desarrollar los emplazamientos en aguas profundas, la falta de previsión de estas situaciones puede hacer que la inversión no resulte factible desde un punto de vista económico. [01]

Uno de los puntos a evaluar son los costes de la tecnología eólica marina y su rentabilidad. En la siguiente tabla se puede apreciar una comparativa con la eólica terrestre en las fases de instalación, operación y mantenimiento.

Concepto	Eólica onshore	Eólica offshore
Inversión media por MW	1.350.000 €/MW	3.100.000 €/MW
Costes medios de conexión a red por MW instalado	140.000 €/MW	362.000 €/MW
Costes medios de operación y mantenimiento por MW instalado	19.500 €/MW	98.000 €/MW
Horas medias de utilización al año	2.100 horas	3.500 horas

Tabla 1.1 Diferencia de costes offshore-onshore [02]

Entre las conclusiones más claras se aprecia la diferencia de peso que tiene los costes de la turbina sobre la inversión total, un 70% en onshore y un 45% en offshore, así como los costes de obra civil y accesos, un 11% y un 30% en offshore. [02]

Pero, como se ha mencionado, para el desarrollo de un parque eólico también se tendrá que tener en cuenta la ubicación del mismo, y aquí es donde entra en escena el IDEA, instituto para la diversificación y ahorro de la energía, que ha publicado un atlas del recurso eólico en España que acompaña al plan de Energías renovables 2011-2020.

Este atlas recoge la evaluación del potencial eólico disponible a nivel de planificación en tierra y en mar, incluyendo la explotación de sus resultados mediante un sistema de información geográfica de consulta pública, cuyo ámbito de aplicación es todo el territorio nacional, incluyendo las aguas interiores y una banda litoral marina adicional de 24 millas náuticas. [03]

Desde los Ministerios de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, e Industria, Turismo y Comercio, se aprobó en 2009 la evaluación de la superficie útil disponible para la instalación de parques eólicos marinos, teniéndose en cuenta tanto aspectos medioambientales como técnicos, siendo el siguiente el resultado:

- Consideraciones medioambientales: zonificación del “Estudio Estratégico Ambiental del Litoral Español” para la implantación de parques eólicos marinos.
- Consideraciones técnicas: profundidades marinas (batimetría) adecuadas a la situación actual de la tecnología eólica marina.
- Consideraciones económicas: disponibilidad de recurso eólico suficiente para que puedan implantarse parques eólicos marinos, considerando la mayor inversión y gastos de explotación asociados frente a los parques eólicos en tierra.

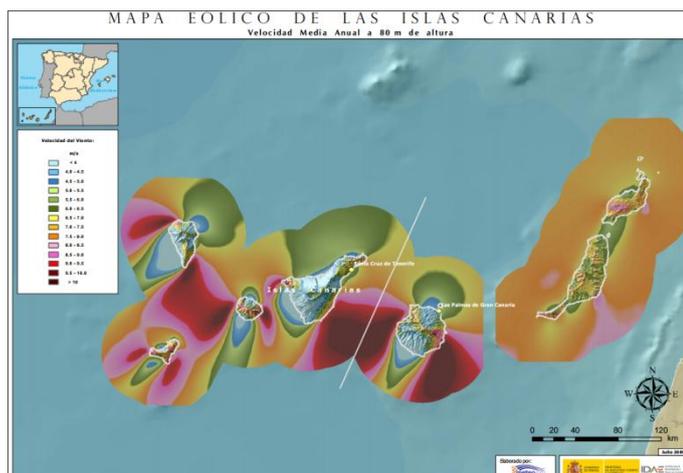


Imagen 1.1 Mapa eólico de las Islas Canarias [04]

La zonificación ambiental resultante se ajusta al siguiente código de colores:

- Color rojo: “zonas de exclusión”, en las que se detectó incompatibilidad entre la existencia de parques eólicos marinos (mayores de 50 MW) y los usos o actividades ya establecidos.
- Color amarillo: “zonas aptas con condicionantes”, donde el desarrollo de parques eólicos marinos está condicionado, a falta de mayor información de detalle.
- Color verde: “zonas aptas”, en las que no se detectó incompatibilidad, en términos de planificación estratégica.

Cabe resaltar que la aptitud ambiental definitiva de la implantación eólica marina en las zonas clasificadas como “aptas” y “aptas con condicionantes” se determinará para cada proyecto específico, tras los necesarios estudios de detalle.

En estudios recientes del 2012 se da a conocer el dato de que entre el 1 de enero y el 30 de junio del 2011 se encuentran en construcción un total de 11 parques eólicos offshore, y ninguno de ellos es en aguas españolas. Esto es debido principalmente a que se espera que durante la próxima década existan aerogeneradores que superen los 4MW de potencia unitaria, que permitan un mejor aprovechamiento de los

emplazamientos; y a que se evalúe la rentabilidad real de los últimos parques eólicos construidos. [02]

Si bien existe una treintena de proyectos eólicos marinos en las costas españolas, Cádiz, Huelva, Castellón, Tarragona, La Coruña, e Islas Canarias, pero solamente en Arinaga en Gran Canaria se ha instalado un aerogenerador offshore en fase experimental.

De acuerdo con todo esto el Clúster Marítimo Español (CME), organización que integra a las industrias, los servicios y actividades económicas de nuestro país relacionadas con la mar, cree que la industria nacional debe aprovechar sus ventajas competitivas, una gran experiencia internacional en el sector naval y un enorme prestigio en el sector eólico (terrestre), para posicionarse bien en esta actividad. Ya que de acuerdo a sus previsiones este subsector podría emplear hasta 10.000 trabajadores en los próximos años, aunque no se instale un solo megavatio frente a las costas españolas.

Por ello el Clúster presentó en enero del 2012 el estudio “Oportunidades de negocio de la energía eólica marina en el sector marítimo español” con el objeto de identificar las oportunidades que se abren hasta el 2020 para el sector marítimo español a raíz del desarrollo en Europa de la energía marina, así como las barreras que separan a España de este propósito. [01]



Imagen 1.2 Ejemplo de embarcaciones necesarias.[05]

Según el documento está previsto que, durante los próximos años, será necesaria la construcción de más de cuarenta buques instaladores de aerogeneradores, a los que hay que añadir decenas de embarcaciones auxiliares (remolcadores, dragas, grúas flotantes...), 14.000 torres para turbinas, subestaciones eléctricas... y para ello el sector naval cuenta con la capacidad necesaria para su desarrollo.

Por su parte, la energía undimotriz, es una energía sostenible que proviene de las olas, que son el resultado del efecto del viento soplando a lo largo de cientos o miles de kilómetros en mar abierto, lo que origina una transferencia de energía hacia la superficie del océano. Son, por tanto, una forma de energía cinética a la que se puede acceder usando diversos mecanismos armónicos que responden al movimiento de las olas, captando parte de su energía. En definitiva, la energía undimotriz consiste en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del oleaje para la producción de electricidad.

El oleaje se entiende desde un punto de vista de la ingeniería como un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento desigual de la atmósfera terrestre genera viento, y el viento genera olas. Únicamente el 0,01 % del flujo de la energía solar se transforma en energía de las olas. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias sin apenas pérdida de energía. Por ello, la energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental, de esta manera, su energía se concentra en las costas.

La energía contenida en las olas varía de un sitio a otro, pero, en general, cuanto más alejadas del ecuador estén, más energía contendrán. Aunque condiciones locales, tales como, tipo de costa, lugar donde se generen y profundidad del océano, tienen una gran importancia en la definición de la cantidad de energía. Según estimaciones, se puede asumir que el flujo de energía de las olas en Europa podría equivaler a 1.000 TWh anuales, cantidades a tener muy en cuenta de cara a una futura expansión en el aprovechamiento de este tipo de energía. [06]

En España el 8 de julio de 2011 en la población guipuzcoana de Motrico en el País Vasco, se inauguró la central undimotriz de Motrico. La cual consta de 16 turbinas

con una potencia total de 296 kW capaces de producir 970MWh al año. Se trata de la primera planta comercial de energía mareomotriz a nivel mundial.

Esta planta está ubicada en el dique exterior de abrigo del puerto de Motrico y utiliza la tecnología denominada columna de agua oscilante (OWC, Oscilating Water Column) con la cual la corriente de aire que se produce cuando el nivel del agua en unas celdas cerradas asciende y desciende debido al movimiento de las olas mueven sendas turbinas

La planta aparece frecuentemente con la denominación de "central mareomotriz" cuando en realidad se trata de una central undimotriz u olamotriz. La denominación de "mareomotriz" se ha extendido a todo los tipos de instalaciones que obtienen aprovechamiento energético del mar, cuando en realidad hace referencia al aprovechamiento de la energía generada por las mareas mientras que la undimotriz lo hace de la energía generada por las olas. [07]

En Canarias este tipo de energía aún se encuentra en fase experimental, pero recientemente han aparecido artículos en diversos medios sobre la futura instalación de plantas de aprovechamiento de energía undimotriz. Como ejemplo el aparecido en el Diario de Avisos el 31 de Enero del 2014. [08]

Tenerife y Lanzarote son las islas elegidas por la empresa Langlee Wave Power para dar marcha al proyecto pionero a nivel mundial de obtención de energía undimotriz, a partir de las olas. Justamente, el jueves 30 de enero, el presidente del Cabildo de Tenerife y el presidente de dicha empresa firmaron un acuerdo para promover la instalación de plantas para la obtención de energía en los municipios del noroeste: Garachico, Buenavista del Norte e Icod de los Vinos, que ya lo solicitaron a través de un acuerdo plenario.

Tras dos años de estudios la empresa ha decidido apostar por Canarias como mercado inicial por varios motivos: la profundidad de sus aguas, la calidad de un oleaje constante y mínimos riesgos climáticos. Además, el archipiélago posee unas condiciones de oleaje estables, una industria naval desarrollada y uno de los costes energéticos más caros de Europa. Pero, ¿en qué consiste exactamente este proyecto? ¿Qué es lo que se instalará en las costas isleñas? Y lo más importante, ¿a quiénes beneficiará?

Langlee Wave Power es una empresa noruega que trabaja especialmente en la investigación de tecnología para el desarrollo de la energía marina. Sus profesionales han creado un convertidor semi-sumergido y flotante que transforma el movimiento de las olas en energía eléctrica, al que han llamado Robusto.

El diseño es sencillo, de bajo coste y de fácil mantenimiento, con unas dimensiones de 30x50 metros y una potencia de 132 kW, muy competitiva con la energía eólica y la solar. Además, el Robusto se encuentra sumergido, de manera que no es visible desde la costa. En la actualidad, los dispositivos que existente en el mundo solo se dedican a la investigación y son boyas o columnas batientes.

Su principal novedad, además del diseño, es que aprovechará el movimiento horizontal de las olas y que generará energía aunque el mar esté en calma. Robusto enviará esa energía a través de un cable submarino que se conecta a tierra.

No obstante, la eficiencia energética es lo más llamativo, ya que alcanza el 64% del rendimiento, en comparación a la fotovoltaica, por ejemplo, esa cifra oscila entre el 10 y el 30% máximo. Por otra parte, tiene una capacidad de más de 4.400 horas de producción anual.

1.1 El Recurso Eólico y su aprovechamiento

La energía eólica procede de la energía del sol (energía solar), ya que son los cambios de presiones y de temperaturas en la atmósfera los que hacen que el aire se ponga en movimiento, provocando el viento.

Cuando se habla de energía eólica se está haciendo referencia a aquella energía contenida en el viento, pues las masas de aire al moverse contienen energía cinética (aquella asociada a los cuerpos en movimiento), las cuales al chocar con otros cuerpos aplican sobre ellos una fuerza. Por eso cuando nos enfrentamos a una ráfaga de viento sentimos que algo nos empuja.

La energía del viento dependerá de varios parámetros como la temperatura, la zona geográfica, o la altura, siendo estos datos los que se estudian a la hora de realizar el estudio de un futuro emplazamiento para aprovechar la energía eólica de una zona.

El viento es un formidable recurso natural aprovechado como fuente de energía desde hace miles de años. Así tradicionalmente se ha usado para impulsar barcos desde la época de los egipcios hace casi siete mil años, o para producir la rotación de las palas o aspas en molinos de viento o de agua con fines agrícolas a partir del siglo VII antes de Cristo.

Sin embargo la extensión de la energía eólica a gran escala no tuvo lugar hasta el siglo XIX, en Estados Unidos, donde se fabricaron más de seis millones de molinos de bombeo de agua. Estos molinos se utilizaron masivamente para el suministro de agua procedente de pozos durante la colonización del lejano Oeste americano.

A lo largo de las primeras décadas del siglo XX, la teoría aerodinámica sufre un importante desarrollo. Los diferentes estudios aerodinámicos se centran en profundizar en el conocimiento de las fuerzas que aparecen en las palas de las turbinas eólicas, las cuales habían empezado a surgir a finales del siglo XIX. Quedando sentadas las bases de la actual energía eólica.

Pero es con la crisis del petróleo de 1973 cuando la energía eólica recibe su gran impulso, ante la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de energía que permitan reducir las importaciones de crudo, surgiendo una generación de aerogeneradores

comerciales, más grandes y eficientes. Siendo en 1987 cuando en España se empezó el desarrollo de parques eólicos, ubicándose los primeros en Gerona y en Tenerife (Arico).

Desde entonces, y tras muchos años de intenso desarrollo, tanto en los aspectos tecnológicos como de mercado, y de la mano de legislaciones específicas para impulsar las energías renovables como herramienta para paliar el cambio climático y para garantizar la creciente demanda de energía, la energía eólica sigue su imparable penetración en los mercados de todo el mundo. En la actualidad la eólica es la más desarrollada de las energías renovables y constituye una fuente de generación eléctrica de primer nivel en muchos países, siendo China la potencia que más ha crecido en cuanto a generación de energía eólica.

En los últimos años, los parques eólicos han encontrado un nuevo hábitat en el mar, en las instalaciones off-shore. Allí, la disponibilidad de viento es significativamente mayor que en tierra, con la ventaja adicional de que el recurso eólico suele ser más constante, con menos variaciones estacionales. Además, en los países más avanzados, la eólica terrestre empieza a notar cierta saturación en cuanto a la disponibilidad de los mejores asentamientos, y en cuanto a los detractores que se oponen por el impacto paisajístico, mientras que el inmenso potencial marino está casi sin explotar. Por ello se prevé que las instalaciones off-shore alcancen un gran auge en los próximos años. [01]

1.1.1 El Recurso Eólico.

El viento es una fuente de energía que tiene su origen en la luz solar que llega a nuestro planeta, pero la radiación solar calienta la superficie terrestre de manera desigual, dado que las áreas con mayor insolación, como las regiones cercanas al ecuador, están más calientes que aquellas con menos luz solar, como las situadas en elevadas latitudes, más cerca de los polos. Las masas de aire de la atmósfera sufren el mismo calentamiento desigual, lo que provoca diferencias de presión, que son la causa en si misma de que se mueva el aire. Y aun así la transformación de energía solar en energía cinética en forma de viento es muy baja, sólo entre el 1 y el 2%.

El viento circula desde las zonas de altas a las bajas presiones, desde las zonas anticiclónicas hacia las borrascosas. A este fenómeno se le une el efecto del movimiento de rotación de la tierra, que genera fuerzas centrífugas y de Coriolis. Estas fuerzas provocan que en el hemisferio norte el viento circule preferentemente de oeste a este, y en el hemisferio sur de este a oeste. [01]

1.1.2 Aprovechamiento. Aerogeneradores.

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). La energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Los componentes básicos de un aerogenerador son:

- La hélice o rotor. Es la parte expuesta al viento, que al girar sus palas, transmiten la energía generada por su movimiento a una caja de engranajes.
- Turbina o caja de engranajes. Reciben la energía procedente de la hélice y la transmiten al generador.
- Freno. Necesario para regular el funcionamiento de la instalación.
- Generador. Equipo donde se produce electricidad a partir del movimiento.
- Góndola o carcasa de protección. Dentro de esta carcasa van incluidos los equipos principales del aerogenerador.
- Torre. Es la encargada de sujetar a los componentes arriba citados. Cuánto más alta sea la torre, más posibilidades tenemos de conseguir vientos de mayor velocidad, y de alejarnos de la turbulencias del viento inferior. La torre se suele construir de acero o de hormigón.
- Equipo de Control. Alojado en el interior de la torre, para controlar todo el generador, en función de las condiciones exteriores y de las necesidades de producción. [09]

Partes fundamentales.

- La góndola

Es el elemento que actúa como lugar de alojamiento de los sistemas eléctricos y mecánicos. Situado en lo alto de la torre, y adosada a ella, se encuentran el buje y el rotor. En su interior alberga el elemento más importante por el que está compuesto un aerogenerador, y que no es otro que el generador.

En la siguiente imagen se pueden apreciar las distintas partes que ocupan el interior de la góndola.

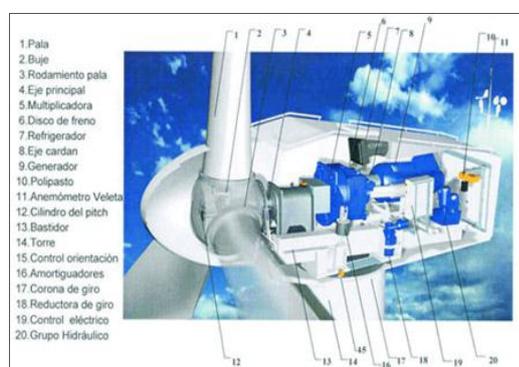


Imagen 1.3 Estructura Góndola de un aerogenerador [10]

- El Rotor

Es el actor principal a la hora de interceptar el viento, captando la energía de su movimiento. Transforma esta energía mecánica, que es aplicada al llamado “eje lento” de la máquina.

Está formado por varias palas unidas a una gran pieza central denominada buje. El buje conecta el rotor al eje de giro, que a su vez está conectado con el resto de elementos mecánicos.

La gran mayoría de los aerogeneradores modernos utilizan rotores de tres palas, ya que el aumento del rendimiento a partir de 3 palas es insignificante. Por el contrario, el número reducido de palas en el rotor permite mayor velocidad de giro en el eje del mismo, resultando estos más pequeños y baratos, pero más inestables produciendo oscilaciones indeseadas.

Un aspecto fundamental es la elección del diámetro del rotor. Rotores más grandes permiten captar más energía del viento, traduciéndose en una mayor potencia.

A continuación se puede observar en la imagen como aumenta la potencia generada en relación al diámetro del rotor.

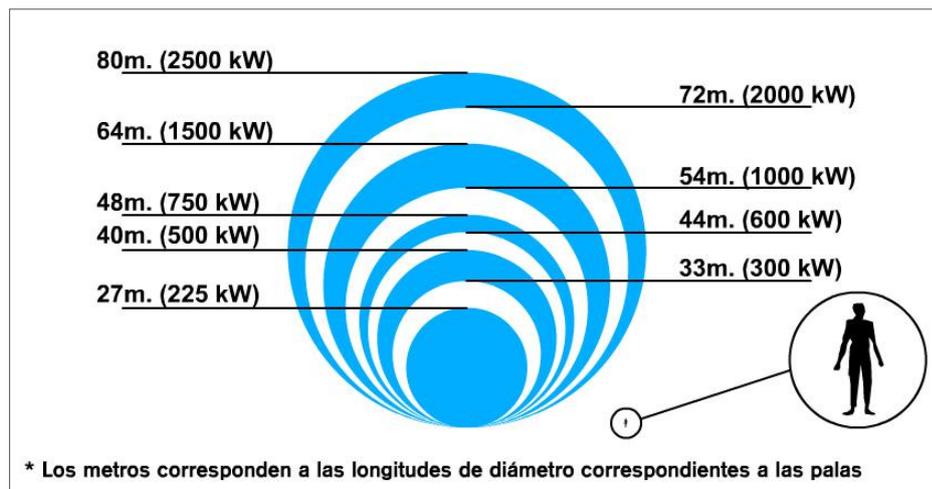


Imagen 1.4 Potencia generada según diámetro del rotor. [11]

- El generador

Es el principal componente de los aerogeneradores, y es el encargado de transformar la energía mecánica del rotor en electricidad.

El principio de funcionamiento de un generador eléctrico consiste en hacer girar un conductor o bobinas en un campo magnético, que puede ser provocado por un imán permanente o un electroimán. Cuando esto ocurre, en las bobinas del generador aparece una tensión inducida, o fuerza electromotriz, que al ser aplicada a un circuito externo hace que por éste fluya una corriente eléctrica.

Los generadores tienen una velocidad máxima y mínima de giro del rotor en la que pueden funcionar, inyectando la electricidad generada a la red. Por debajo de determinada velocidad, cuando el viento sopla con poca intensidad,

el generador se desconecta. Cuando el viento sopla con demasiada fuerza, es necesario proteger los sistemas eléctricos y mecanismos del aerogenerador, por lo que también se produce la desconexión. [01]

1.2 Los Parques eólicos

Un parque eólico es un conjunto de aerogeneradores conectados entre sí a baja tensión, donde la principal razón de su existencia es que el agrupamiento de las turbinas permite aprovechar mejor las posibilidades energéticas del emplazamiento, reducir costes y evacuar la energía desde un solo punto, con lo que a su vez se reducen el número de líneas de transporte y se minimizan impactos ambientales.

Los emplazamientos exigen las características de que el viento cumpla una serie de condiciones respecto a la velocidad, la continuidad y la estabilidad.

Normalmente, son necesarias velocidades medias anuales del viento superiores a los 6,5 m/s. Y la distribución y situación de los aerogeneradores dependerán de la orografía del terreno y de las direcciones predominantes del viento en la zona.

Cada parque cuenta con una central de control de funcionamiento que regula la puesta en marcha de los aerogeneradores, controla la energía generada en cada momento, etc.

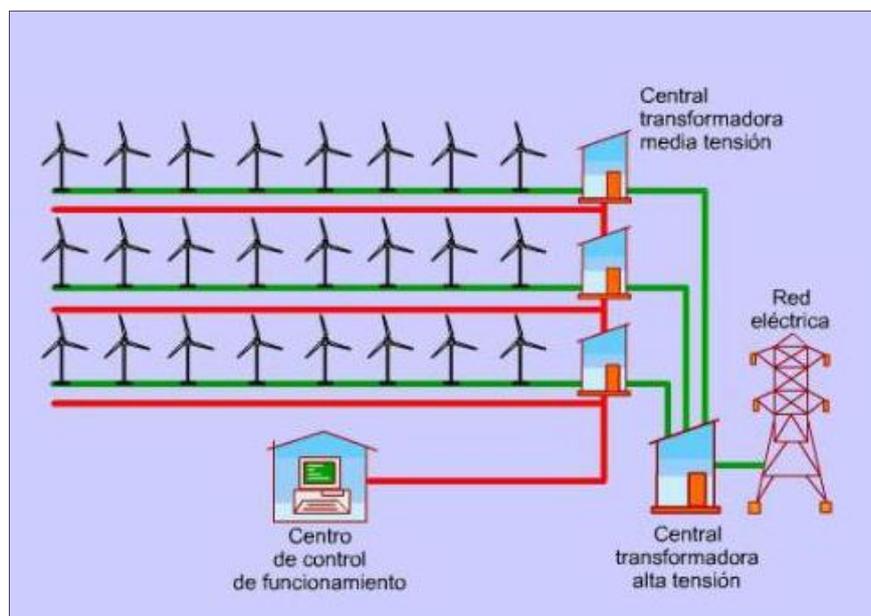


Imagen 1.5. Esquema funcionamiento de un parque eólico. [12]

1.2.1 Desarrollo de un parque eólico

El desarrollo de un parque eólico requiere de una sucesión de operaciones de muy diversa índole que transcurren desde el momento en que un posible emplazamiento es identificado hasta el momento en que comienza la venta de la electricidad generada a la compañía eléctrica correspondiente.

Un esquema simplificado del procedimiento para poner en marcha una central de producción eólica puede constar de los siguientes pasos:

- Selección del posible emplazamiento.
- Evaluación del recurso eólico.
- Análisis de la viabilidad económica del proyecto.
- Estudio de los efectos medioambientales.
- Diseño del parque y redacción del proyecto.
- Alquiler o adquisición de los terrenos.
- Tramitación del punto de conexión y evacuación.
- Tramitación de los permisos administrativos.
- Apertura de vías acceso.
- Tramitación de los contratos de venta de la electricidad.
- Traslado y montaje de los equipos.
- Puesta en marcha y prueba de estos.

Lógicamente, tras la puesta en marcha, el parque comienza su vida útil, en la que inyecta energía a la red eléctrica. Tras este periodo, que puede prolongarse durante varias décadas, (la vida útil actual estimada para un aerogenerador es de unos 20 años) el parque es desmantelado. [01]

1.2.2 Parques eólicos offshore

En el mar, la disponibilidad de viento es mayor y tiene menos variaciones estacionales que en tierra. Además, el salto al entorno marino aumenta la disponibilidad de nuevos emplazamientos, que empiezan a escasear en los países con más tradición eólica.

El primer parque eólico offshore, el de Vindeby, se instaló en las costas de Dinamarca en 1991. Estaba compuesto por 11 aerogeneradores de 450 KW, que en total sumaban 4,59 MW. Posteriormente, también en Dinamarca, se instalaron los parques de Horns Rev (160 MW), en el Mar del Norte y de Nysted (158 MW), en el Mar Báltico. [05]

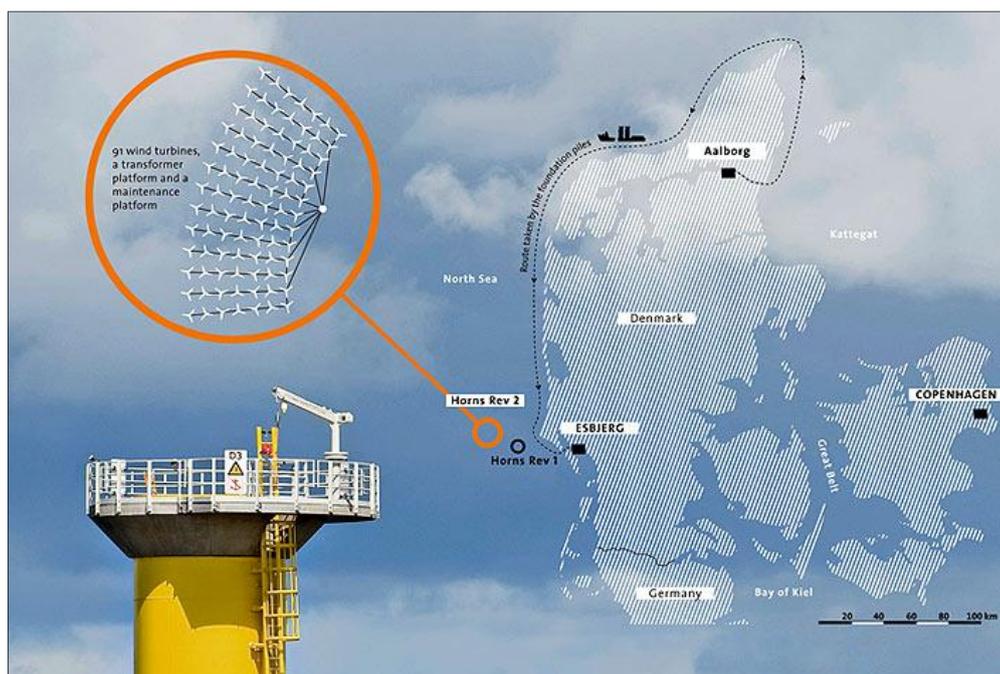


Imagen 1.6. Ubicación de los 91 aerogeneradores del parque Horns Rev. [05]

Uno de los motivos de que estos primeros parques eólicos offshore fuesen en este país y no en otro, es porque las condiciones de sus costas son más favorables a este tipo de infraestructuras, con unas profundidades entre 5 y 15 metros, y también gracias a las políticas nacionales. En este sentido, por su profundidad, la costa española no favorece este tipo de instalaciones. Los puntos críticos de este tipo de iniciativas son, sobre todo, las cimentaciones/anclaje y la evacuación eléctrica, por lo que es necesario potenciar el desarrollo tecnológico para cimentaciones y anclajes en aguas profundas.

La mayoría de los actuales parques offshore están situados en aguas pocas profundas, donde las dificultades técnicas son menores y los costes de ejecución más moderados. Sobre todo, a distancias de la costa de menos de 14km, y a profundidades de a lo sumo 20 metros.

Los últimos avances técnicos han hecho posible desarrollar proyectos de demostración en los que los aerogeneradores están anclados a mayor profundidad. El más emblemático es el parque Beatrice, en Escocia, construido a 25 km de la costa. En esta instalación se ha conseguido anclar los aerogeneradores a 45 m.

El dato actual a destacar es la puesta en funcionamiento en el Reino Unido del parque eólico London Array, dotado de 175 turbinas y una potencia de 630MW. Está ubicado veinte kilómetros mar adentro, por lo que ha necesitado la instalación de casi 450 kilómetros de cable submarino y dos subestaciones offshore que recogen la electricidad generada por los aerogeneradores antes de transportarla a la costa. Cada máquina tiene una base exclusiva, adaptada a las condiciones específicas del terreno, y oscila entre los 5 y los 25 metros de profundidad. Por encima del nivel del agua, los aerogeneradores alcanzan los 147 metros de altura. El parque genera energía suficiente para abastecer medio millón de hogares, lo que evitará la emisión de 925.000 toneladas anuales de CO₂. [13]



Imagen 1.7. Parque eólico offshore London Array [14]

1.2.3 Ventajas y desventajas de la energía eólica marina.

- Mayores velocidades de viento
Las velocidades del viento en el mar son sustancialmente más elevadas que en tierra firme. Se estima una diferencia en torno al 20%. Teniendo en cuenta que la energía del viento depende del cubo de la velocidad, el aumento de la producción de energética ronda el 80%. Los aerogeneradores más optimizados desde el punto de vista económico, probablemente produzcan un 50% más de energía en el mar que en tierra.
- Mayor estabilidad del viento
- Mayor abundancia del recurso eólico
Los recursos eólicos presentes en mares de profundidades has 50 m son notablemente mayores que el consumo eléctrico total.
- Mayor rugosidad superficial
Lo que permite aerogeneradores más baratos al poder construirse torres de menor tamaño.
- Menor turbulencia
Se debe a que la diferencia de temperatura entre la superficie marina y la del aire circundante es menor. Y como consecuencia se alargará la vida del aerogenerador.

Sin embargo, los parques eólicos marinos, tienen también importantes desventajas respecto a las terrestres:

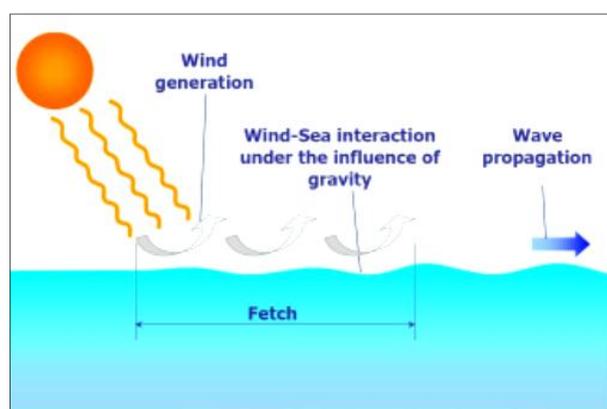
- La evaluación del recurso eólico es más compleja y mucho más cara que en tierra.
- No existen infraestructuras eléctricas que conecten, las áreas con mayores recursos eólicos en mitad del mar, con los centros de consumo.
- Los costes de la cimentación y de las redes eléctricas de estas instalaciones encarecen la tecnología offshore.
- Es mucho más complicado acceder y trabajar en medio el mar.
- Los costes y dificultades aumentan en función se adentran en la profundidad marina.

- Las máquinas requieren más separación entre ellas, lo que implica un aumento de la inversión. Esto se debe a que la baja rugosidad del mar hace que las turbulencias se propaguen más rápidamente y la estela de las máquinas influya en otras, disminuyendo así la vida útil.

A partir de estas desventajas, en España se ha ido acumulando un retraso en la tramitación para la instalación de parques eólicos marinos en las costas españolas, donde la repartición del recurso eólico se centraría en cuatro grandes zonas: Galicia, el estrecho de Gibraltar, Tarragona y Murcia. [01]

1.3 El recurso de las olas.

La energía de las olas es una forma de almacenamiento de la energía solar. El sol produce diferentes temperaturas a través del planeta generando vientos que soplan sobre la superficie del océano que a su vez causan el oleaje. Las olas pueden viajar cientos de kilómetros con mínima pérdida de energía y con una densidad de potencia mayor que la potencia del viento o la potencia del sol. Estas olas de aguas profundas no deben ser confundidas con las olas que vemos rompiendo contra las costas o las playas.



1.8 Proceso de creación de la ola. [15]

Cuando una ola se acerca a la costa se hace lenta, decrece en longitud de onda y crece en altura. La mayor parte de la energía se pierde en la fricción con el suelo marino y solo una fracción de la misma alcanza la orilla. Una ola contiene tanto energía cinética como energía potencial gravitacional. La potencia transportada por la ola depende de la altura y del período, y es usualmente dada en unidades de potencia entre unidades de longitud (W/m). [15]

1.3.1 Aprovechamiento

El movimiento de las olas puede convertirse en energía mecánica y luego en energía eléctrica usando sistemas apropiados.

Existen un gran número de dispositivos pensados para el aprovechamiento de este tipo de energía, en claro contraste con cualquier otro tipo de aprovechamiento de energía renovable. A pesar de que hay unas 1.000 patentes mundiales de generadores energéticos de olas (GEO), los conceptos en los que se basan se pueden clasificar en unos pocos tipos básicos:

- Columna oscilante de agua: consiste en la oscilación del agua dentro de una cámara semisumergida y abierta por debajo del nivel del mar. Se produce un cambio de presión del aire por encima del agua.
- Sistemas totalizadores: pueden ser flotantes o fijos a la orilla. Atrapan la ola incidente, almacenando el agua en una presa elevada. Esta agua se hace pasar por unas turbinas al liberarla.
- Sistemas basculantes: pueden ser tanto flotantes como sumergidos. El movimiento de balanceo se convierte a través de un sistema hidráulico o mecánico en movimiento lineal o rotacional para el generador eléctrico.
- Sistemas hidráulicos: son sistemas de flotadores conectados entre sí. El movimiento relativo de los flotadores entre sí se emplea para bombear aceites a alta presión a través de motores hidráulicos, que mueven unos generadores eléctricos.
- Sistemas de bombeo: aprovechan el movimiento vertical de las partículas del agua. Genera un sistema de bombeo mediante un flotador en una manguera elástica. [06]

A su vez estos convertidores de energía de las olas se clasifican según en la posición del dispositivo respecto a la costa, en el modo de movimiento, en el principio de funcionamiento, etc. Para a continuación hacerlo según el sitio donde se instalen, que será sobre la costa, cerca de la costa y lejos de la costa.

1.4 Los Parques Undimotriz

A diferencia con los parques eólicos, los undimotriz no tienen un desarrollo o estructura bien definida, y esto se debe básicamente al gran número de convertidores que existen. Aunque siendo esto así, no se queda exento de una regulación exhaustiva en cuanto a las instalaciones y a la venta de kW.

Noruega y Escocia son los países pioneros de la tecnología undimotriz. El país escandinavo instaló en 1985 una planta en la costa cercana a Bergen, en el que se combinaba una columna de agua oscilante con un sistema propio, denominado "canal rematado en punta". Por su parte, Escocia lleva también años experimentado con estos sistemas en la isla de Islay, e incluso aportando nuevos, como el denominado "Pato de Salter". Se trata de una especie de conos que al oscilar con las olas impulsan un generador. Asimismo, países como Estados Unidos, Australia, India, China, Suecia o Japón también están probando distintos sistemas. [16]

Actualmente los ingenieros de la empresa Aquamarine Power han obtenido la aprobación del Scottish Government para construir el parque de energía undimotriz más grande del mundo, que se situará frente a la costa noroeste de Lewis, en Escocia, nación que cuenta con el 10% del potencial europeo en este tipo de energías y que está sabiendo aprovechar al máximo. [17]



Imagen 1.9 Equipo Oyster. Aquamarine Power [17]

1.4.1 Ventajas y desventajas energía undimotriz

El potencial de la energía de las olas, según la UNESCO, es de unos 4.000 gigavatios (GV), si bien todavía no se sabe la cantidad que se puede aprovechar y suministrar a un precio económico. En este sentido, las instalaciones undimotrices requieren una alta inversión y un mayor desarrollo tecnológico. Sus responsables deben mejorar en varias cuestiones, como su eficiencia al aprovechar el movimiento no lineal y esquivo de las olas, o su resistencia al embate de las mismas, y todo ello con un coste asumible.

Por ello, este tipo de instalaciones todavía no es competitivo. Por ejemplo, la planta recién inaugurada en el 2009 en Portugal, Aguçadoura, es "comercial" gracias a las ayudas institucionales: cada kilovatio hora (kWh) producido será pagado a 26 céntimos de euro, mientras que el kWh "convencional" se está pagando por debajo de los 9 céntimos.

Las posibilidades de contar con una energía limpia más no se pueden desdeñar. La tecnología undimotriz presenta incluso más ventajas que otras renovables: se trata de una energía constante y predecible, ya que siempre hay olas, y su impacto en el entorno también es menor. [16]

Capítulo 2.

Objetivos

Documentarnos sobre su aprovechamiento offshore, para su evaluación y entendimiento, nos proporcionará una visión de la realidad de las mismas, y si puede ser un camino a seguir en cuanto a energías renovables en Canarias, en base al Protocolo de Kioto sobre el cambio climático que entró en vigor en el 2005.

Para ello se harán los cálculos necesarios para realizar una comparación energética entre la energía eólica onshore y offshore, y la undimotriz. Y así estimar la posible implantación de energías renovables offshore en las islas.

A través de las conclusiones se podrá determinar la necesidad o no, de la existencia de navegación de buques específicos en la zona.

Capítulo 3.

Desarrollo del estudio

3.1 Eólica

La evaluación del recurso eólico es una de las fases más importantes en el desarrollo de un proyecto de energía eólica, ya que los datos obtenidos determinan la viabilidad del mismo.

El proceso de evaluación incluye:

- Medidas meteorológicas en el emplazamiento.
- Medidas en observatorios históricos de referencia.
- Utilización de herramientas de modelización del campo de vientos.
- Evaluación de producciones brutas.
- Evaluación de pérdidas de estela (mantener una distancia mínima entre aerogeneradores).
- Evaluación de otras pérdidas (disponibilidad, eléctricas, etc.).
- Evaluación de producción neta.
- Evaluación de incertidumbres.
- Finalmente se obtiene la estimación de la producción esperada del parque eólico. [01]

En base a este proceso y con la idea del posible desarrollo de un parque eólico offshore en Canarias, realizaremos un estudio explicativo y diferenciador entre la ubicación en un centro eólico onshore, concretamente el del ITER en Arico, S/C de

Tenerife, y un posible emplazamiento offshore en una zona de la plataforma continental próxima a Morrojable, Fuerteventura.

Para ello, desarrollaremos a modo real, los cálculos oportunos con el fin de entender el aprovechamiento que se podría realizar de la potencia captada por un aerogenerador en dichas zonas. Utilizando como objeto de estudio un determinado aerogenerador y los regímenes del viento de ambas zonas de estudio. Con lo que obtendremos la potencia del viento del lugar, que a su vez nos proporcionará la potencia que podría suministrar un aerogenerador, y con lo que podremos llegar a una conclusión sobre la diferencia de aprovechamiento onshore y offshore.

La obtención de los datos del viento en los emplazamientos ya mencionados se ha llevado a cabo de dos formas:

- Acceso a la web oficial de Puertos del Estado, y datos oficiales aportados por el ITER, Instituto Tecnológico en Energías Renovables (Tenerife).

El Instituto Tecnológico y de Energías Renovables S.A., ITER, fue creado en 1990 por el Cabildo Insular de Tenerife para cubrir la necesidad de iniciar un nuevo campo de investigación en las islas con el que contribuir a reducir la dependencia exterior de abastecimiento energético y permitir un desarrollo más limpio y sostenible en las mismas.

- Estudio de campo, durante los meses de febrero y marzo de 2014.

Aun así, también emplearemos datos estadísticos del 2013 a la hora de expresar las conclusiones finales.

3.1.1 Regímenes de viento

Se puede definir régimen del viento como los datos compuestos por su velocidad, dirección, e intensidad en un tiempo determinado.

Estos datos, y principalmente su velocidad, son los que se necesitan para poder realizar los cálculos del aprovechamiento de la energía eólica en un determinado emplazamiento.

La dirección del viento se puede medir con un dispositivo ampliamente conocido denominado veleta. El componente fundamental de una veleta es un elemento móvil que puede girar libremente alrededor de un eje sometido a la acción del viento. Es posible medir los datos medidos mediante un transductor que transforma la información de la posición de la veleta en una señal eléctrica.

Para medir la velocidad del viento en un determinado emplazamiento, se utiliza un dispositivo denominado anemómetro. Está compuesto de varios elementos capaces de interceptar el viento, y que pueden girar alrededor de un eje, de manera que la velocidad de giro del dispositivo es proporcional a la intensidad del viento. Al igual que en el caso de la veleta, con el fin de registrar los datos medidos, se transforma dicha información en una señal eléctrica.

Para el estudio del viento en la zona de Arico, utilizamos un anemómetro de mano, y una aplicación de iPhone que nos indicaba la dirección a modo de veleta.



Imagen 3.1 Toma de datos en Arico (elaboración propia)

Mientras que para las medidas en el posible emplazamiento de Morrojable, utilizamos los datos proporcionados por el anemómetro y la veleta del buque Volcán de Tauce.



Imagen 3.2 Pantalla multifunción-Anemómetro (elaboración propia)

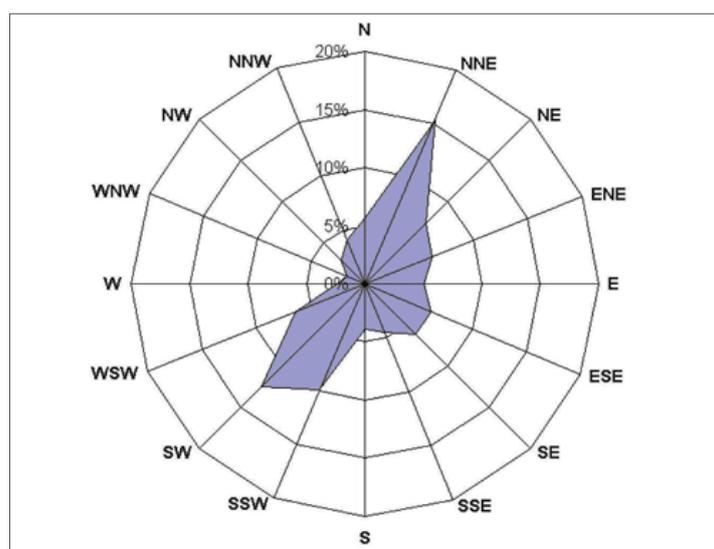
Estos datos de las medidas de velocidad y dirección del viento se deberían registrar durante largos periodos de tiempo, al menos durante la campaña de medidas.

Estos han de ser procesados para poder extraer toda la información de ellos. Dichos datos son la base para estimar la producción eléctrica del hipotético parque eólico y, a partir de ellos, su viabilidad y su potencial de rentabilidad.

Una herramienta muy valiosa para presentar la información medida es la llamada “rosa de los vientos”, Se trata de una representación gráfica de los datos de la velocidad del viento en cada dirección de espacio.

Un vistazo a uno de estos esquemas es extremadamente útil para situar aerogeneradores. Si una gran parte de la energía del viento procede de una dirección particular, lo que deseará, cuando coloque una turbina eólica en el paisaje, será encontrar la menor cantidad de obstáculos posibles en ese ángulo, así como un terreno lo más liso posible.

Otro dato que se suele aportar tras una campaña, es el número de horas en las que el viento sopla a diferentes velocidades. Pudiéndose con todos estos datos concretar la dirección a la que se debe de orientar un determinado aerogenerador. [01]



Gráfica 3.1 Rosa de los vientos [18]

3.1.2 Variación del viento con la altura.

La velocidad no se mantiene constante con la altura, a medida que se acerca al suelo, el viento es frenado por efecto del rozamiento con el mismo. Por lo que para estimar la velocidad a una determinada altura, se calculará de manera aproximada mediante métodos analíticos, utilizando una aproximación exponencial de acuerdo con la siguiente fórmula, la cual proviene de la Ley Exponencial de Hellmann: [19]

$$V(h) = V_o * (h/h_o)^p$$

Fórmula 3.1 Estimar velocidad según altura [19]

V(h)	Velocidad del viento que se desea estimar, a la altura h del suelo
V _o	Velocidad del viento conocida a la altura
h	Altura a la que se quiere estimar la velocidad del viento
h _o	Altura de referencia
p	Valor que depende de la rugosidad existente en el emplazamiento (ver cuadro)

Tabla 3.1 Descripción fórmula de estimación de velocidad según altura [19]

Para la rugosidad se emplearán valores según la siguiente tabla:

Tipo de Terreno	p
Liso (mar, arena, nieve)	0,10-0,13
Rugosidad moderada (hierba, cultivos)	0,13-0,20
Rugoso (bosques, edificaciones)	0,20-0,27
Muy rugoso (ciudades)	0,27-0,40

Tabla 3.2 Estimación del valor p para distintos terrenos [01]

Se determina que en terrenos pocos accidentados, α adquiere valores alrededor de 0,1, lo que en términos de velocidad del viento significa que la variación con la altura es muy reducida. En zonas muy escarpadas, o con muchos obstáculos, α puede alcanzar valores cercanos a 0,4, con lo que la velocidad del viento varía mucho con la altura.

Al realizar el estudio de campo, las medidas tomadas en los emplazamientos, son a menor altura que a la que se colocaría la turbina eólica, con lo que mediante la fórmula anterior realizaremos una aproximación exponencial.

Con respecto a la disponibilidad de viento en los mares y océanos de nuestro planeta, la media global a 10 m de altura en estas áreas es de 6.64 m/s, frente a los 3,28 de media sobre las grandes masas de tierra. Lo que refleja que los valores medidos sobre el mar son dos veces mayores que en tierra, lo que justifica las grandes expectativas creadas alrededor de la eólica offshore. [20] *Datos según Archer y Jacobson*

El hecho de que la producción de energía sea mayor a mayor altura, nos indica que desde un punto de vista meramente energético, los aerogeneradores han de ser lo mayores posibles y a su vez situarse lo más alto posible. Pero los aerogeneradores grandes son más caros, y también la propia instalación, el transporte, y el mantenimiento. Por lo tanto el coste final de toda la instalación también será mayor. En consecuencia, en el diseño de una instalación eólica será fundamental optimizar el sistema, encontrando un equilibrio entre elevada producción y bajos costes.

A esta variación del viento con la altura también tendremos que tener en cuenta su variación temporal, la cual da lugar a una de sus características fundamentales: su gran aleatoriedad. Destacando los periodos de tiempo estable, como el verano, que son menos propicios para la generación eólica.

3.1.3 Energía que contiene el viento.

Aproximadamente el 2% de la energía que llega del sol se transforma en energía cinética de los vientos atmosféricos. El 35% de esta energía se disipa en la capa atmosférica a tan solo un kilómetro por encima del suelo. Del resto se estima que por su aleatoriedad y dispersión solo podría ser utilizada 1/13 parte, cantidad que hubiera sido suficiente para abastecer 10 veces el consumo de energía primaria mundial del año 2002, de ahí su enorme potencial e interés.

La masa de aire en movimiento es energía cinética que puede ser transformada en energía eléctrica. Al incidir el viento sobre las palas de un aerogenerador se produce un trabajo mecánico de rotación que mueve a su vez un generador para producir electricidad. La cantidad de energía que contiene el viento antes de pasar por un rotor en movimiento depende de tres parámetros: la velocidad del viento incidente, la densidad del aire y el área barrida del rotor. [01]

Para cuantificarla empleamos la siguiente fórmula:

$$P = 1/2\rho S V^3$$

Fórmula 3.2 Potencia que contiene el viento [22]

P	Potencia en vatios (W)
ρ	Densidad del aire en kg/m ³
S	Superficie o área barrida por el rotor en m ²
V	Velocidad del viento en m/s

Tabla 3.3 Descripción fórmula de la potencia que contiene el viento [22]

3.1.4 Aprovechamiento mediante aerogeneradores

Según lo que llevamos explicado hasta el momento, para el aprovechamiento del viento tendremos que extraer la energía que contiene el mismo, lo cual se hace a través de la fórmula descrita anteriormente, que nos dice que la potencia del viento varía proporcionalmente con el cubo de la velocidad del viento, y proporcionalmente a la densidad del aire (su masa por unidad de volumen).

Pero dicha fórmula no tiene en cuenta que un aerogenerador no puede extraer toda la energía cinética del viento, puesto que el aire no se para al atravesar la turbina. Con lo que surge el coeficiente de potencia, que es la fracción de la energía del viento que una turbina convierte en la práctica en energía mecánica de rotación. La velocidad de entrada (V_1) y de salida (V_2) es diferente, se experimenta una disminución de la velocidad.

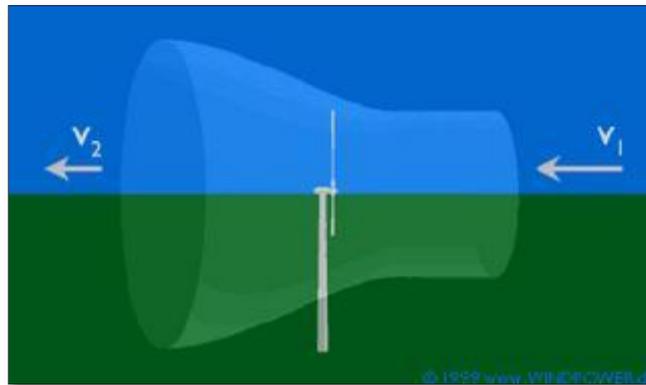


Imagen 3.3 Tubo de corriente [21]

Así la fórmula quedaría:

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Fórmula 3.3 Potencia que contiene el viento según coeficiente de potencia [22]

Para hallar el coeficiente máximo al que puede funcionar un aerogenerador se utiliza el límite de Betz. El cual expresa que existe un límite superior para la potencia eólica aprovechada, según el cual ningún aerogenerador puede extraer del viento una potencia superior a la fijada por este límite. Este valor, es el máximo valor de la potencia contenida en el tubo de corriente del aire que es capaz de extraer el rotor de una turbina. Y fue calculado teóricamente en 1919 por el físico alemán Albert Betz.

El valor real de C_p en un aerogenerador depende del diseño aerodinámico de la pala, del número de palas del rotor, de la estructura de éste, y del sistema de control de la máquina. En cualquier caso vendrá dado por $C_p \leq 0.59$.

Aun así en esta fórmula también habría que tener en cuenta que la transformación de energía cinética en eléctrica no es perfecta. Los sistemas reales nunca son ideales, tienen pérdidas e imperfecciones, y por tanto hay que considerar un factor de rendimiento al que llamaremos η y que siempre será, por definición, menor que 1 (típicamente suele valer alrededor de 0,5, es decir que el rendimiento suele estar en torno al 50%). [22]

El rendimiento vendrá dado por el desglose de la eficiencia de transmisión de los diferentes bloques (el rotor, la multiplicadora, el generador...). Siendo el elemento más ineficiente el rotor, y que además, varía mucho su valor con la velocidad específica.

Quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$P = C_p \eta \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Fórmula 3.4 Potencia que contiene el viento según coeficiente de potencia

y su rendimiento [22]

3.1.5 Curva de potencia.

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cual será la potencia eléctrica disponible en el generador a diferentes velocidades del viento. Dos velocidades características en estas curvas son:

- Velocidad de conexión
Normalmente los aerogeneradores están diseñados para empezar a girar a velocidades alrededor de 3-5 m/s. Es la llamada velocidad de conexión.
- Velocidad de corte.
El aerogenerador se programará para pararse a altas velocidades del viento, según cada modelo, para evitar posibles daños en la turbina o en sus alrededores.

Para obtener la curva de potencia, los fabricantes han de realizar una caracterización del funcionamiento en campo del equipo. Para ello, miden de manera simultánea la potencia suministrada y la velocidad del viento. Es habitual que tengan un margen de error del 10%.

Es a través de la curva de potencia y de los datos medidos de velocidad del viento en un determinado emplazamiento, como es posible estimar la producción anual de energía de un aerogenerador. Para ello, se multiplica la potencia suministrada por el aerogenerador a cada velocidad por las horas al año que el viento sopla a esa velocidad promedio.

Una mayor eficiencia técnica no es necesariamente el camino a seguir. Lo que en realidad interesa es el coste de sacar los kWh del viento durante los próximos 20 años (que es el promedio de vida de un aerogenerador). [23]

3.1.6 Datos obtenidos

Los datos obtenidos durante los meses de febrero y marzo del 2014 son los recogidos en las siguientes tablas, en donde figuran la altura de la medición h_0 (m), la velocidad a dicha altura, y la velocidad a la altura final por el índice de rugosidad correspondiente.

3.1.6.1 Arico, S/c de Tenerife

Día/ 13:00	h_0 (m)	V_0 (nudos)	V_0 (m/s)	h (m)	ρ	$V(h)$
04-feb	40	2	1,02	80	0,10-0,13	1,11
05-feb		3	1,54			1,67
06-feb		6	3,08			3,35
07-feb		13	6,68			7,28
08-feb		11	5,65			6,15
11-feb		4	2,05			2,23
12-feb		16	8,23			8,97
13-feb		12	6,17			6,72
14-feb		8	4,11			4,47
15-feb		19	9,77			10,64
18-feb		14	7,2			7,84
19-feb		19	9,77			10,64
20-feb		20	10,28			11,2
21-feb		19	9,77			10,64
22-feb		19	9,77			10,64
25-feb		19	9,77			10,64
26-feb		24	12,34			13,45
27-feb		24	12,34			13,45
28-feb		23	11,83			12,89
						141,37
Media			7,44			8,1

Tabla 3.4 Datos del viento en Arico en Febrero 2014

Día/ 13:00	h_0 (m)	V_0 (nudos)	V_0 (m/s)	h (m)	ρ	$V(h)$
01-mar	40	20	10,28	80	0,10-0,13	11,2
04-mar		23	11,83			12,89
05-mar		18	9,25			10,08
06-mar		18	9,25			10,08
07-mar		20	10,28			11,2
08-mar		17	8,74			9,52
11-mar		11	5,65			6,15
12-mar		9	4,62			5,03
13-mar		17	8,74			9,52
14-mar		17	8,74			9,52
15-mar		16	8,23			8,97
18-mar		18	9,25			10,08
19-mar		20	10,28			11,2
20-mar		20	10,28			11,2
21-mar		17	8,74			9,52
22-mar		21	10,8			11,77
25-mar		27	13,88			15,12
26-mar		20	10,28			11,2
27-mar		17	8,74			9,52
28-mar		5	2,57			2,8
29-mar	3	1,54	1,67			
			181,97			198,24
Media			8,66			9,44

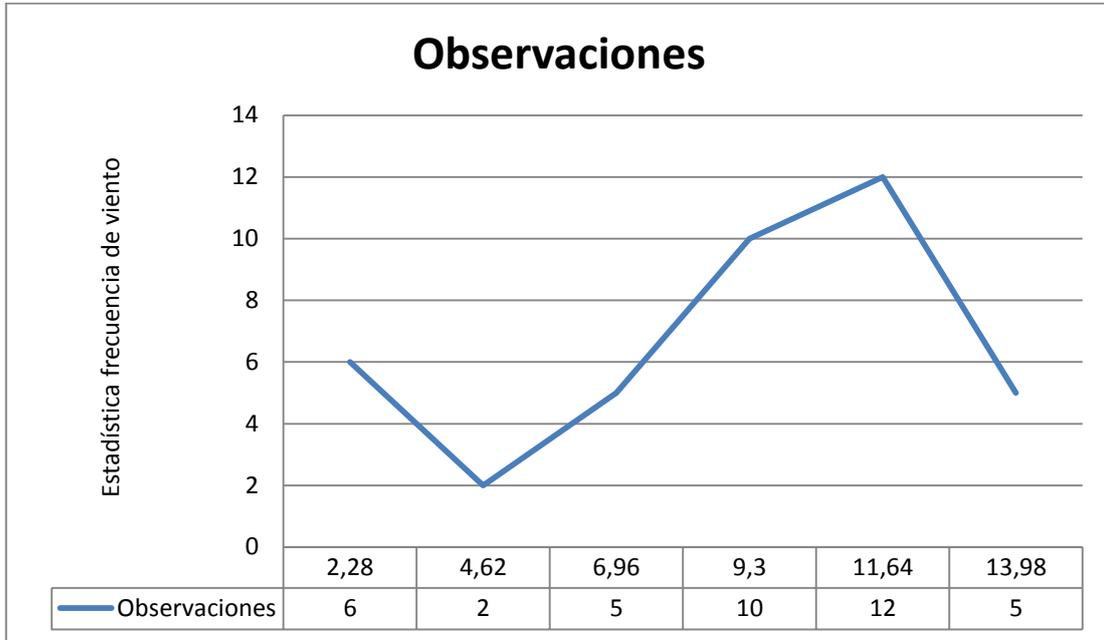
Tabla 3.5 Datos del viento en Arico en Marzo 2014

Los días de obtención de datos han venido determinados por los días en los que se pudieron recoger datos en el Volcán de Tauce a su paso por Morrojable, con la intención de que fueran a la par.

Se puede apreciar el crecimiento exponencial tras aplicar la fórmula de la Ley Exponencial de Hellmann. Dándonos unos resultados finales de media de 8,1 m/s para febrero, y de 9,44 m/s para marzo.

Si introducimos estos datos de manera estadística en una gráfica, teniendo en cuenta las velocidades de viento, y el número de veces observadas, según una división de 6 sub-intervalos, se observa que la velocidad más representativa es la de 11,64 m/s.

Aunque si realizamos la media de los datos obtenidos el resultado será de 8,77 m/s a 80 metros de altura. Siendo este último dato el que utilizaremos para los cálculos de energía aprovechable para un determinado aerogenerador.



Gráfica 3.2 Media estadística del viento en Arico

Según los datos oficiales aportados por los responsables del área de meteorología del ITER, y recogidos en la siguiente tabla, los regímenes medios de viento en los meses de febrero y marzo de 2014 son de 5,7 y 7,5 m/s respectivamente, y la media del 2013 sería de 5,92 m/s. Siendo estos datos a una altura de 10 metros, y teniendo que extrapolarlos a los 80 metros de altura del aerogenerador que utilizaremos para los cálculos. Así pues los datos finales serían de 7,46 m/s para febrero y 9,82 m/s para marzo, con una media de 8,64 m/s. Mientras que para el año completo de 2013 sería de 7,75 m/s. Todo esto se puede apreciar en las siguientes tablas, empleando una vez mas la fórmula de la Ley Exponencial de Hellmann.

MENSUAL	Vel. viento m/s	Dirección viento (º)
Month-Year	Windsonic Wind Speed Average	WindSonic Wind Direction
01-2013	6,3	68,4
02-2013	6,7	82,7
03-2013	4,5	161,1
04-2013	5,7	94,3
05-2013	6,1	75,3
06-2013	7,1	79,3
07-2013	5,6	97,6
08-2013	7,0	89,9
09-2013	5,5	98,8
10-2013	5,2	92,3
11-2013	5,3	94,5
12-2013	6,0	105,4
01-2014	5,9	109,6
02-2014	5,7	104,2
03-2014	7,5	96,3

Tabla 3.6 Velocidad y dirección del viento según datos del ITER

Mes	h_0 (m)	V_0 (m/s)	h (m)	ρ	V(h)
02/2014	10	5,7	80	0,10-0,13	7,46
03/2014	10	7,5	80	0,10-0,13	9,82
					8,64

Tabla 3.7 Medias de viento de febrero y marzo extrapoladas de 10 a 80 metros

Año	h_0 (m)	V_0 (m/s)	h (m)	ρ	V(h)
2013	10	5,7	80	0,10-0,13	7,75

Tabla 3.8 Medias de viento del 2013 extrapoladas de 10 a 80 metros

Se puede observar como las medias obtenidas en el lugar, y las aportadas por el ITER son muy parecidas; 8,1-7,46 para febrero, y 9,44-9,82 para marzo. Con respecto a la media anual del 2013 a 80 metros de altura, la velocidad sería de 7,75 m/s, no pudiendo hacer comparación alguna por nuestra parte.

Para la obtención de estos datos aportados por el ITER, contamos con la colaboración de miembros del mismo, destacando a Natalia Rodríguez Valls. La cual no sólo nos gestionó la consecución de los mismos, sino que nos realizó una visita guiada a las instalaciones.

Dicha visita fue promovida por nuestro tutor Antonio González Marrero, y a la misma acudieron diferentes compañeros de manera desinteresada.

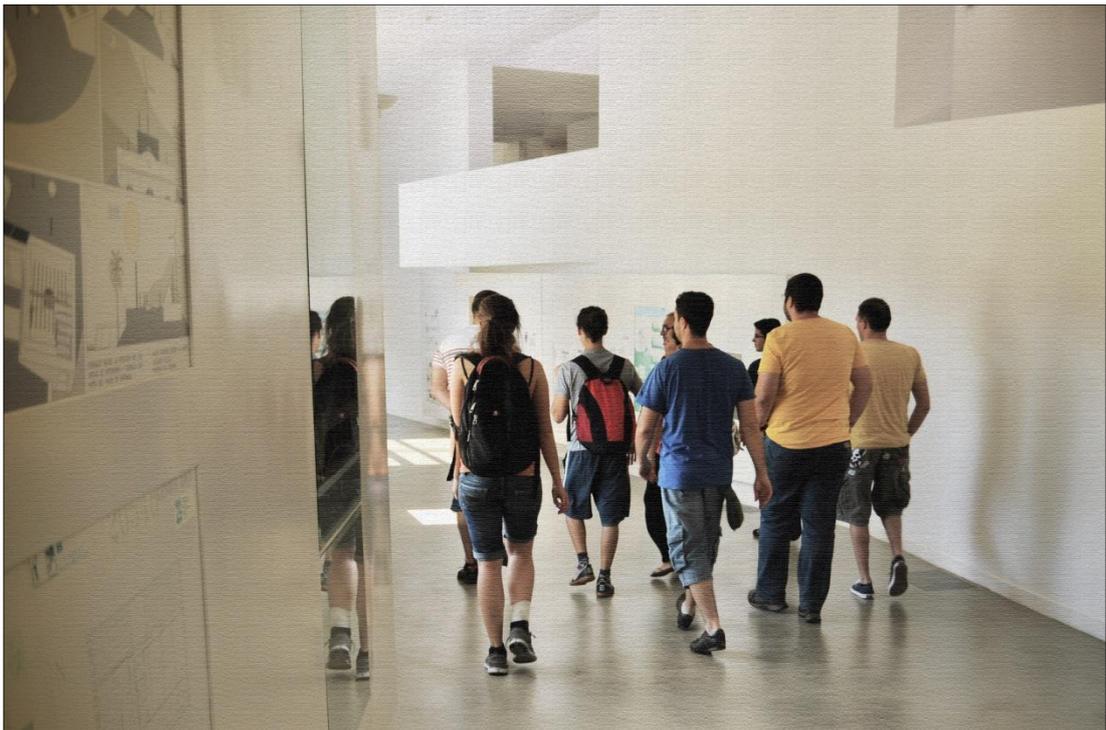


Imagen 3.4 Visita guiada al ITER



Imagen 3.5 Visita guiada al ITER

3.1.6.2 Morrojable, Fuerteventura

Estos datos de campo los hemos podido obtener gracias al anemómetro del Volcán de Tauce a su paso por unas determinadas coordenadas L: 28° 05,772' N L: 014° 10,277' W, estando a 1,651 millas náuticas de la costa, el cual nos aportaba la velocidad del viento aparente, y que hemos transformado en viento real para los cálculos.

Como se ha expuesto en el apartado de Arico, estos datos han sido obtenidos unos días en concreto, debido a que eran los días en los que el Volcán de Tauce navegaba por esa zona.

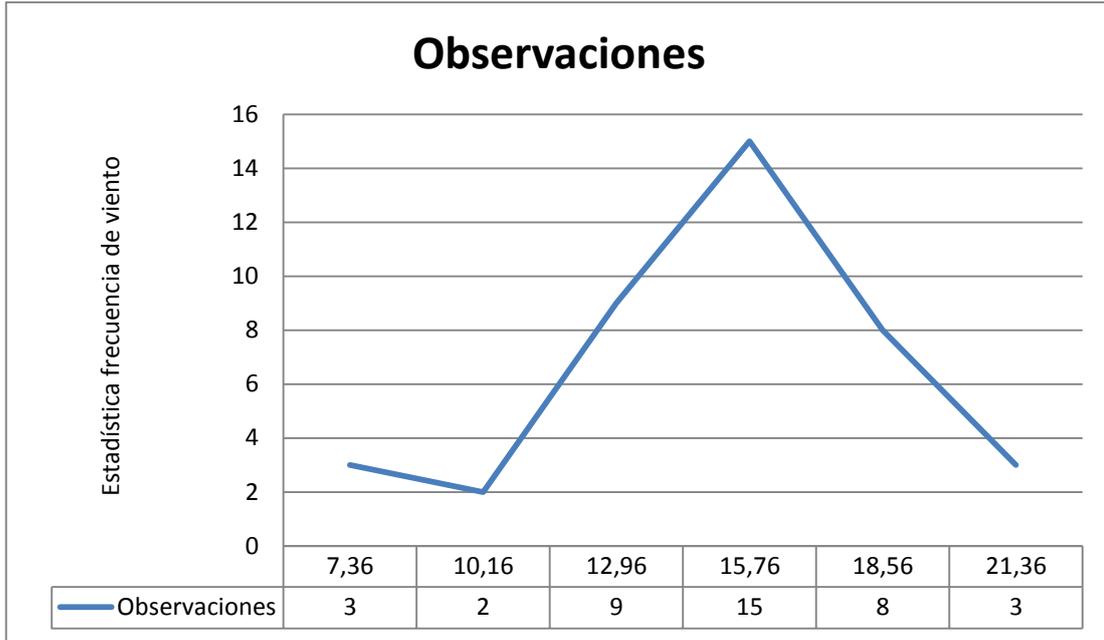
Día/ 13:00	h _o (m)	V _o (nudos)	V _o (m/s)	h (m)	ρ	V(h)
04-feb	17,95	12	6,17	80	0,10-0,13	7,15
05-feb		10	5,14			5,96
06-feb		20	10,28			11,92
07-feb		22	11,31			13,11
08-feb		21	10,8			12,52
11-feb		25	12,86			14,91
12-feb		27	13,88			16,1
13-feb		24	12,34			14,31
14-feb		20	10,28			11,92
15-feb		23	11,83			13,72
18-feb		27	13,88			16,1
19-feb		27	13,88			16,1
20-feb		30	15,43			17,89
21-feb		28	14,4			16,7
22-feb		28	14,4			16,7
25-feb		33	16,97			19,68
26-feb		36	18,51			21,47
27-feb		31	15,94			18,49
28-feb		31	15,94			18,49
			244,24			283,24
Media			12,85			14,9

Tabla 3.9 Datos del viento en Morrojable en Febrero 2014

Día/ 13:00	h_0 (m)	V_0 (nudos)	V_0 (m/s)	h (m)	ρ	$V(h)$
01-mar	17,95	20	10,28	80	0,10-0,13	11,92
04-mar		31	15,94			18,49
05-mar		38	19,54			22,66
06-mar		25	12,86			14,91
07-mar		28	14,4			16,7
08-mar		36	18,51			21,47
11-mar		26	13,37			15,5
12-mar		19	9,77			11,33
13-mar		27	13,88			16,1
14-mar		22	11,31			13,11
15-mar		26	13,37			15,5
18-mar		25	12,86			14,91
19-mar		26	13,37			15,5
20-mar		30	15,43			17,89
21-mar		32	16,46			19,09
22-mar		29	14,91			17,29
25-mar		27	13,88			16,1
26-mar		26	13,37			15,5
27-mar		22	11,31			13,11
28-mar		13	6,68			7,74
29-mar	15	7,71	8,94			
			279,21			323,76
Media			13,29			15,41

Tabla 3.10 Datos del viento en Morrojaable en Marzo 2014

Al igual que con los datos obtenidos en Arico, si introducimos estos datos de manera estadística en una gráfica, teniendo en cuenta las velocidades de viento, y el número de veces observadas, según una división de 6 sub-intervalos, se observa que la velocidad más representativa es la de 15,76 m/s. Aunque si realizamos la media de los datos obtenidos el resultado será de 15,15 m/s a 80 metros de altura. Siendo este último dato el que utilizaremos para los cálculos de energía aprovechable para un determinado aerogenerador.



Gráfica 3.3 Media estadística del viento en Morrojable

A través de la página web de Puertos del Estado, y su estación meteorológica WANA-1024012 obtenemos los valores para febrero de 14,7 m/s y para marzo de 12,5 m/s para 2014. Siendo estos datos a 10 metros de altura, lo cual quiere decir que nuevamente, como pasó con los datos aportados por el ITER, habrá que extrapolarlos a 80 metros.

Mes/Month	Vm Max./Max. Vm	Dir
Enero/January	17.8	31
Febrero/February	14.7	356
Marzo/March	12.5	36
Abril/April	11.7	231

Tabla 3.11 Datos del viento 2014 [24]

Para 2013, en estos mismos meses, Puertos del Estado nos aporta la media de 13,7 m/s y 18,5 m/s respectivamente. Saliendo una media anual de 12,85 m/s. A su vez en la tabla se puede observar como los regímenes son más altos en los meses de invierno.

Mes/Month	Vm Max./Max. Vm	Dir
Enero/January	13.3	36
Febrero/February	13.7	52
Marzo/March	18.5	220
Abril/April	12.2	303
Mayo/May	11.7	42
Junio/June	11.2	42
Julio/July	10.0	42
Agosto/August	13.0	39
Septiembre/September	11.0	40
Octubre/October	13.4	36
Noviembre/November	11.8	97
Diciembre/December	14.4	31

Tabla 3.12 Datos del viento 2013 [24]

Mes	h_0 (m)	V_0 (m/s)	h (m)	ρ	V(h)
02/2014	10	14,7	80	0,10-0,13	18,09
03/2014	10	12,5	80	0,10-0,13	15,38
					16,73

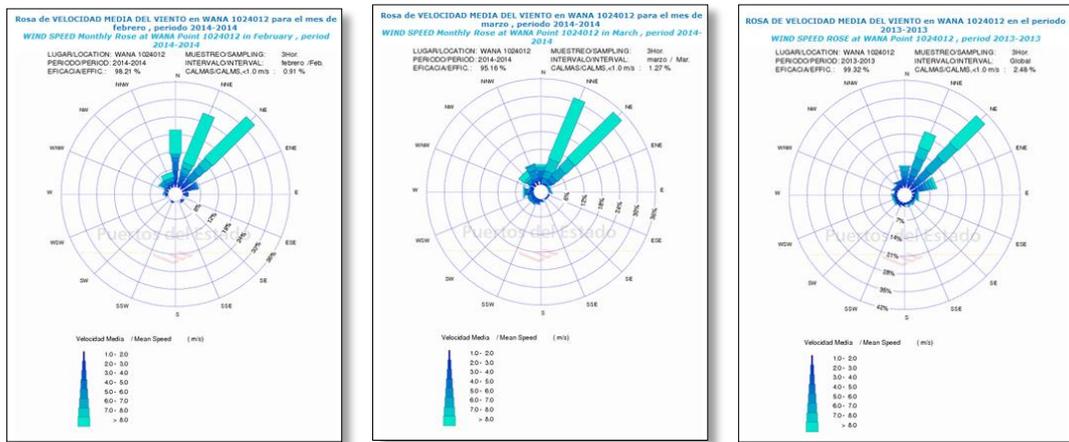
Tabla 3.13 Medias de viento de febrero y marzo extrapoladas de 10 a 80 metros

Año	h_0 (m)	V_0 (m/s)	h (m)	ρ	V(h)
2013	10	12,85	80	0,10-0,13	15,82

Tabla 3.14 Medias de viento del 2013 extrapoladas de 10 a 80 metros

Se puede observar como las medias obtenidas en el lugar, y las aportadas por la Web Puertos del Estado no son tan próximas para el mes de febrero; 14,9-18,09 m/s. Mientras que para el mes de marzo sí lo son; 15,41-15,38 m/s. La media entre estos dos meses sería de 16,73 m/s. Con respecto a la media anual del 2013 a 80 metros de altura, la velocidad sería de 15,82 m/s, no pudiendo hacer comparación alguna por nuestra parte.

Las rosas de los vientos correspondientes a dichos meses del 2014, y al año entero del 2013 son las siguientes:



Gráfica 3.4 Rosa los vientos febrero y marzo 2014, y 2013 en su conjunto [24]

3.1.7 Aerogenerador

Para el estudio que vamos a realizar utilizaremos el modelo Gamesa G-128 5.0 MW Off-shore, siendo esta la elección por ser el aerogenerador instalado en 2013 en Arinaga, Gran Canaria.

Las especificaciones técnicas del mismo, y que utilizaremos para los cálculos son las que aparecen en la imagen adjunta.

G128-5.0 MW Offshore			
ROTOR		MULTIPLICADORA	
Diámetro	128 m	Tipo	2 etapas planetarias
Área de barrido	12.868 m ²	Ratio	1:41,405
PALAS		GENERADOR	
Número de palas	3	Tipo	Generador síncrono de imanes permanentes con módulos independientes paralelos
Longitud	62,5 m	Potencia nominal	5.000 kW
Material	Composite de matriz orgánica reforzado con fibra de vidrio/ fibra de carbono	Tensión	690 V AC
TORRE		Frecuencia	50 - 60 Hz
Tipo	Acero	Clase de protección	IP 54
Altura	80-94 m + según proyecto	Velocidad de giro	490 rpm
		Factor de potencia	0.9 CAP - 0.9 IND*

* Medición en los terminales de salida del generador, en el lado de baja tensión antes del transformador, a la tensión nominal de la red.

Tabla 3.15 Características Gamesa G-128 5.0 MW Off-shore [25]

En la curva de potencia de este modelo se puede observar que a partir de unos 12-13 m/s de velocidad de viento, el aerogenerador llega al máximo que es capaz de suministrar, y donde entran a actuar los automatismos de control de potencia para la minimización de esfuerzos en los sistemas mecánicos y el aprovechamiento de la

máxima potencia del aerogenerador. A partir de esta franja y hasta los 17-18 el aerogenerador será capaz de suministrar el máximo para lo que está diseñado. [25]



Gráfica 3.5 Curva de potencia Gamesa G-128 5.0 MW Off-shore [25]

3.1.8 Cálculos

El cálculo de la potencia suministrada por un modelo concreto de aerogenerador y en una zona determinada, se calcula mediante la fórmula $P = C_p \eta \frac{1}{2} \rho S V^3$, explicada con anterioridad.

Para ello utilizaremos:

- Las medias de los vientos resumidas en la siguiente tabla:

	Arico	ITER	V.Tauce	P.Estado
02/2014	8,1	7,46	14,9	18,09
03/2014	9,44	9,82	15,41	15,38
Media	8,77	8,64	15,15	16,73

	ITER	P. Estado
Media 2013	7,75	15,82

Tabla 3.16 Resumen medias de viento (m/s)

- $C_p = 0,59$
- $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$ onshore, y $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ offshore.

En cuanto a la densidad elegida, a nivel del mar, a una presión de 1.013 milibares y a una temperatura de 15°, es de 1,225 por cada metro cúbico, y por ello es la que utilizaremos para los cálculos offshore. Mientras que la ρ en función de las condiciones atmosféricas en tierra suele oscilar entre 1,33 kg/m^3 en invierno y

1,15 kg/m³ en verano, con un valor medio en torno a 1,23 kg/m³, que será el que tomemos para los cálculos onshore.

- El rendimiento η que utilizaremos será el de 0,50 que es la media típica en los aerogeneradores

Así los cálculos finales, expresados en kW, quedarían de la siguiente manera:

	CP	η	ρ	S	V ³	Potencial/2
8,77	0,59	0,50	1,23	12868	674,5	1575
8,64	0,59	0,50	1,23	12868	644,9	1505
7,75	0,59	0,50	1,23	12868	465,5	1087
15,15	0,59	0,50	1,22	12868	3477,3	8052
16,73	0,59	0,50	1,22	12868	4682,6	10843
15,82	0,59	0,50	1,22	12868	3959,3	9168

Tabla 3.17 Cálculos potencia suministrada

Una lectura correcta de estos cálculos nos aporta dos conclusiones a simple vista:

- La potencia kW obtenida no corresponden con la expresada según la curva de potencia aportada por el fabricante. Esto es debido a que la potencia estimada en las curvas es a plena carga.
- Para las medidas de Morrojable los kW que se pueden generar son superiores a los que puede suministrar el aerogenerador, ya que su máximo es de 5000 kW.

Tomando como referencia los cálculos del año 2013 podemos decir que este modelo de aerogenerador se quedaría grande para unas supuestas instalaciones en Arico, ya que su potencial medio sería de 1087 kW, cuando tiene capacidad para 5000 kW. Mientras que para una posible instalación offshore en Morrojable su potencial sería óptimo porque podría producir los 5000 kW para los que está preparado el aerogenerador.

Tema aparte sería, como se ha comentado anteriormente, que para el cálculo de aprovechamiento de energía anual se tendría que calcular la potencia suministrada por el aerogenerador a cada velocidad por las horas al año que el viento sopla a esa velocidad promedio.

3.2 Undimotriz

3.2.1 Medición energía de una ola

La capacidad energética de un frente de ola se mide en densidad de energía por metro de frente y su valor varía de unas localizaciones a otras y ese potencial depende de la altura de ola y se atenúa con la profundidad del agua como consecuencia del rozamiento de ésta con el fondo. Esta fuente energética no está cuantificada con exactitud, oscilando la estimación según la fuente entre los 2.000 GW y los 4.000 GW, por lo que repartiendo estos valores entre los 336.000 km de costa existentes en el mundo se obtiene un valor medio de densidad energética de las olas por metro de costa de 8,0 kW, aunque esta distribución dista mucho de ser igualitaria ya que hay zonas de costa, como es el caso de Australia o Nueva Zelanda, donde se puede alcanzar los 100 kW/m frente a otros lugares donde solo hay 5 kW/m. En Europa este recurso se encuentra mayoritariamente en la Costa Atlántica y oscila entre los 30 kW/m y los 75 kW/m según cuál sea la localización.

Debe ponerse además de manifiesto que si bien el potencial disponible de la fuente es inmenso, la capacidad tecnológica existente en el presente no permite aprovechar más de un 2% del mismo. [26]

A los efectos de poder evaluar en forma rápida la potencia de un sistema costero se puede aplicar la ecuación de potencia por metro de onda, donde H es la altura y T el periodo.

$$P = H^2 T$$

Fórmula 3.5 Potencia de ola por metro cuadrado [27]

3.2.2 Aprovechamiento mediante convertidores

El movimiento de las olas puede convertirse en energía mecánica y luego en energía eléctrica usando sistemas apropiados. Existen alrededor de cuarenta mecanismos para explotar la energía de las olas, pero nos centraremos en explicar el funcionamiento de uno de los que más rendimiento produce, el Pelamis, y el que está proyectado instalar entre Tenerife y Lanzarote, el Robusto.

El sistema Pelamis

Este sistema de obtención de energía está diseñado más desde el punto de vista de resistencia a las condiciones marinas que para obtener la más eficiente conversión de energía posible. Por tanto, en vez de intentar absorber toda la energía disponible en cada ola, convierte solo una porción. El objetivo es que el sistema pueda sobrevivir casi sin mantenimiento en condiciones meteorológicas marinas muy adversas (tormentas, ciclones) que podrían dañar un sistema optimizado solamente para la eficiencia de conversión.

Consiste en una serie de secciones cilíndricas parcialmente sumergidas, unidas por juntas bisagra. La ola induce un movimiento relativo entre dichas secciones, activando un sistema hidráulico interior que bombea aceite a alta presión a través de un sistema de motores hidráulicos, equilibrándose con el contenido unos acumuladores.



Imagen 3.6 Sistema Pelamis [28]

Los motores hidráulicos están acoplados a un generador eléctrico para producir electricidad. Se estima que la cantidad de energía obtenida por 30 de estos sistemas, podría abastecer aproximadamente 20.000 hogares con un consumo medio europeo.

La estructura articulada mide 150 metros de longitud por 3,5 metros de diámetro. Albergando a su vez tres generadores independientes de 250 KW, de modo que cada estructura produce 750 KW.

La potencia de todos los sistemas hidráulicos de un elemento se transportan mediante un sólo cable a una base situada en el lecho oceánico. Varios elementos se pueden interconectar a una misma base para unir su potencia de generación y trasladar la energía producida mediante un sólo cable submarino hacia la costa. [29]

La potencia real que puede aprovechar vendrá dada por la siguiente tabla, la cual se basa en los metros de ola y el periodo en segundos de la misma.

		Tpow (seconds)																	
		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	
Hsig (metres)	0.5	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	
	1.0	idle	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	idle	idle	idle	
	1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2.0	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3.0	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3.5	-	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180	
	4.0	-	-	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4.5	-	-	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5.0	-	-	-	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5.5	-	-	-	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355	
	6.0	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415	
	6.5	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	
	7.0	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7.5	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8.0	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Tabla 3.18 Tabla de potencia Pelamis [30]

El convertidor de energía de las olas Pelamis es un ejemplo de tecnología emergente que usa el movimiento del oleaje oceánico, para crear electricidad.

El sistema Robusto

Este sistema se encuentra en fase experimental por parte de Langlee, compañía noruego-española que ha patentado el sistema.

Langlee ha decidido apostar por Canarias como mercado inicial por varios motivos: posee unas condiciones de olaje estables, una industria naval desarrollada y uno de los costes energéticos más caros de Europa. Después de este primer proyecto piloto, la compañía prevé dar el salto internacional.

El sistema está provisto de dos aletas verticales que oscilan con el movimiento de las olas. Este sistema utiliza el movimiento horizontal de las olas, que posee mas energía y es más fácil de convertir en energía aprovechable que el movimiento vertical.

Las aletas están directamente conectadas a generadores eléctricos que convierten el movimiento de las olas en electricidad. Estos generadores se controlan mediante tecnología avanzada para evitar sobrecargas, tanto en la estructura de acero como en los restantes componentes.

Los generadores se conectan a la red de distribución terrestre mediante un cable submarino. [31]

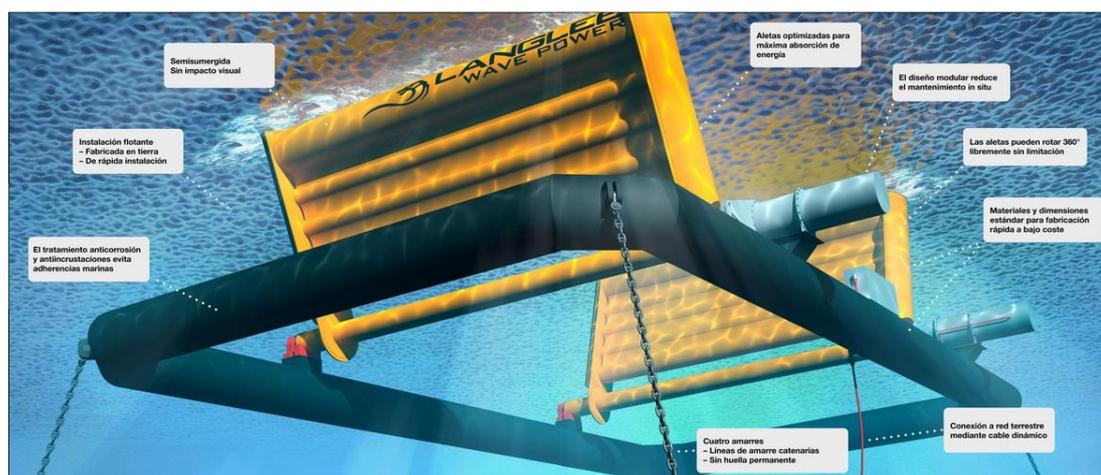


Imagen 3.7 Sistema Robusto [31]

Su diseño sencillo y con pocas piezas móviles hace que los costes de fabricación y mantenimiento sean reducidos. De bajo coste y de fácil mantenimiento, con unas dimensiones de 30×50 metros y una potencia de 132 kW, resulta muy competitivo con la energía eólica y la solar. Además, el convertidor eléctrico “Robusto” se encuentra sumergido, de manera que no es visible desde la costa. En la actualidad, los dispositivos similares que existen en el mundo solo se dedican a la investigación y son boyas o columnas batientes.

Se estima que un parque de energía undimotriz Robusto de 1 MW podría generar una producción de electricidad de 4,4 GWh al año. [31]

La potencia real que puede aprovechar vendrá dada por la siguiente tabla, la cual se basa en los metros de ola y el periodo en segundos de la misma.

$\begin{matrix} T_p \\ H_s \end{matrix}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,5	2	6	11	13	12	9	7	5	3	2	2
1	6	25	48	57	51	38	30	20	13	9	8
1,5	13	58	118	132	132	102	82	52	33	22	16
2	22	90	132	132	132	132	132	90	60	42	33
2,5	33	131	132	132	132	132	132	132	94	69	56
3	45	132	132	132	132	132	132	132	132	99	79
3,5	54	132	132	132	132	132	132	132	132	132	104
4	57	132	132	132	132	132	132	132	132	132	127

Tabla 3.19 Tabla de potencia Robusto [31]

3.2.3 Datos obtenidos

Según la Web Puertos del Estado y su estación meteorológica WANA 1024012 la Tabla anual para el 2013 de la altura-periodo sería la siguiente:

EFICACIA: 39.89% AÑO/YEAR: 2014		Tp (s)											
		<=1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	>10.0	TOTAL
Hs (m)	<=0.5	---	---	0.086	0.086	0.429	0.773	1.717	0.601	0.429	---	2.403	6.524
	1.0	---	---	---	1.717	4.635	5.236	9.099	7.296	2.232	0.944	11.073	42.232
	1.5	---	---	---	0.086	2.661	5.322	4.034	4.464	3.691	0.172	2.318	22.747
	2.0	---	---	---	---	0.086	1.373	3.519	4.292	5.665	2.833	0.773	18.541
	2.5	---	---	---	---	---	---	0.343	0.944	2.575	2.060	1.631	7.554
	3.0	---	---	---	---	---	---	---	0.086	0.429	0.515	0.601	1.631
	3.5	---	---	---	---	---	---	---	---	0.086	0.258	---	0.343
	4.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.086	0.172	0.258
	4.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.172	0.172
	5.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.000
	> 5.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.000
	TOTAL	---	---	0.086	1.888	7.811	12.704	18.712	17.682	15.107	6.867	19.142	100%

Tabla 3.20 Datos de olas según altura y periodo [24]

Esta tabla junto con la de la potencia del Pelamis ya nos deja entrever que este no es un sistema adecuado para el estudio que estamos realizando, ya que según ésta se podría ver que la altura y el periodo medio podría oscilar entre los 1-2 metros y 7 segundos de periodo, y si entramos con estos datos en la tabla de potencia del convertidor Pelamis observamos que sólo podría generar unos 147 kWh de los 750 kWh para los que está diseñado.

Sin embargo si entramos con estos mismos datos en la tabla del Robusto nos da que podría generar de media los 132 kW para los que está diseñado.

De hecho la compañía Langlee vende el producto a Canarias como que podrá aprovechar 4400 horas al año, lo que es más o menos la mitad de horas que tiene un año natural.

3.3 Estimaciones

Según el informe anual de la economía Canaria, llevado a cabo por la confederación Canaria de Empresarios, la energía eléctrica disponible por islas es la que figura en la siguiente tabla.

ENERGÍA ELÉCTRICA DISPONIBLE POR ISLAS. 2007-2012 (MWh)						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
GRAN CANARIA	3.666.446	3.706.344	3.628.925	3.559.635	3.515.306	3.496.079
TENERIFE	3.643.854	3.805.075	3.637.550	3.528.598	3.506.169	3.547.732
LA PALMA	262.749	268.096	266.205	252.203	254.494	260.660
LA GOMERA	67.691	70.032	69.087	71.431	71.297	72.058
EL HIERRO	39.719	41.461	41.028	40.687	43.004	43.601
FUERTEVENTURA	671.395	669.221	629.226	613.823	639.889	633.997
LANZAROTE	863.648	866.803	834.627	843.707	837.431	833.209
TOTAL	9.215.502	9.427.032	9.106.647	8.910.083	8.867.589	8.887.336

Tabla 3.21 Energía eléctrica disponible por islas [32]

Esta energía eléctrica disponible es la variable que engloba el total de los recursos energéticos dispuestos para atender la demanda. Está compuesta de la producción obtenida mediante fuentes convencionales, más la energía adquirida por las energías renovables, menos las pérdidas sufridas en la distribución. [32]

Teniendo en cuenta estos datos en MWh, se puede estimar que situando un parque eólico en Morrojable, con un total de 40 aerogeneradores que produjesen una cantidad equivalente de 5000 kW durante 9 horas al día los 365 días del año, tendríamos un aprovechamiento de 657.000 MWh, que cubriría todo el consumo de la isla de Fuerteventura durante un año. O casi el consumo total de las islas de La Palma, La Gomera, y el Hierro juntas.

Comentar que se habla de energía eléctrica disponible, no del consumo neto, siendo este último dato el consumo real por islas, y que es menor que la energía disponible.

Es evidente que resulta ser un dato interesante, abastecer a toda una isla mediante energía eólica y solo 40 aerogeneradores, sobre todo teniendo en cuenta que los regímenes de viento en alta mar son más constantes que en tierra.

Pero el problema viene con las políticas actuales que tiene su pilar en la Ley del Sector Eléctrico de 1997, y su normativa de desarrollo, donde se establece los actuales niveles de retribución. Por muchos MWh que se generen, sólo se pueden inyectar a la red un %. Con lo que la idea de generar tantos MWh en ese supuesto parque de 40 aerogeneradores se presenta a día de hoy como una utopía.

Sin embargo se puede estimar que una planta de energía undimotriz como la de Langlee Robusto con una generación de 4,4 GWh al año sí podría tener un desarrollo óptimo dentro de las políticas actuales. Entendiendo que el % que se suministraría a la red sólo representaría un pequeño porcentaje de la energía eléctrica disponible. Pudiendo representar el consumo de una pequeña población.

Conclusiones

Las energías renovables offshore poseen un gran potencial de explotación y de desarrollo tecnológico, pero que necesitan de un mayor apoyo institucional para su desarrollo. Las limitaciones impuestas desde el gobierno impiden que muchas ideas no pasen de prototipos.

En base a lo expuesto se aprecia que mediante una toma exhaustiva de datos se podría llegar a la determinación de la viabilidad de implantar algún campo eólico o planta undimotriz en la plataforma continental de Canarias. Los regímenes de viento, el doble en alta mar, y la altura-periodo de las olas, resultarían óptimos hasta el punto de poder llegar a abastecer a toda una isla con algo más de 100 mil habitantes, y de cubrir todas las necesidades energéticas de las que depende. Esto representaría entre un 7% u 8% del consumo neto de las Islas.

La eólica se encuentra en una fase muy desarrollada, y nuevos campos de actuación solo vendrían en base a aumentar la capacidad de MWh generados. Mientras que la undimotriz todavía se encuentra en una etapa de desarrollo, los convertidores son complejos, caros y aún no competitivos con los métodos de generación tradicionales. No es tiempo de reparar en costes sino en recurso, tal como exige la demanda actual.

La posible potenciación de estas energías offshore en Canarias traería consigo un tipo de navegación especializada en la instalación y mantenimiento de los aerogeneradores y convertidores. Este tipo de embarcaciones podrían ser desde remolcadores acimutales hasta windcarriers, creando nuevos puestos de trabajo en el mundo marítimo, y una salida laboral para los estudiantes de la Escuela Náutica y Transporte Marítimo de Tenerife.

Las energías renovables no deberían ser diseñadas para ahorrar dinero, sino para salvar el mundo.

Bibliografía

- [01] CEER. Centro de estudios de energías renovables. Curso energía eólica
<http://www.cursosenergiasrenovables.net/>
- [02] PDF: Energía eólica marina en España. Febrero 2012. CCOO
- [03] Instituto para la diversificación y ahorro de la energía.
<http://atlaseolico.idae.es/meteosim/>
- [04] Instituto para la diversificación y ahorro de energía. Imagen
http://atlaseolico.idae.es/inc/get_map.php?pdf=spd80_es-ic
- [05] Parque eólico de Horns Rev. Imagen.
<http://conbotassucias.wordpress.com/2013/04/10/parque-eolico-de-horns-rev/>
- [06] Energía undimotriz: El aprovechamiento de la fuerza de las olas. Julio González
Noviembre 2009.
<http://www.fierasdelaingenieria.com/energia-undimotriz-el-aprovechamiento-de-la-fuerza-de-las-olas/>
- [07] Central Undimotriz de Motrico. Web “Wikipedia”
http://es.wikipedia.org/wiki/Central_undimotriz_de_Motrico
- [08] Canarias, pionera en la generación de energía undimotriz. Diario de Avisos
31 Enero 2014
<http://icoddelosvinos.diariodeavisos.com/2014/01/31/canarias-pionera-en-la-generacion-de-energia-undimotriz-a-nivel-mundial/>

- [09] Energía eólica: los aerogeneradores. Web “Electricidad gratuita”
<http://www.electricidad-gratuita.com/energia-eolica.html>
- [10] El molino y sus partes. Noviembre 2004
<http://www.scpl.coop/index.php?page=ver&nid=117>
- [11] Ente Vasco de la energía. La energía eólica. Imagen.
<http://www2.eve.es/web/Energias-Renovables/productos/Infografias/La-Energia-Eolica/La-Energia-Eolica-A.aspx>
- [12] Energía eólica. 28 marzo 2009. Imagen.
<http://energiasrenovables.wordpress.com/about/page/2/>
- [13] Energías alternativas. Inauguran el London Array, el parque eólico marino más grande del mundo. Web “Afinidad Eléctrica”
<http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=265>
- [14] Parque eólico offshore London Array. Imagen.
http://www.greenreport.it/_archivio2011/index.php?page=default&id=18595&cat=
- [15] Biblioteca de Ingeniería. Universidad de Sevilla
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70175/fichero/1_CapituloI.pdf
- [16] Tecnología undimotriz: energía de las olas. Alex Fernández Muerza.
20 octubre 2008
http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2008/10/20/180854.php
- [17] El parque de energía undimotriz más grande del mundo. 9 enero 2014
<http://www.habitatsustentable.com/?p=1121>
- [18] Asociación eólica de Galicia. Rosa de los vientos. Imagen

- <http://www.egaasociacioneolicagalicia.es/es/elvientoengalicia/larosadelosvientos.php>
- [19] Energía eólica. El viento y sus características.
<http://www.soloenergia.com.ar/aprendamas/energieolica/principios.html>
- [20] American Geophysical Union. Archer and Jacobson: evaluation of global wind power. 2005
<http://www.stanford.edu/group/efmh/winds/2004jd005462.pdf>
- [21] Danish Wind Industry Association. Web windpower.org Imagen
http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/tube.htm
- [22] Introducción a la teoría de las turbinas eólicas. Manuel Franquesa Voneschen. 2009
http://www.amics21.com/laveritat/introduccion_teorias_turbinas_eolicas.pdf
- [23] Danish Wind Industry Association. Web windpower.org
http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/cp.htm
- [24] Puertos del Estado
http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html
- [25] Aerogenerador Gamesa G-128 5.0 MW Off-shore
<http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos/servicios/aerogeneradores/catalogo-offshore.pdf>
- [26] Energía undimotriz: un inmenso potencial aún por desarrollar 29 octubre 2012
<http://www.interempresas.net/Energia/Articulos/101717-Energia-undimotriz-un-inmenso-potencial-aun-por-desarrollar.html>

- [27] Aprovechamiento energía undimotriz. Facultad Buenos Aires
www.apiperu.com.pe/argentina/trabajos/ECC_039_Pelissero_M_.pdf
- [28] Sistema Pelamis. Imagen
<http://www.schaeffler-annual-report.com/energy-chain/>
- [29] Energías alternativas. Pelamis: Una serpiente marina robótica que genera energía eléctrica
<http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=170>
- [30] Pelamis wec - conclusion of primary r&d. Power Matrix
<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.dti.gov.uk/renewables/publications/pdfs/v00181.pdf>
- [31] Sistema Langlee Robusto
<http://www.langleewavepower.com/e-folleto/>
- [32] Informe Anual de la Economía Canaria. PDF
<http://www.ccelpa.org/informe-anual/IA2012/conclusiones.pdf>