

4 Sistemas de generación

4.1 Introducción

Un sistema unitario de generación consiste en un bloque compuesto por un mecanismo que capte el movimiento existente en el oleaje, posteriormente lo transmita a un sistema de conversión, siendo éste último quien lo transforme en energía mecánica. Esta energía mecánica es la que finalmente sirve de entrada a una máquina eléctrica que la convierte en energía eléctrica.

El sistema de generación dentro de un parque de energía undimotriz es un elemento crucial debido a dos motivos. En primer lugar, por ser el agente que físicamente convierte la energía mecánica entrante en energía eléctrica y segundo por influir directamente en la apartamentación eléctrica necesaria tanto en el parque como en los propios dispositivos, así como en el dimensionamiento de los mismos.

Este capítulo del Proyecto se centrará en la parte eléctrica del sistema unitario de generación, principalmente estará enfocado en la máquina eléctrica necesaria para producir la generación.

La elección de un tipo de generador viene determinada por factores como pueden ser el recurso, la inversión inicial, la eficiencia, fiabilidad, posibilidades de control, electrónica de potencia asociada, el sistema de transmisión empleado y necesidades de la red. Por tanto no es una decisión rápida sino que conlleva el estudio de muchos aspectos.

Un hecho importante a destacar es que en la entrada a nuestro sistema de generación se encuentra un recurso de naturaleza oscilante y aleatoria. Este recurso se caracteriza, como se explicó en el Capítulo 2, por su altura y periodo predominante en cada localización. Esto hace que sea necesario escoger entre un abanico de tecnologías cada una adaptada a unas condiciones específicas.

Y además entre los dispositivos de generación eléctrica nos encontramos, a grandes rasgos, con tres familias de máquinas eléctricas. Entre estas máquinas se pueden distinguir los generadores síncronos y asíncronos, ambos rotativos, y los lineales, de especial utilidad en dispositivos con un PTO de accionamiento directo.

De forma general, los requisitos básicos exigibles a una máquina de generación eléctrica en aplicaciones marinas son:

- Simpleza
- Fiabilidad
- Posibilidad de operar a velocidad variable
- Mínimos requisitos de mantenimiento

Para abordar este capítulo es necesario comenzar haciendo un análisis de los convertidores de electrónica de potencia y de los elementos que los componen. Los cuales estarán vinculados a las máquinas de generación y serán presentados como un bloque común.

Posteriormente, se describirán las diferentes máquinas de generación empleadas en la generación undimotriz, mostrando además diferentes aplicaciones en dispositivos existentes.

Al final del capítulo, se presentarán cuestiones relacionadas con la agrupación de dispositivos dentro de un parque de generación undimotriz, como son el efecto de suavización o alternativas posibles en la conexión de los dispositivos para la evacuación de la energía.

4.2 Convertidores de electrónica de potencia

La electrónica de potencia es un elemento fundamental en aplicaciones de energías renovables, empleándose a modo de interfaz entre el generador y la red. Dicha interfaz posibilita entre otras cosas el transporte en alta tensión en corriente continua (en inglés Direct Current, DC) en vez de corriente alterna (Alternate Current, AC), la compensación de reactiva y también la mejora y adecuación de la señal de salida a las necesidades requeridas por la red.

Otra de las aplicaciones principales de la electrónica de potencia es habilitar las operaciones de los generadores a velocidad variable, en los cuales la frecuencia de rotación de la máquina, y por tanto de la señal de generación, no coincide con la propia de la red, por lo que no es posible inyectarla directamente a red el generador no puede inyectar directamente a la red ya que su frecuencia de rotación, y por tanto la de la señal generada, no estaría en sincronismo con la frecuencia de la red. En estos casos los convertidores pueden sincronizar tales frecuencias para su conexión.

Dentro de la gama de dispositivos de conmutación, existen tres componentes básicos con los que formar estos convertidores electrónicos de potencia. El componente más elemental es el diodo, donde su conmutación es incontrolada y se realiza automáticamente, alternándose conforme oscila la polaridad en la tensión aplicada al elemento. Otro elemento es el tiristor, que consiste en un dispositivo de conmutación en el cual el momento de conducción puede ser controlado pero no el momento de extinción de tal conducción, por lo que, este tipo de dispositivo se denomina "conmutado por la red". Y finalmente, el Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT, cuya característica principal es que tanto el momento de conducción como el de extinción pueden ser controlados mediante una señal de control, y estos dispositivos son denominados "autoconmutados". Esta característica hace que puedan trabajar a mayores frecuencias de conmutación que los tiristores, por lo que se obtiene una menor distorsión por armónicos y mayor control de potencia reactiva, sin embargo generan mayores pérdidas.

Los principales convertidores de electrónica de potencia utilizados son:

- Rectificadores (convertidores AC/DC): donde un flujo de potencia en AC, con una tensión, frecuencia y un número de fases dados, es transformado a una señal en DC a una amplitud y polaridad determinada.
- Inversores (convertidores DC/AC): este tipo de convertidor transforma la señal en DC de una amplitud y polaridad dada a AC a una tensión, frecuencia y número de fases determinado.
- Convertidor - Fuente de Intensidad (Current Source Converter, CSC) y Convertidor - Fuente de Tensión (Voltage Source Converter, VSC): ambos se componen de otros dos convertidores, uno del tipo AC/DC y el siguiente del tipo DC/AC, dispuestos los dos de forma back-to-back, de este modo ambos se encuentran acoplados mediante un circuito DC intermedio. Finalmente, este dispositivo resulta en un convertidor completo AC/AC, que puede trabajar con una tensión impuesta (convertidor-fuente de tensión), o con una corriente impuesta (convertidor-fuente de intensidad). De

forma general, el CSC está formado por tiristores y el VSC está formado por IGBTs como elementos de conmutación.

- Choppers (convertidor DC/DC): este equipo convierte una señal de corriente continua con una tensión y polaridad dada en otra señal de corriente continua a otra tensión y polaridad determinada.

Otro tipo de clasificación en los convertidores de potencia depende del ratio tensión de salida/tensión de entrada. Por el cual si el ratio es mayor que la unidad se trata de un convertidor boost (step-up), y en el caso de que el ratio sea menor que la unidad se denomina convertidor Buck (step-down). Existen incluso circuitos específicos que son capaces de funcionar en ambos modos de operación, llamándose entonces buck-boost.

4.3 Generador eléctrico rotativo

A lo largo de la historia se han desarrollado diferentes tipos de máquinas de generación, donde los generadores rotativos han sido los utilizados de forma convencional en los sistemas de generación.

Para la generación undimotriz, han sido desarrolladas múltiples formas de accionamiento, las cuales han sido heredadas principalmente de la energía eólica y de aplicaciones en minicentrales hidráulicas.

Por ello, se van a analizar las diferentes máquinas rotativas de generación y sus posibilidades en el sector de energías marinas.

4.3.1 Máquina síncrona

Los generadores síncronos constituyen el elemento esencial de las centrales eléctricas convencionales. En ellos, se produce el proceso de conversión de la energía mecánica suministrada por un eje en energía eléctrica que se cede a través de los bornes a la carga.

De modo que, los generadores síncronos deben ser accionados por un elemento motor primario. En el caso de la energía undimotriz, este elemento motriz puede adoptar diferentes formas, que como se vio en el capítulo anterior, pueden ser una turbina hidráulica, en el caso de una columna de agua oscilante, o una turbina neumática aprovechando un flujo de aire, o mediante accionamiento directo del oleaje.

De forma general, un generador síncrono se compone principalmente de un estator ranurado, en el que se aloja un devanado trifásico, y un rotor, en el que se aloja un sistema de excitación, ambos elementos se pueden observar en la Figura 4.1. Este sistema de excitación es quién actuará como el inductor de la máquina, generando un campo magnético giratorio de amplitud constante. Al hacer girar el rotor a velocidad constante, se induce una fuerza electromotriz (f.e.m.) en los devanados del estator. Gracias al desfase geométrico de 120° introducido en las bobinas del estator, se obtiene una señal trifásica a la salida del generador.

Existe una relación directa entre la frecuencia f de estas f.e.m.s inducidas, la velocidad de giro del rotor Ω_1 y el número de pares de polos p de la máquina. Dicha relación viene dada por la siguiente expresión:

$$\Omega_1 = 2\pi f / p$$

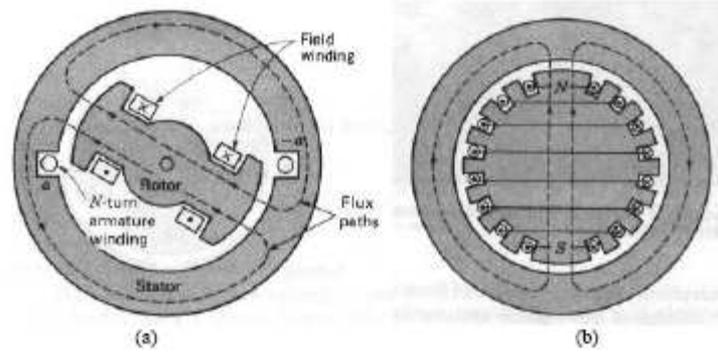


Figura 4.1: Estructuras de generador síncrono [4.7]

- (a) tipo polos salientes
(b) tipo bobinado de inducido

De modo que para una misma frecuencia, 50-60 Hz, según esta expresión a mayor número de pares de polos se requiere una menor velocidad en el rotor, y de la misma manera, a menor número de pares de polos se requiere una mayor velocidad en el rotor.

Por ello, cuando se trabaja a altas velocidades es necesario un número pequeño de pares de polos. Por ejemplo, en un régimen de operación a una velocidad periférica por encima de 1200 rpm se obliga al rotor a tener 1 o 2 pares de polos. Esta característica hace que, generalmente, estas máquinas posean un diámetro relativamente pequeño frente a la longitud axial total, siendo este el caso de los generadores de rotor liso y de los turbogeneradores. Tales características se pueden observar en la Figura 4.2.

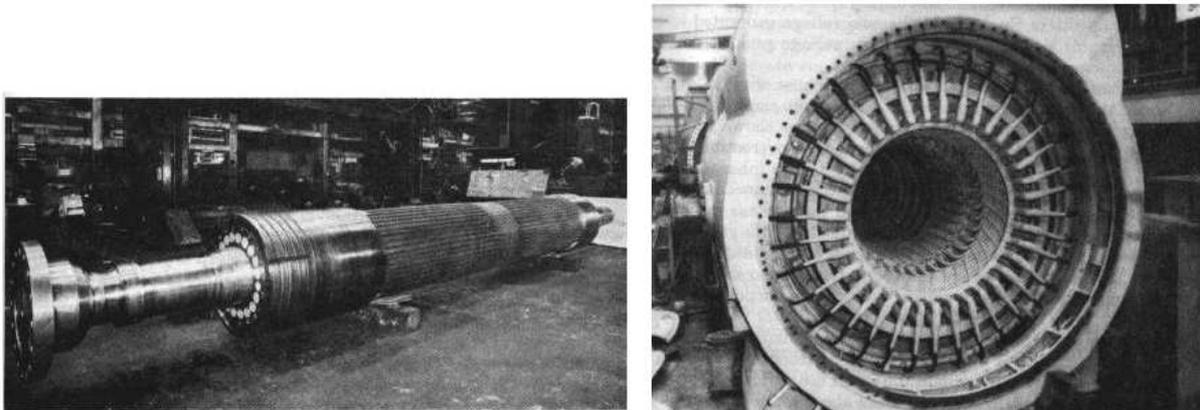


Figura 4.2: Típica máquina de rotor liso, con gran longitud axial y diámetro reducido [4.7]

Cuando se opera bajo un régimen de operación a velocidades más reducidas, entre 50 y 750 rpm, como es el caso de las turbinas hidráulicas, se obliga a que el número de polos sea muy superior. Por ejemplo para obtener 50 Hz operando a 50 rpm son necesarios 60 polos. Por ello, estas máquinas se suelen construir con un gran radio y una pequeña longitud axial. A este tipo de generadores también se les suele llamar de polos salientes y un ejemplo de estas máquinas es ilustrada en la Figura 4.3.

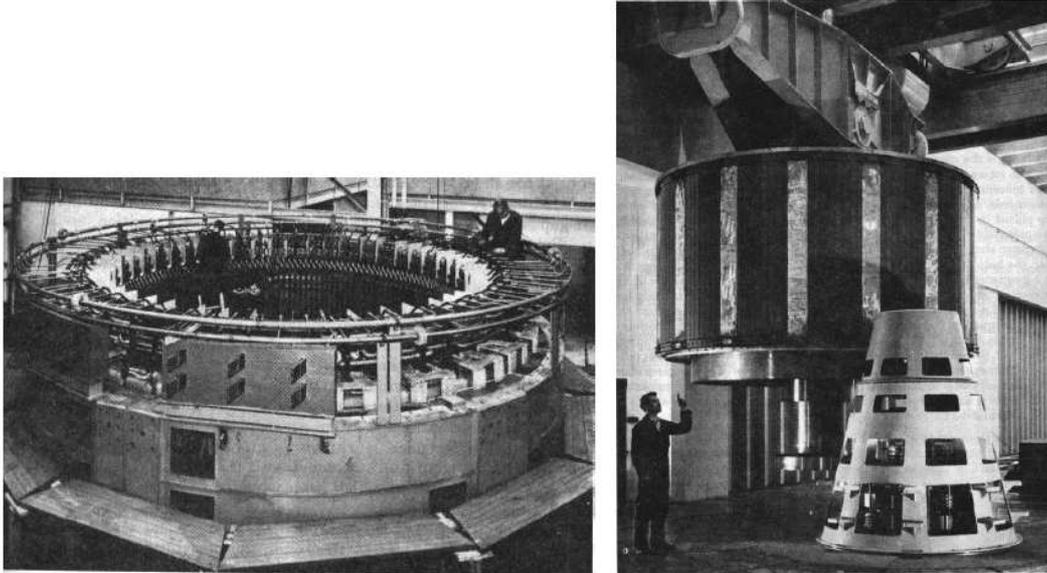


Figura 4.3: Típica máquina de polos salientes, de gran diámetro y pequeña longitud axial [4.7]

El sistema de excitación es un elemento fundamental para la generación, y hace que estas máquinas síncronas se pueden clasificar en 2 tipos de generadores dependiendo del sistema de excitación empleado. Éstos son el generador síncrono de inducción o de imanes permanentes.

- El generador síncrono por inducción o generador síncrono Convencional (Synchronous Generator, SG)

A su vez, en esta rama síncrona de los generadores, la excitación puede ser realizada mediante diferentes métodos o configuraciones. Dichas configuraciones son las siguientes:

- Excitación propia:

Se trata de un esquema clásico de sistema de excitación. Está formado por un generador de corriente continua conectado al rotor del generador síncrono mediante un sistema de anillos rozantes y escobillas. Este generador en corriente continua se denomina excitatriz principal, está acoplado mecánicamente al eje del generador síncrono y utiliza parte de la potencia mecánica que suministra tal eje. Con el fin de controlar esta corriente de excitación, la excitatriz principal es alimentada a su vez mediante otro generador de C.C., denominada excitatriz piloto. Este sistema conlleva elevados costes de mantenimiento periódicos al tener dos máquinas de C.C. en cascada.

- Auto-excitación:

En este caso la alimentación del sistema de excitación es realizada por medio de un puente rectificador conectado a través de un transformador a la salida del generador. El puente rectificador puede ser controlado a base de tiristores u otro tipo de componentes de electrónica de potencia. Este equipo estático requiere un mantenimiento periódico menor que las máquinas de corriente continua además de una mayor fiabilidad pero, sin embargo, necesita una fuente de C.C. para los casos de arranque del generador, ya que la tensión en bornes, en ese instante, es cero y el circuito de excitación no se encuentra energizado.

- Sistema de excitación sin escobillas (Brushless):

Este sistema consiste en otro generador síncrono de estructura inversa, es decir, los polos inductores están en el estator y el inducido en el rotor. La salida de éste se rectifica mediante un puente de diodos y se conecta al rotor del generador principal. De modo que el este sistema de excitación de corriente alterna del generador síncrono principal se encuentra integrado en el propio rotor de la máquina. El control de la corriente de excitación del generador principal se consigue regulando la corriente de excitación en el estator del sistema excitatriz mediante dos procedimientos, un esquema de auto-excitación o mediante una excitación piloto a través de imanes permanentes dispuestos también en el eje de la máquina. Este sistema elimina las escobillas pero gana en complejidad del rotor.

Según se ha visto, el generador síncrono de inducción implica que el generador requiera bobinas de excitación y un sistema de escobillas-anillos rozantes, menos en el tipo Brushless, donde sin embargo, el inconveniente es que el rotor es de una gran complejidad.

- El generador síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)

Esta rama de los generadores síncronos se trata de un sistema muy útil para aquellas aplicaciones en las que se les exija un funcionamiento partiendo de tensión cero, y que por tanto no pierdan su excitación en ningún momento. En este caso el sistema de excitación se realiza gracias a la propia característica de magnetización de los imanes que generan la fuerza magnetomotriz (f.m.m.), que es básica para el funcionamiento de la máquina.

Debido a la imposibilidad de regular la f.m.m., si se desea controlar la corriente inducida es necesario conectar el generador a la red mediante un convertidor de frecuencia. Este dispositivo estará formado por un rectificador, que convierte la corriente alterna en continua, y un inversor conectado en serie, que la convierte nuevamente en alterna a la misma frecuencia a la que se encuentre la red.

A diferencia del generador síncrono convencional, este tipo de generador de imanes permanentes es libre de bobinas de excitación y del sistema escobillas-anillos rozantes.

Según [4.1], el generador síncrono con sistema de excitación de imanes permanentes ha acaparado el mercado en generadores de pequeño-medio tamaño debido a su simplicidad, factibilidad mejorada y la eliminación de pérdidas en el rotor.

De forma general e independientemente del sistema de excitación escogido, podemos comentar algunas características comunes a ambos generadores:

- Operación independiente

Se trata de una característica muy importante de los generadores síncronos y es que pueden funcionar aislados de la red, pues su excitación puede ser independiente de la red. También gracias a su inercia y capacidades de regulación son capaces de otorgar estabilidad al sistema en el que inyectan energía.

- Regulación de tensión y factor de potencia:

La tensión de salida del generador síncrono puede ser fácilmente regulada y además pueden ser operados de tal forma que el factor de potencia sea inductivo o

capacitivo. Esto es debido a que llevan asociados unos reguladores de tensión y frecuencia, que mediante una lógica control pueden controlar la tensión y frecuencia de salida antes de que su inyección a la red. Además son capaces de aportar la energía reactiva requerida por el sistema de potencia cuando el generador es conectado a la red.

- Sincronización con la red:

Se trata de un control complejo que requiere regulación de tensión, frecuencia, desfase y secuencia de fases.

El generador síncrono es una máquina que normalmente funciona a velocidad constante, pero debido a la naturaleza pulsante y variable del recurso undimotriz, es interesante la posibilidad de operar a velocidad variable, obteniendo así una extracción óptima de energía.

Para que esto sea posible, el generador síncrono debe ir acompañado de un convertidor de frecuencia. Este dispositivo estará compuesto por un rectificador que transforme las señales de corrientes y tensiones generadas, en este caso, en un rango de frecuencia variable, a señales de tensión y corriente en continua. Y seguidamente, un inversor en serie que las convierte nuevamente en tensiones y corrientes en alterna a una frecuencia en sincronismo con la red. Por lo que, en resumen necesita un convertidor electrónico de potencia a modo de interfaz entre el generador y la red, tal y como se observa en la Figura 4.4.

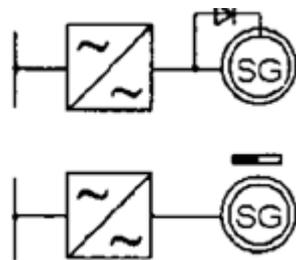


Figura 4.4: Generador síncrono con un convertidor electrónico de potencia como interfaz con la red [4.3]

Además, a través de esta interfaz ofrece capacidad de control sobre ciertas variables, como por ejemplo, poder manipular el par electromagnético de la máquina controlando el inversor y, por tanto, la velocidad del eje del generador.

Por lo tanto, los generadores síncronos son factibles de ser operados a velocidad constante o bien con estrategia de velocidad variable.

4.3.2 Máquina asíncrona

La máquina asíncrona ha sido utilizada normalmente como motor eléctrico, sin embargo en estos tiempos donde se ha incrementado la generación en el sector de energías renovables, y particularmente en el sector eólico, está siendo ampliamente utilizada como generador eléctrico.



Figura 4.5: Máquina Asíncrona

Un generador asíncrono está formado por un estator en el que se aloja un devanado trifásico a lo largo de su periferia, con una configuración tal que los conductores que ocupan posiciones homólogas en cada una de las fases están desfasados 120° eléctricos. Y un rotor que a su vez posee dos tipos de ejecuciones posibles: de jaula de ardilla o un sistema de bobinado con anillos rozantes, ambos se pueden observar en la Figura 4.6.

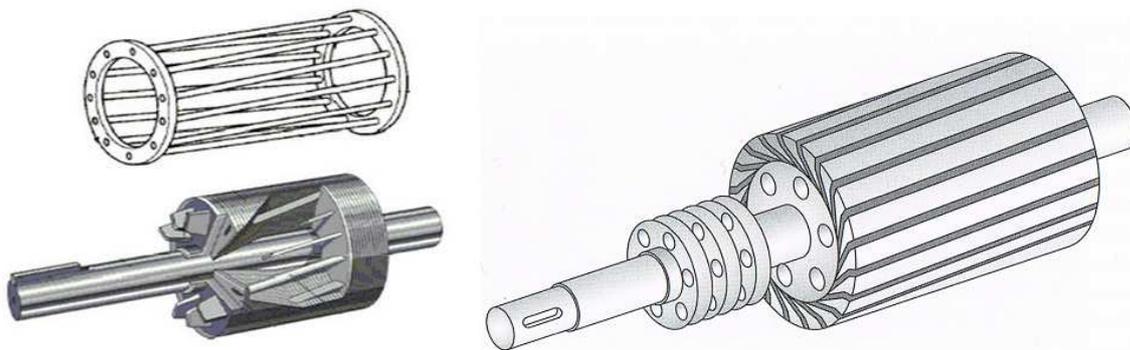


Figura 4.6: Tipos de rotor para máquina asíncrona [4.4]

IZQ: rotor jaula de ardilla

DER: rotor bobinado de anillos rozantes

El principio de funcionamiento de este generador podríamos explicarlo de la siguiente manera, si accionamos sobre-síncronamente un motor trifásico asíncrono, es decir, de tal forma que el deslizamiento se haga negativo, la dirección de la energía cambiará, y pasará a funcionar como generador. De este modo, se suministra potencia activa a la red y, en cambio, recibe la energía reactiva que necesite de la propia red.

Este tipo de generador no requiere un sistema de excitación. La red es quién mantiene fija la tensión y frecuencia por lo que no es necesaria la utilización de un regulador que controle la tensión y la frecuencia de salida.

La principal diferencia entre las máquinas asíncronas queda definida por el tipo de rotor, que como se comentó anteriormente puede ser de dos tipos. Así que los generadores asíncronos son:

- Generador asíncrono de jaula de ardilla (Squirrel Cage Induction Generator, SCIG)
- Generador asíncrono de inducción o generador de inducción (Induction Generator, IG)

Tal y como se comentó en el apartado anterior, dada la naturaleza del recurso undimotriz, poder realizar una estrategia de operación a velocidad variable ofrece la posibilidad de una extracción de energía más óptima. Por ello las máquinas asíncronas deben capaces también de operar a velocidad constante o a velocidad variable.

Hasta el momento existen tres configuraciones que han sido implementadas en este tipo de máquina para adaptarse a las necesidades del sistema de generación:

- Generador asíncrono conectado directamente a la red, (a) en la Figura 4.7.
El generador está trabajando bajo un régimen de operación a velocidad constante, en el cual el rotor se encuentra girando un poco por debajo de la frecuencia de la red
- Generador asíncrono en serie con un convertidor back-to-back conectado a red, (b) en la Figura 4.7

En esta configuración el generador y la red quedan desacoplados en frecuencia, por lo que el rotor puede trabajar girando a velocidades cuyas frecuencias son distintas de la red. Se trata una buena interfaz para operar a velocidad variable, sin embargo requiere de un convertidor de frecuencia de la misma potencia nominal de la máquina.

- Generador asíncrono de inducción doblemente alimentado (Double Fed Induction Generator, DFIG), (c) en la Figura 4.7

Esta disposición consiste en un generador de inducción donde el devanado rotórico está conectado a la red mediante anillos rozantes y un convertidor de fuente de tensión back-to-back que controla las corrientes de ambos lados, tanto del rotor como de la red. De este modo es posible ajustar la potencia activa y reactiva que alimenta la red desde el estátor independientemente de la velocidad con la que es accionado el sistema. Por ello al permitir esta variación en la velocidad del sistema, lo hace apto para una estrategia de velocidad variable. Otra ventaja de esta topología es que el convertidor requerido está valorado solo por una fracción de la potencia que entrega el generador, normalmente un 25-30 % pasa por el convertidor.

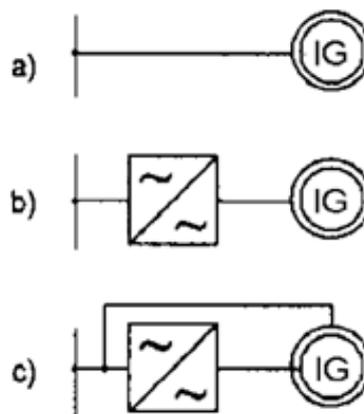


Figura 4.7: Configuraciones posibles en los generadores asíncronos [4.3]

- Generador asíncrono conectado directamente a la red
- Generador asíncrono en serie con un convertidor back-to-back
- Generador asíncrono de inducción doblemente alimentado

Respecto a las máquinas asíncronas podemos comentar las siguientes características comunes:

- Operación independiente:

Cuando se utiliza un generador asíncrono en operaciones aisladas, la excitación debe ser realizada mediante un banco de condensadores, por lo que su dimensionado depende de la potencia y características del generador. Este modo de operación, según [4.1], es considerablemente más caro que la operación en paralelo con la red y sólo es usado para producciones de potencia pequeñas.

- Regulación de tensión y factor de potencia:

En el generador asíncrono la tensión generada coincide siempre con la tensión de la red, excepto en el caso en el que la configuración empleada sea con un convertidor de frecuencia en serie como el de la Figura 4.7 (b). Además esta máquina opera siempre con un factor de potencia inductivo, siendo por tanto menor que la unidad. Así que para realizar alguna corrección del factor de potencia requiere una batería de condensadores. Otra opción es la utilización de convertidores de electrónica de potencia para realizar tales regulaciones.

- Sincronización con la red

En estos generadores el control es más simple que en los síncronos, pues la sincronización se realiza sólo a través de la velocidad de sincronismo de la máquina.

Entre los sistemas de generación vistos el DFIG representa el 65 % de las configuraciones empleadas en el mercado del sector eólico, según [4.2]. La razón de esta preferencia es que el costo del sistema, el tamaño y la eficiencia energética son óptimos para un sistema de velocidad variable, gracias en parte a que el convertidor electrónico de potencia requerido es de una potencia nominal reducida.

En cambio existe una tendencia actual, [4.2], por el generador síncrono de imanes permanentes. Pues aunque el costo inicial es significativamente mayor debido al alto precio de los imanes permanentes grandes así como el de los convertidores de electrónicos de potencia cuya potencia nominal es del 100 %, el factor dominante es la reducción en el mantenimiento y la fiabilidad, gracias a que no es necesario el uso de escobillas.

4.3.3 Comparativa entre generadores rotativos

Una vez analizados las distintas tipologías en generadores rotativos y teniendo en cuenta que los principales requisitos en la generación undimotriz son una alta fiabilidad, un bajo mantenimiento y capacidad de operación variable, las máquinas más adecuadas para ser empleadas en el entorno marino son:

- El generador síncrono de imanes permanentes con un inversor de frecuencia, Figura 4.8
- El generador de inducción doblemente alimentado, Figura 4.9

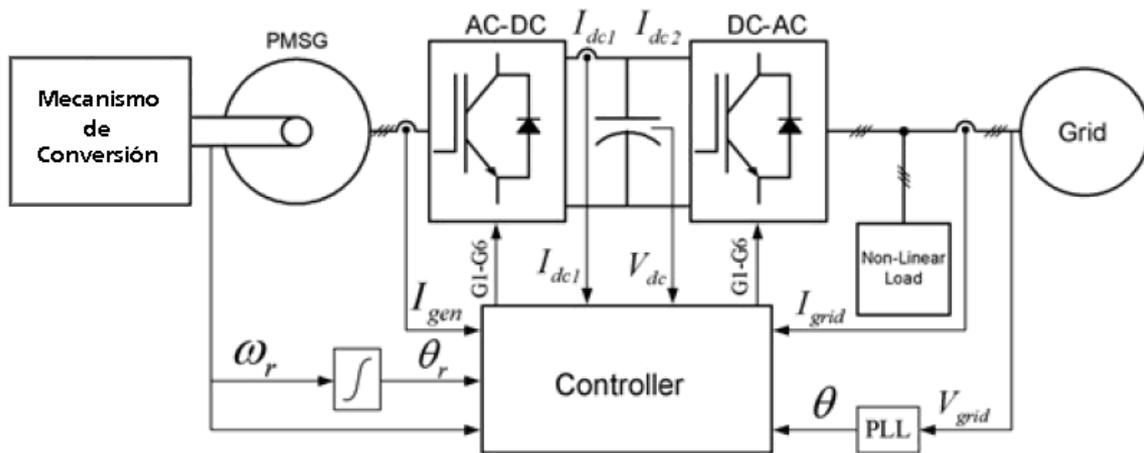


Figura 4.8: Generador síncrono de imanes permanentes, con un inversor de frecuencia [4.10]

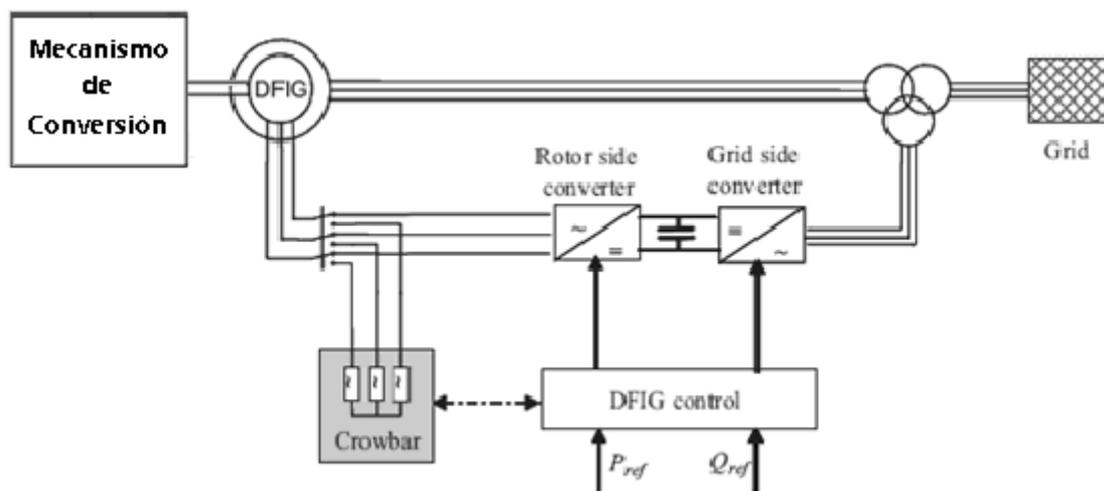


Figura 4.9: Generador de inducción doblemente alimentado [4.9]

Estos generadores son los más aptos debido principalmente a su posibilidad de trabajar a velocidad variable y de poder adecuar la señal generada a las condiciones requeridas por la red, además de dar cierta regulación de tensión y aporte de reactiva.

El generador síncrono de imanes permanentes presenta un coste inicial mayor debido al alto precio de los imanes permanentes y a que requiere un convertidor de electrónica de potencia con un 100 % de la potencia nominal. Sin embargo, tiene como ventaja adicional que no posee escobillas para su funcionamiento, ello elimina los problemas de un mantenimiento con mayor frecuencia, que en el sector offshore son de un alto coste debido al transporte necesario, además de una mayor fiabilidad del conjunto. Por otro lado, la posibilidad de trabajar con un acoplamiento directo entre el dispositivo de conversión del oleaje y el generador, eliminando una caja de cambios intermedia, aumenta aún más la fiabilidad del conjunto y reduce su mantenimiento. Como consecuencia, se obtiene una recuperación de la inversión en menor tiempo.

El generador de inducción doblemente alimentado posee la principal ventaja de que el convertidor de electrónica de potencia asociado es de un 25-30 % de la potencia nominal del generador. Ello hace que el costo, tamaño y eficiencia energética del conjunto sean muy atractivos para estas aplicaciones, además de sus posibilidades de

control de potencia activa y reactiva tanto en el lado del generador como de la red. Por el contrario, este conjunto requiere el uso de escobillas, que reducen la fiabilidad y aumentan el mantenimiento. Otra desventaja es que posee un rango menor de operación a velocidad variable que la alcanzada en el caso de incorporar un convertidor eléctrico completo.

Vamos a analizar otros aspectos de gran importancia, centrándonos mayormente en estos dos generadores anteriormente comentados:

- Eficiencia

Según [4.1], la eficiencia de un generador asíncrono debería ser de un 95% para una máquina de 100 kW y se puede incrementar a un 97 % si potencia generada es de 1 MW. En cambio, la eficiencia de los generadores síncronos es ligeramente más alta, especialmente para pequeñas potencias. En la Tabla 4.1, podemos observar valores de eficiencia para los generadores síncrono de imanes permanentes y asíncrono de inducción doblemente alimentado para distintas potencias nominales.

Tabla 4.1: Eficiencia para generadores tipo PMSG y DFIG [4.1]

Potencia Nominal (kW)	10	50	100	250	420
Eficiencia PMSG	0,91	0,94	0,95	0,96	0,96
Eficiencia DFIG	0,863	0,935	0,946	0,955	0,96

- Escobillas

Se conoce que el desgaste de las escobillas en los generadores, se debe a la fricción mecánica y erosión eléctrica que sufren tales elementos, resultado de su funcionamiento normal.

En aplicaciones de energía undimotriz, como se ha comentado anteriormente, se dispone de un recurso de naturaleza variable en frecuencia y amplitud, este hecho provoca que la potencia de entrada a la máquina de generación adquiera un perfil pulsante como el de la Figura 4.10, por lo que los generadores tenderán a sufrir constantes sobrecargas. Esta sobrecargas hacen que el sistema escobillas-anillos rozantes opere en régimen de sobrecorriente gran parte del tiempo de su funcionamiento. Ello provoca un ennegrecimiento de los anillos y una reducción de la vida útil de las escobillas, siendo necesario por tanto un mantenimiento periódico para controlar tales consecuencias. Otros factores como la humedad y el entorno corrosivo afectan también a estos elementos.

Según [4.2], la vida útil mínima de una escobilla está en torno a 3.500-8.750 horas y el período de funcionamiento de un dispositivo de conversión, en una buena localización, es aproximadamente 5.000 horas al año. Según la experiencia del sector eólico, las escobillas deben cambiarse por lo menos dos veces al año, para evitar posibles interrupciones en la operación de los generadores.

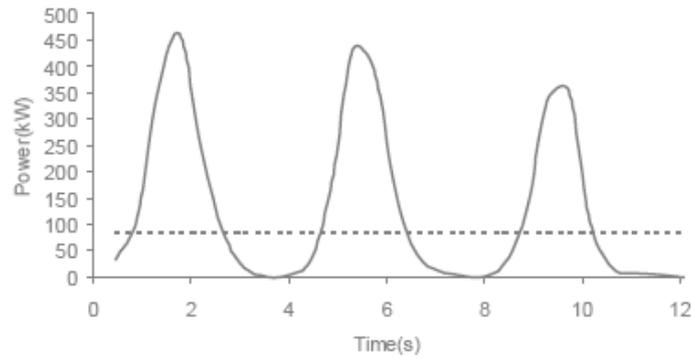


Figura 4.10: Potencia de entrada en un dispositivo de generación [4.2]

Por lo tanto, aquellas máquinas que no dispongan de tales componentes tendrán cierta ventaja en aplicaciones marinas.

- Coste inicial

Si nos encontramos por debajo de 1 MW, los generadores síncronos son hasta un 15 % más caros que los generadores asíncronos, [4.1], y son utilizados en aquellos casos en los que la producción del generador representa una proporción sustancial con respecto al sistema eléctrico de potencia al que inyecta. Por otro lado, el uso de generadores asíncronos, los cuales son de menor coste, se limitan a redes con una buena estabilidad y donde su producción sea insignificante con respecto al sistema eléctrico de potencia.

- Entorno corrosivo

Evidentemente, todos los generadores se verán afectados por un entorno tan corrosivo como es el medio marino. Sin embargo, el generador más perjudicado en este aspecto, sin tener en cuenta el asunto de las escobillas, es el generador síncrono con imanes permanentes. Los materiales que forman los imanes permanentes son muy sensibles a la corrosión, como es el caso del NdFeB (Neodymium-Iron-Boron). En este caso, el PMSG se encuentra en desventaja con respecto a los demás.

- Mantenimiento

Las labores de mantenimiento dependen significativamente de las características de la ubicación seleccionada. Esto puede ser un potencial problema, pues si una operación de mantenimiento se considera segura a 1 m de oleaje, dicha restricción según el historial del oleaje puede limitar a 7 días probables en el año, [4.2], en los que se pueden realizar tales labores de mantenimiento. También hay que tener en cuenta el hecho de que en dichos días no haya restricciones adicionales por condiciones climatológicas severas. Por ello es interesante la elección de un tipo de generador con bajas necesidades de mantenimiento frecuente.

Como se comentó anteriormente, la decisión de optar por un generador de inducción doblemente alimentado o por un generador síncrono convencional implica la necesidad de operaciones de mantenimiento de forma regular para el control y reemplazo de los cepillos, por lo menos dos veces al año.

Esto pone en desventaja el uso del DFIG y del SG convencional en estas aplicaciones frente al PMSG.

- Aspectos mecánicos

Los generadores utilizados en los dispositivos de conversión se encuentran expuestos a duras sollicitaciones mecánicas, las cuales son transmitidas por el recurso undimotriz del

cual captan su energía. La Figura 4.11 muestra un estado típico de oleaje para un OWC (siglas en inglés de columna de agua oscilante, ver apartado 3.2.1), donde se observan movimientos de hasta 6 m de amplitud en cortos periodos de tiempos. Estas cargas mecánicas son transmitidas a todos los componentes del sistema y, particularmente, a los cojinetes y acoplamientos.

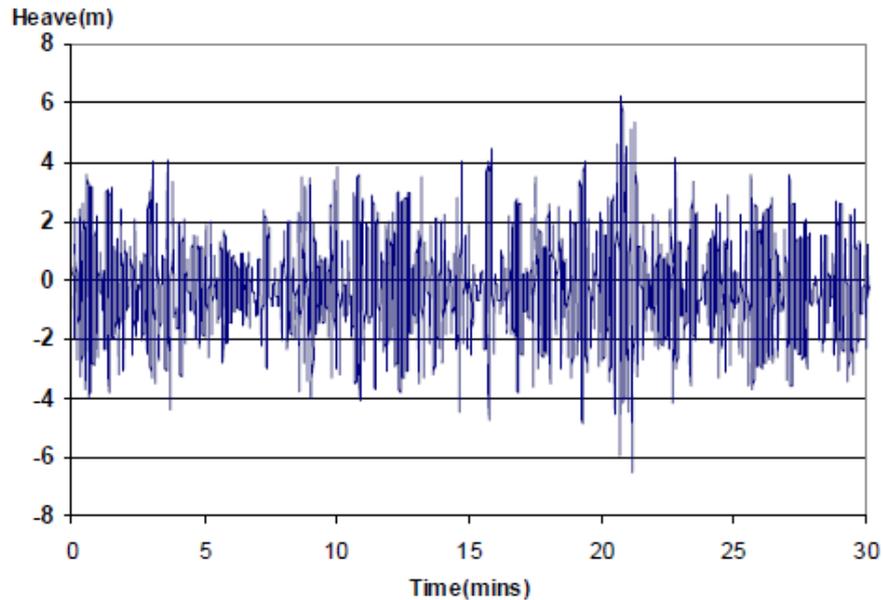


Figura 4.11: Movimientos heave típicos en un dispositivo del tipo OWC [4.2]

En este aspecto, los generadores con menor índice peso/potencia absorberán mejor dichas sollicitaciones mecánicas a las que se puedan ver afectados. Según [4.2], el IG tiene un índice de 4-4,5 kg/kW, en comparación del 3-3,8 kg/kW del SG y el PMSG, es por ello que el generador de inducción tiene una penalización por peso de un 20-30%.

Por otro lado, el PMSG tiene el inconveniente de que los imanes permanentes son elementos frágiles, y estas sollicitaciones mecánicas pueden provocar fracturas en los mismos.

- Conexión a red

En el caso del DFIG, su estator se encuentra conectado de forma directa a la red. De este modo, el generador es mucho más influenciado por las faltas cometidas en la red y por las malas condiciones en la misma, como las caídas de tensión. Por estos motivos, tienen desventaja aquellos dispositivos que estén conectados directamente a red.

Por otro lado, los generadores síncrono de inducción, de imanes permanentes y el asíncrono de jaula de ardilla que serán normalmente conectados a través de un convertidor de frecuencia completo, se ven significativamente menos afectados. Además, mediante un bus capacitivo en CC, tienen la posibilidad de suministrar potencia reactiva a la red para dar apoyo de tensión en la misma.

En cambio, la desventaja que se da con los convertidores completos, es que al no proporcionar suficiente corriente en caso de fallo, puede darse lugar a una falta no detectada por los dispositivos de protección del sistema, [4.2].

Finalmente, podemos concluir este apartado diciendo que los generadores que se antojan más aptos son el generador de inducción doblemente alimentado y el

generador síncrono de imanes permanentes. Sin embargo, ante la elección de una máquina de generación deben analizarse todas las cuestiones analizadas anteriormente, hasta llegar a un equilibrio entre coste y efectividad del sistema global. Hay que destacar en estos estudios es muy importante tener en cuenta el dispositivo de conversión y la ubicación seleccionados para la planta de generación undimotriz.

4.3.4 Aplicaciones en dispositivos de conversión de energía undimotriz

4.3.4.1 Ejemplo de implementación de todos los tipos de generadores rotativos en un mismo dispositivo de conversión

Como ejemplo de la implementación de un generador rotativo, utilizaremos un estudio realizado en [4.1], en el cual el dispositivo de conversión seleccionado se basa en el principio de columna de agua oscilante, como el de la Figura 4.12, en el que el convertidor se encuentra sumergido cerca de la costa, y toma la fuerza de la columna de agua oscilante que pasa por encima de su plataforma superior, moviéndola verticalmente y transmitiendo la fuerza a un cilindro que bombea el agua del mar a la costa, donde es turbinada mediante una turbina Pelton.

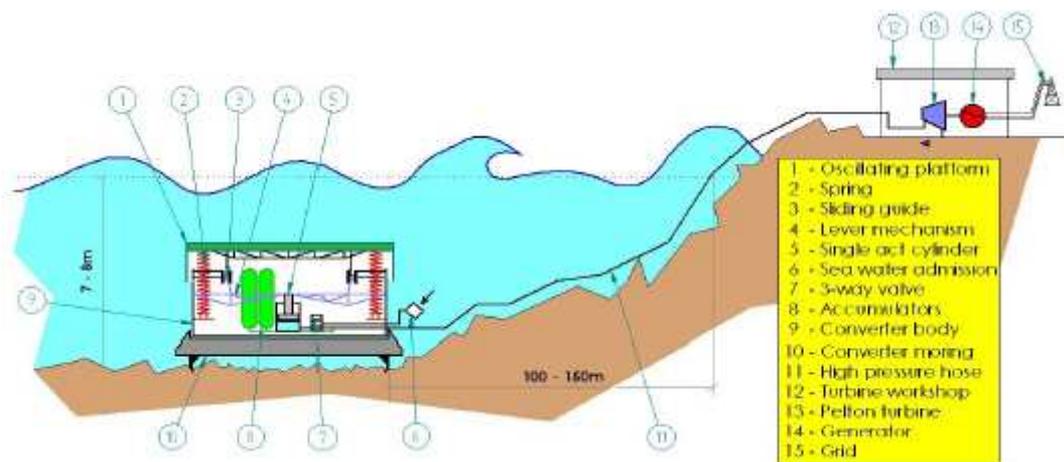


Figura 4.12: Diagrama de un dispositivo de conversión basado en el principio de OWC [4.1]

- 1) Plataforma oscilante, 2) Resorte, 3) Guía de deslizamiento, 4) Mecanismo de palanca, 5) Cilindro actuador,
- 6) Admisión de agua de mar, 7) Válvula de tres vías, 8) Acumuladores, 9) Cuerpo del convertidor, 10) Anclaje del convertidor,
- 11) Tubo de alta presión, 12) Estación del turbina, 13) Turbina Pelton, 14) Generador, 15) Red

En la Tabla 4.2, podemos observar ejemplos de implementación de generadores rotativos. Arriba a la izquierda, observamos un generador síncrono de imanes permanentes sin convertidor de frecuencia, que trabajaría a velocidad constante y, a la derecha el mismo generador pero en este caso con un convertidor de frecuencia completo. Del mismo modo, abajo a la izquierda podemos observar la configuración que tendría un generador de inducción asíncrono, que trabajaría a velocidad constante, y a la derecha un generador de inducción doblemente alimentado.

En estos esquemas también se muestra cómo se implementaría el control del dispositivo de conversión. Dicho control tiene dos bucles, uno que actuaría directamente sobre el chorro del agua en la turbina Pelton, y el otro actúa sobre el propio generador. Además, el mismo controlador, también tendría órdenes de mando sobre los dispositivos de protección existentes.

Tabla 4.2: Ejemplos de implementación de generadores rotativos en un mismo dispositivo de conversión de energía undimotriz [4.1]

	Sin convertidor electrónico de potencia (velocidad constante)	Con convertidor electrónico de potencia (velocidad variable)
Generador Síncrono de imanes permanentes		
Generador Asíncrono		

4.3.4.2 Ejemplos de generadores rotativos implantados en dispositivos de conversión de energía undimotriz

A continuación se analizarán algunos ejemplos en aplicaciones reales de generación undimotriz en los cuales se ha implantado un generador rotativo.

- Dispositivo Manta (EE.UU.)

Es un dispositivo desarrollado por la empresa Columbia Power Technologies. Este dispositivo se trata de un absorbedor puntual diseñado para convertir 2 movimientos de oscilación normales en el oleaje, como son el movimiento oscilatorio vertical (heave) y el movimiento de oleada lateral (surge). A diferencia de la mayoría de absorbedores puntuales existentes, que sólo captan el movimiento oscilatorio vertical. Esta capacidad de captar dos movimientos, hace que este dispositivo pueda absorber, y por tanto generar, el doble que un dispositivo convencional de absorbedores puntuales.

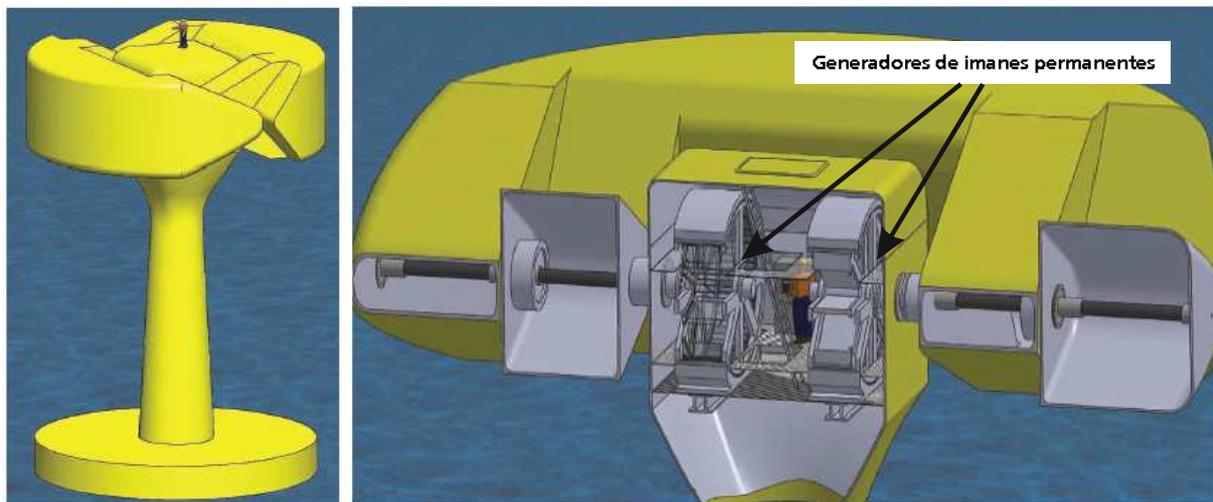


Figura 4.13: Dispositivo Manta [4.14]

El dispositivo está formado por tres cuerpos: un cuerpo central y dos flotadores independientes uno del otro. Los flotadores tienen un ángulo de giro de 90° y son conectados a través de sus ejes al cuerpo central. Es en este eje central donde se sitúan los generadores rotativos. Las dimensiones de este dispositivo son 25 m de altura y 18 m de diámetro en los flotadores.

Este dispositivo utiliza 2 generadores de imanes permanentes de grandes dimensiones, como se puede observar en la Figura 4.13. Ambos poseen un gran diámetro para incrementar en lo posible la velocidad de trabajo en el entrehierro, ya que el oleaje solo transmite velocidades pequeñas. Cada generador es accionado por uno de los flotadores y entre todas las posibilidades de conexión entre flotadores y eje, se escogió esta configuración ya que es la que se obtenía una mayor captura de energía. En el caso ideal, se ha llegado a obtener eficiencias de un 95 % para una velocidad de trabajo en el entrehierro de 1,4 m/s.

La elección del uso de generadores rotativos para este dispositivo se debe al bajo coste de la energía que se alcanzaba, hecho que lo convierte en un dispositivo altamente competitivo frente a los demás. Los ensayos realizados mediante modelos numéricos revelan que este dispositivo puede alcanzar una potencia de generación entre 250 kW y 1 MW, según las condiciones de oleaje.

- Planta de Mutriku (España):

Se trata de una planta existente en el País Vasco, España, pero desarrollado por Wavegen, una empresa tecnológica de Reino Unido. Este dispositivo está basado en el principio de columna de agua oscilante y la planta se trata de una estructura apoyada en un espigón que funcionaba como rompeolas. Está formada por 16 cámaras, y en la abertura superior de cada una, se sitúa un conjunto turbogenerador con una capacidad nominal de 18.5 kW, dando la planta una capacidad total de 296 kW.

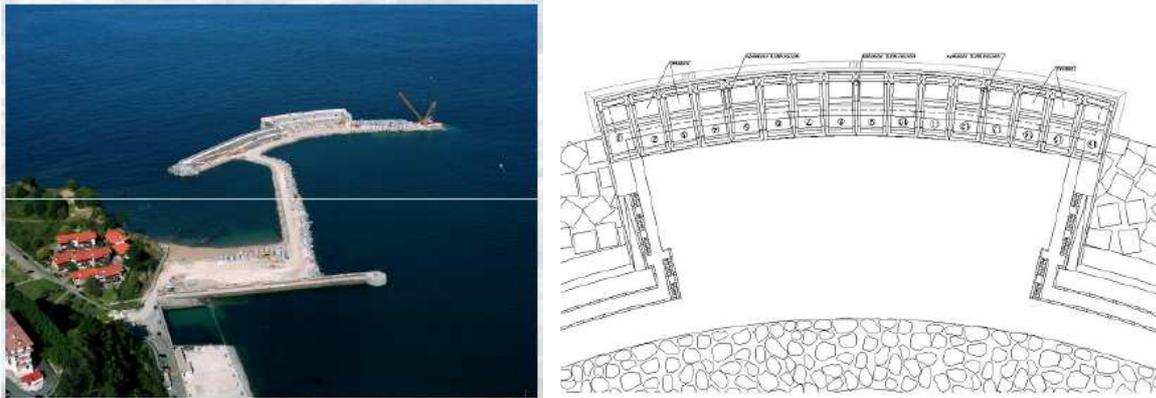


Figura 4.14: Vista de la planta de Mutriku [4.15] y [4.17]

El conjunto turbogenerador se compone de una turbina Well con un diseño simétrico en los álabes de modo que siempre roten en la misma dirección aunque el flujo de aire sí cambie de dirección, evitándose además el uso de un rectificador del flujo de aire. Sus dimensiones son 2,83 m de altura y 1,25 m de anchura, con un peso de aproximadamente 1.200 kg.



Figura 4.15: Turbogenerador de la planta de Mutriku [4.17]

El generador empleado se trata de una máquina síncrona de imanes permanentes de una tensión nominal de 450 V. Debido a la turbina, el generador opera con una velocidad de rotación variable en un amplio rango, por lo que la señal generada requiere ser rectificadora e invertida posteriormente a corriente alterna a 50 Hz en fase con la red.

- Planta de Pico (Portugal)

Se trata de una planta explotada por el Wave Energy Centre, situada en la isla de Pico en las Azores, Portugal, donde el sistema de conversión es una columna de agua oscilante. La planta está equipada con conjunto generador-turbina Wells con álabes fijos y con una velocidad de rotación variable entre 750-1500 rpm. Dicha turbina está

diseñada con álabes simétricos para girar en un solo sentido ante un flujo bidireccional de aire.



Figura 4.16: Vistas frontal y posterior de la central de Pico

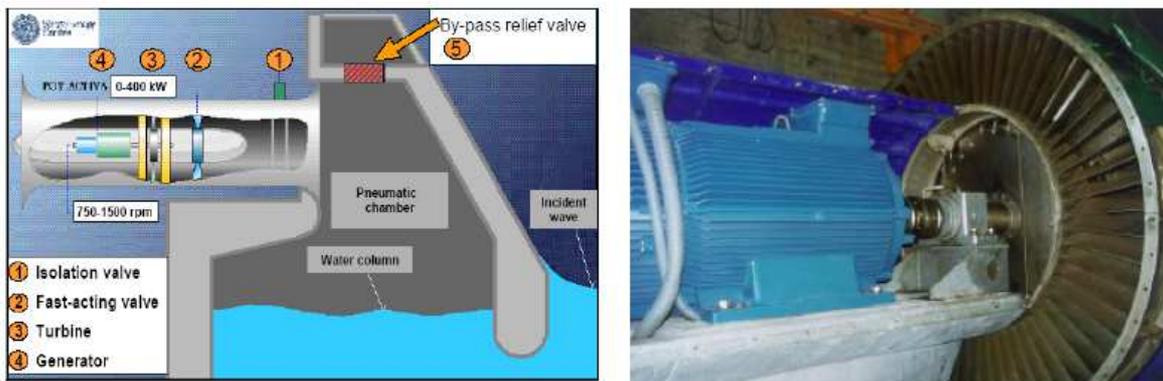


Figura 4.17: Esquema general, elementos principales y vista del conjunto turbina-generador

El generador es una máquina asíncrona de inducción con devanado rotórico cuya potencia nominal es de 400 kW, al igual que el dispositivo anterior, la máquina trabaja dentro de un rango de velocidad variable. La potencia generada es inyectada a la red mediante un convertidor electrónico de potencia y dos transformadores ubicados en un contenedor a 100 m por encima de la planta.

4.4 Generador eléctrico lineal

Este tipo de máquina, como su propio nombre indica, aprovecha un movimiento lineal para la generación de energía eléctrica a diferencia de los generadores rotativos que utilizan la potencia mecánica existente en el giro de un eje.

Se trata de un generador que está siendo profundamente utilizado en dispositivos de conversión del tipo absorbedor puntual. Estos absorbedores solo captan el movimiento oscilatorio vertical del oleaje, heave, de forma directa sin necesidad de pasos intermedios de conversión. La eliminación de estos pasos intermedios, y por tanto de sus pérdidas asociadas, la alta eficiencia mostrada por estas máquinas, el abaratamiento de los materiales magnéticos y la madurez adquirida en la electrónica de potencia han hecho posible esta tendencia sobre este tipo de generador.

4. Sistemas de generación

Su principio de funcionamiento se basa en la ley de Faraday. La variación de un flujo magnético que atraviesa una espira induce una f.e.m. en la misma. Generalmente, este flujo magnético, al igual que en las máquinas rotativas, puede ser creado por un imán permanente o por un devanado inductor alojado en el dispositivo.

Estas máquinas están formadas por un elemento móvil, que denominaremos translator, y un elemento estático, denominado estator, Figura 4.18, tales componentes se corresponden con el rotor y estator de las máquinas rotativas, hasta tal punto que la geometría que poseen ambos generadores es la misma. Como podemos observar en la Figura 4.19, se observa un corte transversal de un generador rotativo y lo desenrollamos hasta hacerlo un elemento plano, se obtiene un generador lineal. Esta tipología otorga la posibilidad de realizar máquinas tubulares, no existentes en términos rotativos.

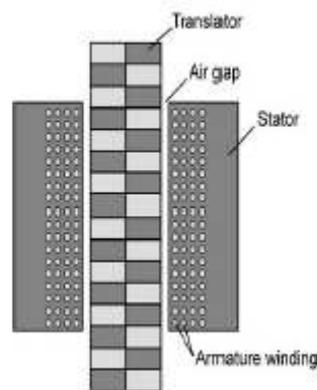


Figura 4.18: Elementos principales de un generador Lineal [4.5]



Figura 4.19: Similitud estructural entre una máquina rotativa y una máquina lineal [4.5]

De forma general, el sistema de excitación se encuentra alojado en el translator, que como se comentó anteriormente puede ser por imanes permanentes o bien por inducción electromagnética, y el devanado inducido se encuentra ubicado en el estator. La forma de concatenación del flujo magnético en el devanado inducido se trata de una característica que será motivo de clasificación, la cual será vista más adelante.

El movimiento del translator es quién provoca la variación en el campo magnético que concatena el devanado del estator. Debido a esto, se induce una tensión en tales espiras, siendo ésta la señal de salida que se está buscando. Hay que mencionar la existencia de un entrehierro, al igual que el caso rotativo, entre translator y estator, cuyas dimensiones vendrán dadas por necesidades constructivas, tolerancias que buscan la reducción de la reluctancia magnética y por las fuerzas de atracción creadas por el flujo magnético.

En la Figura 4.20 se puede observar una ilustración esquemática de un flujo inducido por imanes permanentes y una fase del devanado del estator. Se aprecia como el flujo

que concatena la espira varía en función de la posición del traductor, que es quién se está desplazando.

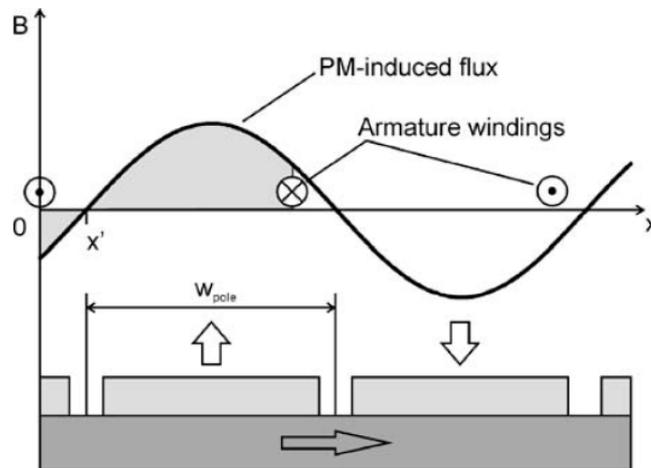


Figura 4.20: Flujo magnético en el entrehierro de una máquina lineal con inducción por imanes permanentes [4.5].

Una de las características principales de los generadores lineales es la baja velocidad a la que operan, consecuencia directa del accionamiento directo del oleaje. La velocidad del traductor viene determinada por la velocidad vertical de la superficie del mar, que suele ser de 1-2 m/s, [4.5], siendo unas 15-50 veces menor que la de un generador rotativo síncrono convencional.

El oleaje se trata de un recurso cuyo perfil de onda es pulsante (ver Figura 4.10) y debido a que el traductor seguirá el perfil del oleaje, la potencia generada es por tanto una señal que va a variar de forma continua alcanzando picos de potencia muy superiores al valor nominal. Por ello, el generador lineal y todos los equipos asociados deben ser sobredimensionados de forma que puedan absorber tales sobrecargas. Este factor es importante, ya que llevará vinculado un coste inicial superior al que sería necesario si el recurso fuera de un perfil más regular.

Hay que matizar que la potencia generada posee dos tipos de variaciones. Un primer tipo de variación, se trata de una fluctuación a pequeña escala temporal debida a los picos del perfil del oleaje. Un resultado experimental muestra que esta sobrecarga sufrida por la máquina y equipos asociados puede alcanzar hasta 8 veces la potencia nominal de los dispositivos, [4.5], aunque los efectos térmicos en este caso son limitados deben tenerse en cuenta para el diseño tanto del generador como de la instalación.

El otro tipo de variación es debido al cambio de condiciones del oleaje y se trata de una fluctuación a una escala temporal mayor, siendo de hecho un punto bastante importante a estudiar para la supervivencia tanto del generador como del convertidor completo. Esta sobrecarga de largo plazo viene determinada por las condiciones extremas del oleaje característica de la ubicación seleccionada, y su efecto térmico puede causar problemas de calentamiento. El valor máximo de esta sobrecarga puede ser de varias veces la potencia media anual generada por el generador.

Por ello, es interesante proveer al generador de algún tipo de mecanismo controlado, que actúe en estos momentos extremos disipando el exceso de energía entrante.

Es importante aclarar que estos efectos de sobrecarga también ocurren en los generadores rotativos, sin embargo no se dan de una forma tan acusada como en el caso de los generadores lineales.

Las fuerzas generadas en estas máquinas debidas a las variaciones del flujo magnético son de dos tipos, una fuerza normal entre translator y rotor, la cual genera pérdidas y problemas mecánicos, y una fuerza tangencial (shear stress) que es quien contribuye a la generación de energía. En la Figura 4.21 podemos observar un esquema de dichas fuerzas y la ley de comportamiento respecto al campo magnético que siguen tales fuerzas.

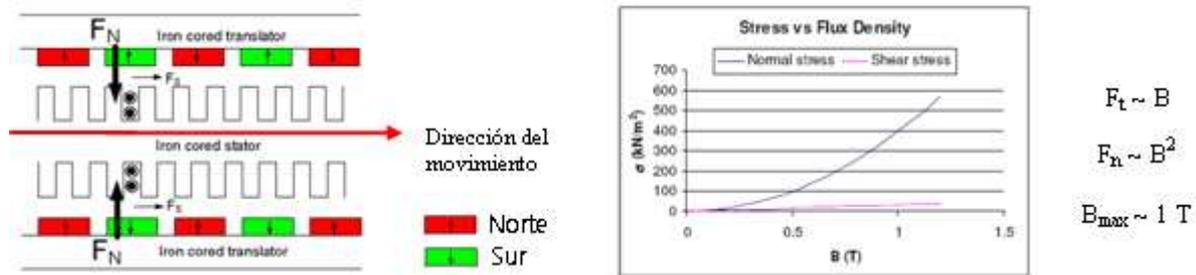


Figura 4.21: Esquema de fuerzas (izquierda) y su dependencia del campo magnético (derecha) [4.6]

En la Figura 4.21 se observa que la evolución de la fuerza normal respecto al campo magnético. Podemos decir que se corresponde con un comportamiento cuadrático, sin embargo, la fuerza tangencial presenta un comportamiento lineal. Esto indica que no se puede trabajar con un campo magnético alto y que, por tanto, éste debe estar limitado y ser objeto de estudio a la hora de optar por un PTO de este tipo.

Respecto a la conexión a red, en los generados lineales hay que decir que es un reto para los diseñadores ya que, como se comentó anteriormente, la velocidad del translator varía continuamente, acelerando y decelerando a su vez en los puntos de retorno. Esto conlleva la generación de una señal de salida de frecuencia variable, además en máquinas multifases, éstas serán intercambiadas cada vez que el translator cambie de dirección. De modo que es imposible conectar directamente este dispositivo a la red. La electrónica de potencia juega un papel fundamental en este aspecto, pues la señal de salida del generador deberá ser rectificada y convertida a una señal trifásica en alterna a 50 ó 60Hz mediante un convertidor AC/DC/AC.

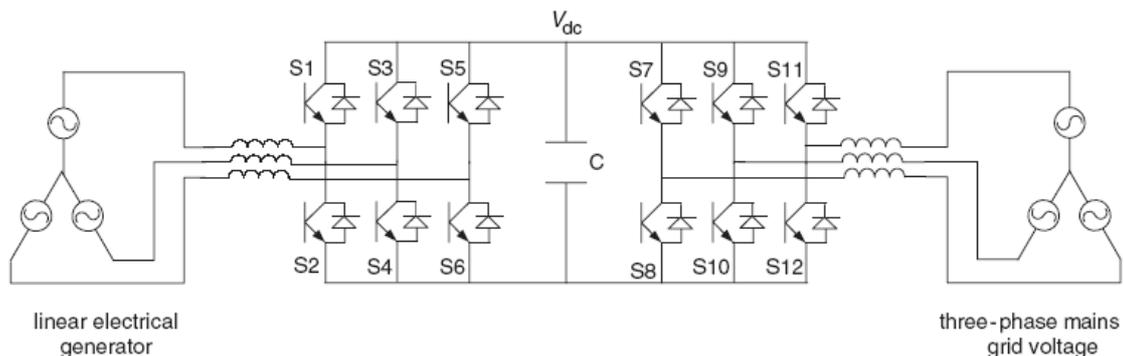


Figura 4.22: Generador lineal con un convertidor total basado en electrónica de potencia [4.11]

El conjunto completo del absorbedor puntual, compuesto por el generador lineal, su estructura portante y equipo asociado forma un sistema oscilante. En este sistema, el recurso del oleaje es la fuerza de accionamiento y el comportamiento del generador lineal es equivalente a un amortiguador en un sistema mecánico. De modo que el conjunto completo es equivalente a un sistema formado por una masa, un resorte y un amortiguador, Figura 4.23.

El conocimiento de esta equivalencia mecánica es necesario en estudios dinámicos frente al oleaje, que servirán para entender su comportamiento y obtener una máxima capacidad de absorción del recurso además de analizar las posibilidades de implantación de un control sobre el dispositivo.

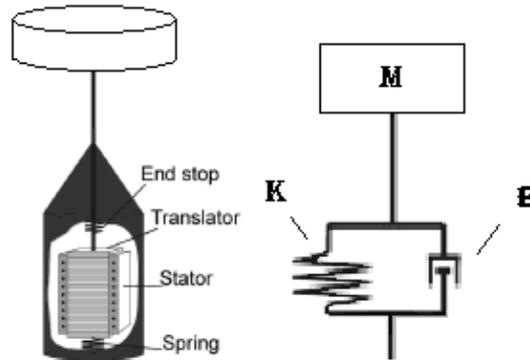


Figura 4.23: Sistema equivalente mecánico de un absorbedor puntual

4.4.1 Tipología en los generadores lineales

En el desarrollo de los generadores lineales se han elaborado diferentes tipos de máquinas en las que su principal diferencia es la forma en la que se concatena el flujo magnético. Actualmente, se han diseñado principalmente 3 tipos de generadores:

- Generador lineal de flujo magnético longitudinal (en inglés Longitudinal Magnetic Flux Linear Generator)
- Generador lineal de flujo magnético transversal (en inglés Transversa Magnetic Flux Linear Generator)
- Generador lineal tubular con núcleo de aire (en inglés Tubular Air Cored Linear Generator)

4.4.1.1 Generador lineal de flujo longitudinal

Como el nombre indica, en esta tipología el camino seguido por el flujo magnético a la hora de concatenar las espiras a lo largo de la máquina se realiza en un plano que contiene el eje longitudinal propio del generador, como se puede observar en la Figura 4.24.

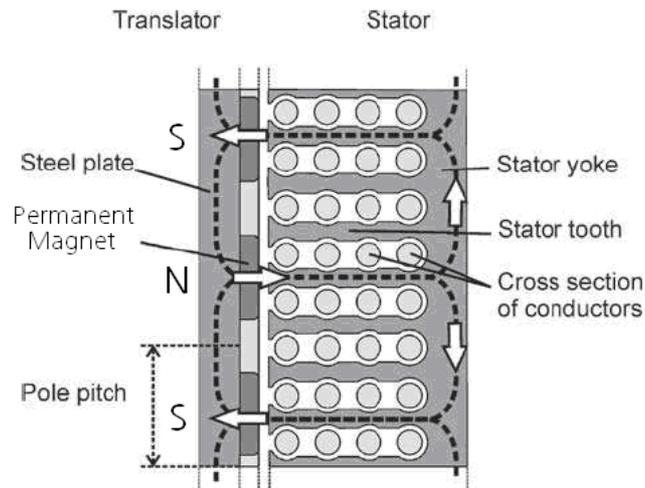


Figura 4.24: Sección de generador lineal de flujo longitudinal [4.5]

En este generador, normalmente, los imanes son instalados en el rotor de forma que sus polaridades se vayan alternando, de modo que se pueda crear un circuito magnético cerrado. El devanado de inducido, en cambio, es montado en una dentadura implantada en el estator y cuya configuración pueda concatenar el flujo creado por los imanes. En la Figura 4.24, podemos observar un corte longitudinal de una máquina de este tipo, en la que se puede observar el rotor, estator, y el recorrido del flujo magnético. En la Figura 4.25, se ilustra la forma con la que se instala el devanado en el estator para que sea posible la concatenación e inducción de las espiras.

Estos generadores poseen una reactancia síncrona pequeña y una construcción del estator simple, tratándose de una máquina robusta. Otra ventaja que poseen, es que gracias a su geometría es posible construirlo de forma simétrica con lo que se consigue reducir el efecto de las fuerzas normales. Existen tecnólogos, como es el caso de la Universidad de Uppsala, que han desarrollado incluso generadores de 8 lados, Figura 4.26

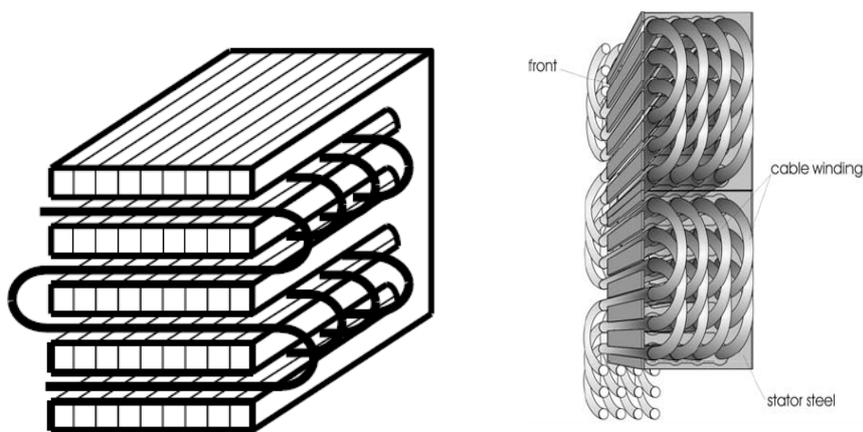


Figura 4.25: Devanado estático en un generador lineal de flujo longitudinal, [4.12]

Translator con imanes permanentes

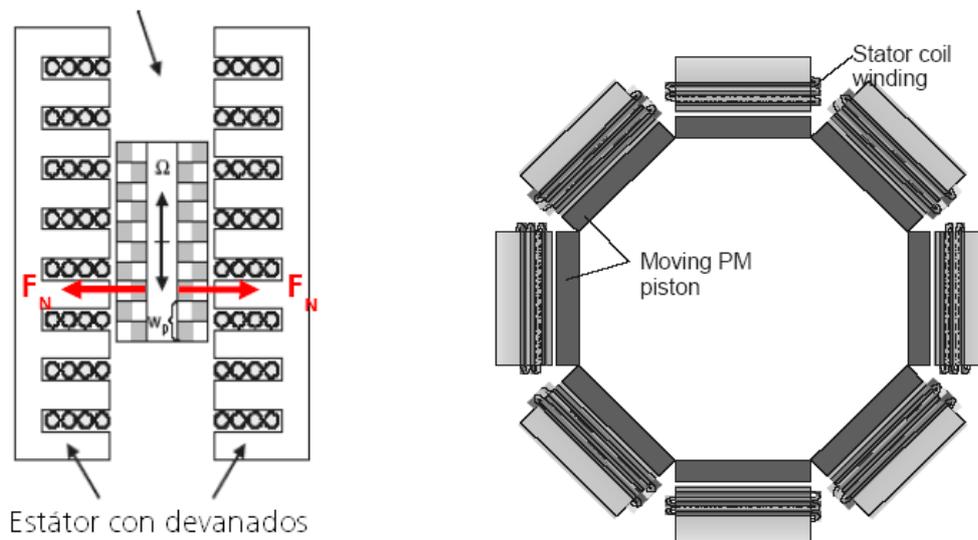


Figura 4.26: Simetría en generador lineal de flujo longitudinal
 IZQ: Generador de dos lados [4.5]
 DER: Generador de 8 lados [4.12]

4.4.1.2 Generador lineal de flujo transversal

Esta tipología presenta una estructura compleja, y como su nombre indica, el camino recorrido por el flujo magnético se realiza en el plano perpendicular a la dirección del movimiento del translator, tal y como podemos observar en la Figura 4.27. En dicha ilustración, el translator está compuesto por imanes permanentes dispuestos de forma que sus polaridades se vayan alternando para que mediante unos núcleos en forma de C, que están rodeando las bobinas que serán inducidas, se cierre el circuito magnético siempre en un plano transversal al movimiento.

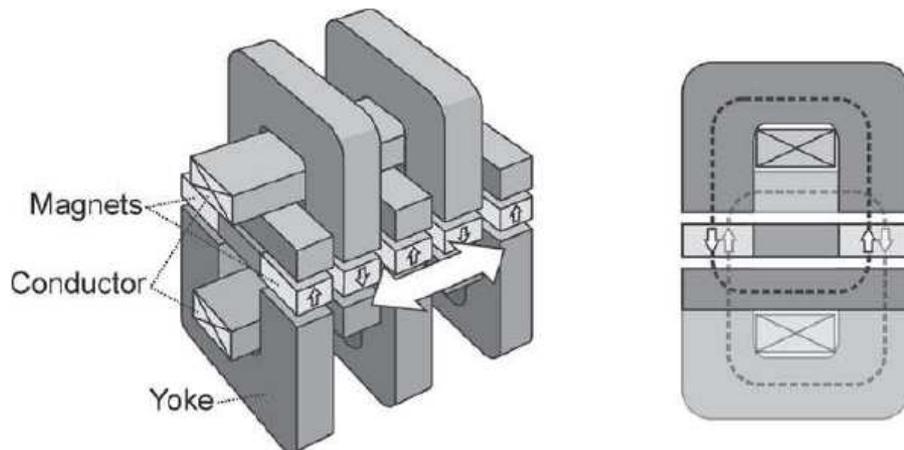


Figura 4.27: Máquina lineal de flujo transversal [4.5]
 IZQ: Vista en 3D
 DER: Vista en 2D

Como muestra la Figura 4.27, los núcleos en forma de C, van dispuestos orientados uno hacia arriba y el siguiente hacia abajo, y así sucesivamente, tratándose por tanto de un generador de construcción compleja.

En un estudio realizado por Mueller en [4.13], se comparan dos máquinas lineales de generación, una de flujo longitudinal y otra tipo flujo transversal. Para dicho estudio, ambas máquinas se prepararon para alcanzar un pico de 100 kW, con un entrehierro de 5 mm, y con los demás parámetros fijados de modo que sean lo más equivalentes posibles. En la Tabla 4.3, se presentan los datos obtenidos para distintas velocidades.

Tabla 4.3: Resultados de comparación entre los generadores lineales de flujo longitudinal y transversal, [4.13]

Velocidad Pico (m/s)	0,5		1		2	
Máquina	LF ¹	TF ²	LF	TF	LF	TF
Masa de imanes permanentes (kg)	227	126	151	94	112	78
Masa total (kg)	3535	2857	1802	1460	938	760
Fuerza Tangencial (kN/m ²)	24,3	48	24,3	48	24,3	48
Longitud estator (m)	8,2	4,2	4,1	2,1	2,1	1

De estos resultados podemos destacar varias cuestiones:

- El principal resultado es que a mayor velocidad se requiere menor material de imanes permanentes, lo cual hace que el costo y peso total sean menores.
- La máquina de flujo transversal obtiene una mayor fuerza transversal por área de entrehierro, lo cual indica también que se necesitan menos imanes permanentes para obtener la misma fuerza.
- Finalmente, se observa que las dimensiones del estátor del generador de flujo longitudinal es el doble del requerido por el de flujo transversal.

Otro análisis, realizado en [4.13], muestra que para una velocidad de trabajo de 2 m/s, el generador de flujo transversal presentaba menores pérdidas.

Finalmente, podemos decir que el generador de flujo transversal es más eficiente que el longitudinal. Sin embargo, tiene como inconveniente que la estructura del estator es bastante compleja, y requiere superar mayores dificultades en la construcción del dispositivo. Como por ejemplo, mantener constante el entrehierro a lo largo de la máquina debido a las altas fuerzas normales que se alcanzan en el mismo es bastante complicado estructuralmente. Por otro lado esta máquina posee una alta reactancia síncrona, lo que requiere una alta compensación de reactiva.

Estos inconvenientes han llevado a que esta tipología no se haya implantado en ninguna aplicación hasta el momento.

4.4.1.3 Generador tubular con núcleo de aire

La última tipología desarrollada se trata de generador de forma tubular que utiliza un núcleo de aire para cerrar el circuito magnético. En este caso, los imanes son implantados de tal forma que el flujo creado tenga dirección axial, tal y como se puede observar en la Figura 4.28. Además, los imanes deben ser ubicados de modo que sus polaridades se vayan alternando. Los devanados en este caso están rodeando a los imanes y el circuito magnético se cierra por el aire.

¹ LF son las siglas de Longitudinal Flux que hace referencia al generador lineal de flujo longitudinal.

² TF son las siglas de Transversal Flux que hace referencia al generador lineal de flujo transversal.

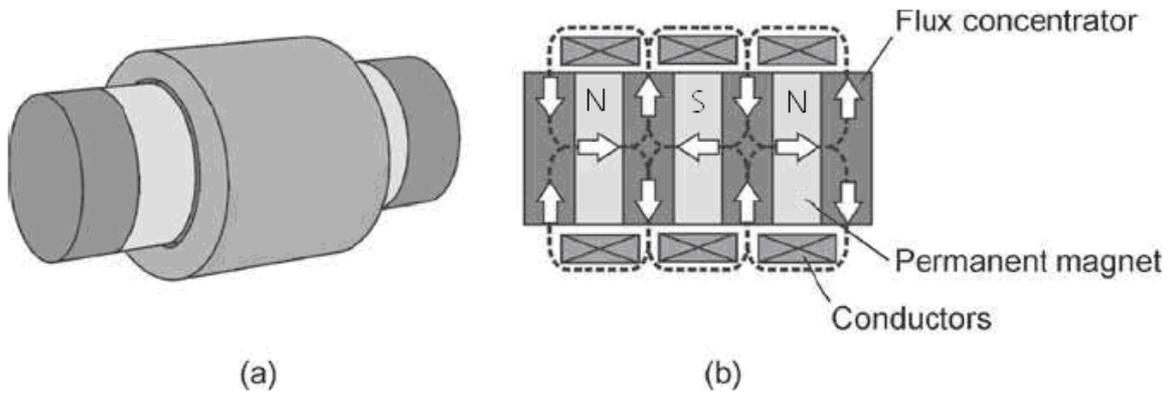


Figura 4.28: Generador tubular de núcleo de aire [4.5]
 (a) Vista 3D
 (b) Vista 2D

En esta tipología se eliminan las fuerzas normales de atracción, debido a que no hay material ferromagnético en el estator, mejorando así las posibilidades constructivas en la máquina. Sin embargo, debido a este camino por aire, el flujo magnético creado es mucho menor pues la reluctancia magnética es mucho más alta por ser aire. Consecuentemente, la potencia generada por área de entrehierro es significativamente más baja que las otras dos máquinas anteriores.

En la Tabla 4.4 podemos observar una comparación entre estas tres familias de generadores lineales:

Tabla 4.4: Comparación entre generadores lineales

Tipo de generador	Potencia por área de entrehierro (kW/m ²)	Ratio de flujo IX/E	Ventajas	Inconvenientes
Flujo longitudinal	~ 25	0,1 - 0,5	Baja reactancia síncrona Estátor simple y robusto	Baja potencia por área de entrehierro
Flujo transversal	~ 50	1,6 - 2,6	Alta potencia por área de entrehierro	Alta reactancia síncrona Estator complejo
Núcleo de aire	> 12,8	< 0,3	No hay fuerzas normales en el entrehierro	Muy baja potencia por área de entrehierro

Donde el factor Ratio de flujo IX/E es un índice de las necesidades de compensación de reactiva requeridas.

La tendencia actual de los diseñadores es por la última tipología analizada, el Air-Cored. De tal modo que actualmente se están desarrollando otros tipos de generadores lineales basados en el tipo núcleo de aire. Un ejemplo de ellos es una nueva tecnología donde se ha abandonado la forma tubular. También se ha reducido significativamente la cantidad requerida en algunos materiales costosos, como imanes permanentes, y por tanto el coste necesario para una misma potencia. En las Figura 4.29 y Figura 4.30 podemos observar una sección básica del dispositivo, en el que se vuelve a introducir un núcleo de hierro en forma de C para conducir el flujo magnético sin que sea necesario cerrar el

circuito por aire. Un estudio realizado en [4.6] muestra la significativa reducción de costes con esta nueva tecnología, Tabla 4.5.

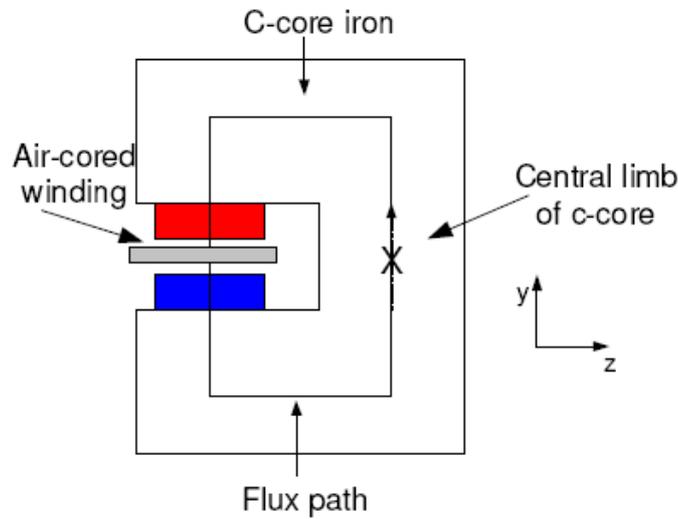


Figura 4.29: Esquema básico de la nueva tecnología desarrollada basada en el Air-Cored [4.6]

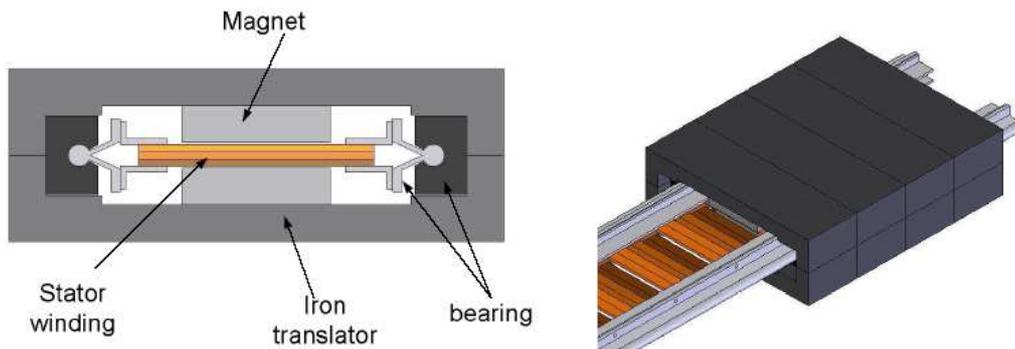


Figura 4.30: Sección y vista general de la nueva tecnología desarrollada [4.6]

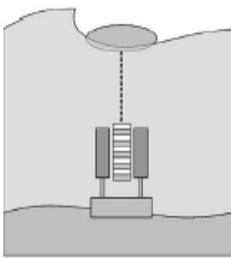
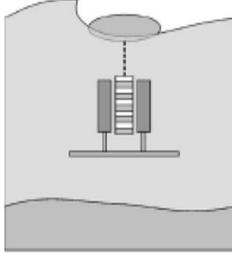
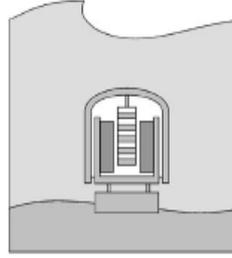
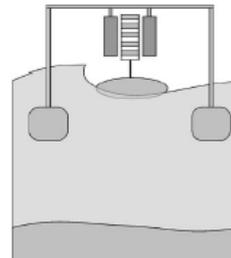
Tabla 4.5: Reducción de material y coste entre el tubular de núcleo de aire y la nueva tecnología [4.6]

	Tubular de núcleo de aire	Nueva tecnología
Masa Imanes permanentes (kg)	22	7
Masa Cobre (kg)	18	8
Masa Hierro (kg)	23	60
Masa Total (kg)	63	75
Coste Material (£)	666	247

4.4.2 Aplicaciones en dispositivos de conversión de energía undimotriz

Los absorbedores puntuales que incorporan generadores lineales que han sido diseñados hasta el momento, han adoptado de forma general 4 tipos de configuraciones básicas. Estas configuraciones se pueden observar en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Configuraciones básicas en los dispositivos de conversión de tipo absorbedor puntual

Sobre el fondo marino	Sobre placa de amortiguación	Cámara llena de gas sumergida	Estructura flotante
			

Vamos a comentar algunas aplicaciones reales en las que se ha implementado un generador lineal.

- Seabased

Dispositivo desarrollado por la compañía sueca Seabased AS, con la cooperación de la Universidad de Uppsala. Presenta la particularidad de ir fijados al fondo marino y estar equipado con un generador eléctrico lineal del tipo flujo longitudinal como sistema de conversión de energía. Este dispositivo capta el movimiento de oscilación vertical del oleaje, el cual se transmite al generador mediante una boya flotante situada en la superficie marina, unida por un cable a la parte móvil del generador eléctrico (translator), y el movimiento descendente en la dirección vertical es realizado gracias a unos resortes situados en la base del dispositivo. La Figura 4.31 muestra dos dispositivos anclados a su base, preparados para ser instalados. Al lado hay dos boyas, con diferente forma, que serían las encargadas de accionar la parte móvil del generador.



Figura 4.31: Imagen de dos dispositivos Seabased junto a sus boyas [4.21]

Este generador posee una baja potencia nominal 10 kW por unidad, pues está diseñado para plantas que agrupen una gran cantidad de estos. Las dimensiones características del dispositivo son una boya de 3 m de diámetro y 0.8 m de anchura y el generador tiene una altura de 8 m. Actualmente se encuentra instalado en una zona de pruebas, Lysekil, a unos 2 km de la península de Islandsberg, en el municipio de Lykesil, en la

costa Oeste de Suecia. En la Figura 4.32 podemos observar un esquema de la instalación existente en dicha zona de pruebas.

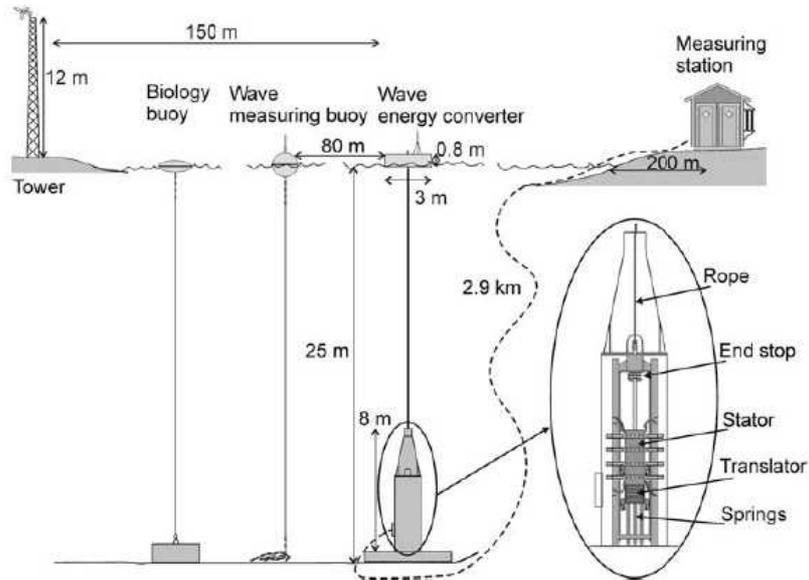


Figura 4.32: Esquema de la zona piloto de Lysekil

- Trident Energy 5 (TE5)

Se trata de un dispositivo diseñado por la empresa Trident Energy en colaboración con la Universidad de Cambridge. El TE5 consiste en una configuración de accionamiento directo implantado en una estructura flotante en la que los generadores lineales están acoplados a unos flotadores que les transfieren directamente el movimiento del oleaje.

Se trata de un dispositivo aún en demostración que ha sido diseñado con una potencia nominal de 30 kW. Las dimensiones de la estructura son 17 m² y 25 m de altura, y puede ser observada en la Figura 4.33. El dispositivo cuenta con 4 flotadores, que tienen un recorrido de 3,3 m, y la forma que poseen estos flotadores ha sido diseñada para captar energía tanto del movimiento heave como del surge (movimiento oscilatorio vertical y horizontal)



Figura 4.33: Trident Energy 5 [4.25]

Cada flotador acciona, a través de un acoplamiento mecánico equilibrado, a dos generadores lineales en paralelo. Estos generadores lineales son del tipo Air-Cored (Núcleo de Aire) de forma tubular con una longitud de carrera de 4.75 m. Las bobinas

de los generadores están configuradas en serie para dar una fuerza electromotriz máxima a circuito abierto de 850 V (pico) con una velocidad lineal de 2,1 m/s y una amplitud de onda de 1,7 m, [4.25].

En el momento en que se superan estas magnitudes, los generadores son utilizados como motores lineales de forma que recogen automáticamente los flotadores, evitando así daños eléctricos y mecánicos. Siendo ésta una de las grandes ventajas características del dispositivo, las posibilidades que ofrece respecto a la supervivencia del equipo. En la Figura 4.34, podemos observar un esquema de la operación normal del dispositivo (izquierda) donde el flotador está en contacto con la superficie marina, y en la misma figura a la derecha se ilustra otro esquema que muestra el modo de operación bajo condiciones de supervivencia, donde los flotadores son elevados hasta una zona de seguridad dentro del dispositivo.

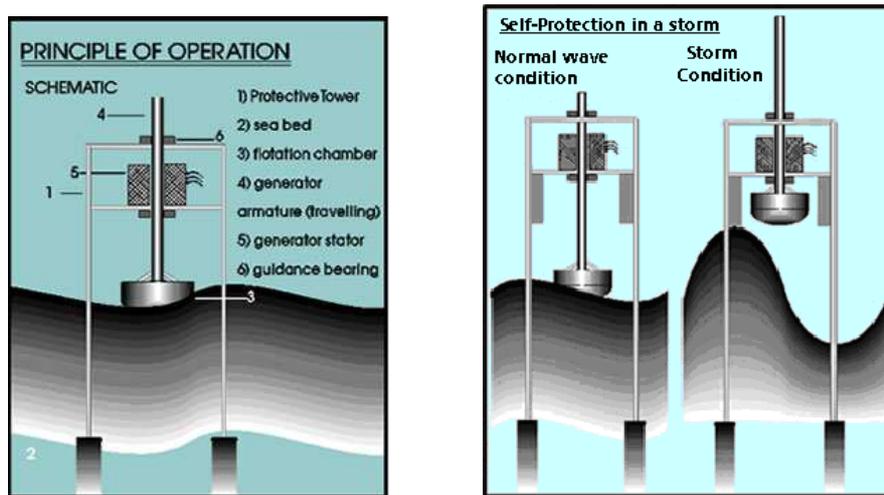


Figura 4.34: Principios de operación del dispositivo TE5
IZQ: Operación normal, DER: Operación de supervivencia

La producción del generador es una señal de forma sinusoidal, pero de amplitud y frecuencia variable, por lo que dicha señal se convierte a CC mediante rectificadores controlados de tipo puente completo. En la Figura 4.35 se muestra un esquema (izquierda) y una imagen (derecha) del ensamblaje entre los generadores lineales y la electrónica de potencia. Debido al gran pico de potencia que se produce en los generadores, por la naturaleza del recurso, hace que en este caso los convertidores de electrónica de potencia estén sobredimensionados del orden de 100 kW para una potencia nominal en el dispositivo de 30 kW.

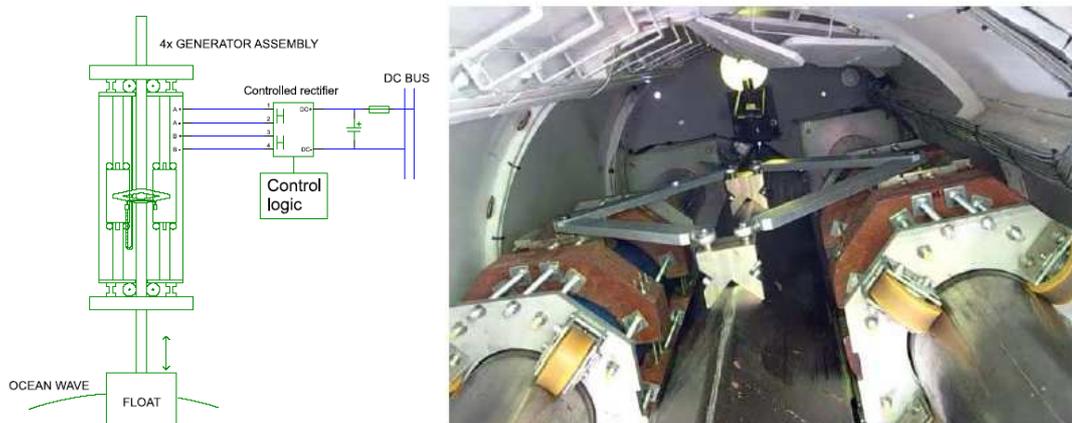


Figura 4.35: Esquema de los generadores (izquierda) e imagen del interior del dispositivo TE5 (derecha) [4.25]

- Dispositivo Oyster

Este dispositivo ha sido diseñado por la empresa tecnológica Aquamarine Power Ltd, y es un dispositivo sumergido en aguas cercanas a la costa a una profundidad entre 10-16 m. Consiste en un módulo fijado al fondo del mar donde el movimiento horizontal de las olas fuerza a la placa a oscilar comprimiendo y expandiendo dos cilindros hidráulicos que están situados en la base. Éstos bombean agua a gran presión a través de un conducto hasta la costa en la que se instala una versión modificada de una central hidroeléctrica. En dicha central se sitúa una turbina Pelton acoplada a un generador eléctrico.

Existe un prototipo de 300 kW actualmente instalado en el European Marine Centre, una instalación offshore en Orkney, Escocia. La placa oscilatoria posee unas dimensiones de 18 m de ancho y 13 m de altura y está formado por unos tubos de acero de 1,8 m de diámetro.



Figura 4.36: Esquema instalación del dispositivo Oyster [4.27]



Figura 4.37: Dispositivo Oyster [4.27]

En el dispositivo, los generadores instalados son generadores de inducción que trabajan a velocidad variable. Sin embargo, se está diseñando un nuevo tipo de generador que implementa la tecnología Air-Cored del generador lineal, vista anteriormente. Este nuevo generador, denominado C-Gen es una novedosa tecnología de generador eléctrico de imanes permanentes de accionamiento directo que está siendo desarrollado por la Universidad de Edimburgo. Se trata de algo novedoso, entre otras cuestiones, porque toma la forma de una máquina rotativa que implementa tecnología desarrollada para el generador lineal, ver Figura 4.38.

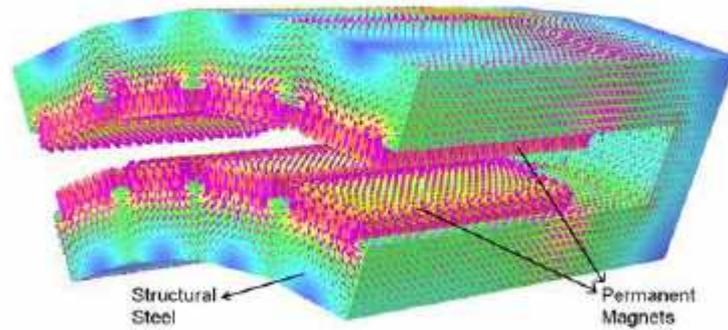


Figura 4.38: Esquema de la estructura del C-Gen y del recorrido del flujo magnético [4.28]

Los principales beneficios que se obtienen son una reducción en la masa global del sistema en máquinas de gran diámetro y una mayor facilidad en la fabricación y ensamblaje de la máquina. Esto es debido a su estructura modular de núcleos en forma de C, por la que circula un flujo magnético de forma radial y a un fácil ensamblaje del rotor sin fuerzas de atracción respecto del estator. En este diseño se alcanza un equilibrio entre aspectos electromagnéticos, estructurales y térmicos. En la Figura 4.38 es una imagen que muestra la estructura del núcleo en forma de C por el que circulará el flujo magnético creado por los imanes permanentes que son fijados en el propio núcleo.

Y en la Figura 4.39 a la izquierda podemos observar que su ubicación dentro del dispositivo sería en el eje de rotación del mismo, y a la derecha se ilustra una sección del rotor de la máquina en la que se alojarían los conductores. Como se muestra en la figura, se sitúa un generador de 600 kW a cada lado del eje de rotación de la placa. En la Tabla 4.7 se puede observar las características de cada generador.

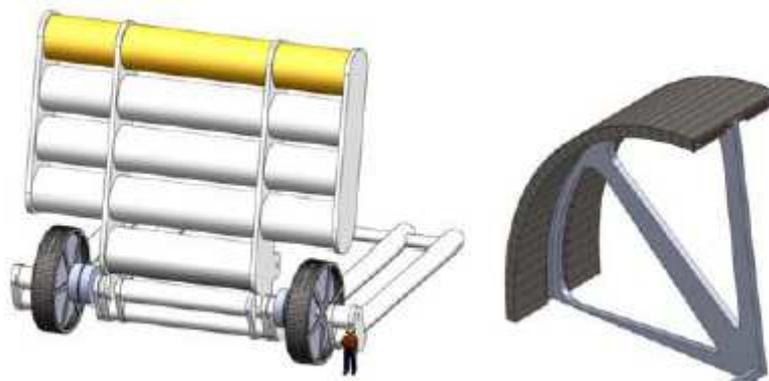


Figura 4.39: Ubicación de los generadores y corte del rotor del generador C-Gen [4.28]

Tabla 4.7: Características generadores C-Gen [4.28]

Parámetros	Valor
Diámetro exterior	4,2 m
Longitud axial	0,9 m
Peso total	9 t
Potencia nominal	600 kW
Eficiencia media ponderada	89,20%

4.5 Agrupaciones de dispositivos

En un parque undimotriz, la agrupación de varios dispositivos en un único bus consigue que la señal generada sea suavizada y por tanto, la calidad de la señal generada es de mejores condiciones. Este efecto suavizador también implica que los dispositivos aguas abajo sean de menor potencia nominal y de menor coste.

4.5.1 Efecto suavizador por la agrupación de dispositivos en un parque

El recurso del oleaje es por su naturaleza variable a corto y largo plazo y por tanto también lo es la energía extraíble del mismo. La energía generada por un solo dispositivo puede variar de cero a un máximo en cuestión de segundos, sin emplear ningún tipo de almacenamiento de energía. En cambio, si varios dispositivos son conectados juntos en un parque, dicha variación puede ser reducida, aunque tras dicha mejora, aún la calidad de onda siga siendo todavía un reto, aunque estas cuestiones serán investigadas en el Capítulo 6.

Otro método de apoyo para garantizar una señal más estable es la utilización de una unidad centralizada de almacenamiento eléctrico situada en el punto de conexión con la red.

Para mostrar este efecto analizaremos una simulación realizada en [4.30] y [4.31], en la que se simula una agrupación compuesta por 5 generadores lineales operando como absorbedores puntuales que forman una pequeña granja. Los generadores empleados son de una tipología de flujo longitudinal, en el que los imanes permanentes son montados en un translator y su flujo magnético induce una corriente en un devanado ubicado en el estator. Este generador posee cuatro lados y el estator está fijo a una cimentación en el fondo marino, Figura 4.40.

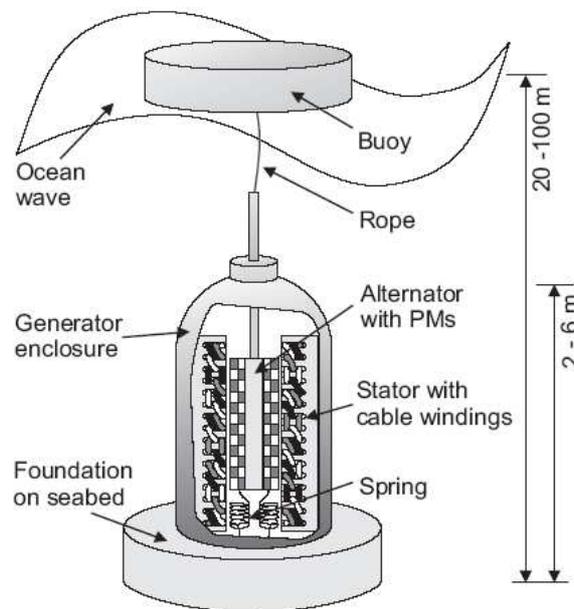


Figura 4.40: Generador lineal para simulación [4.30]

Estos generadores, que pueden producir 10-100 kW dependiendo del tamaño y forma de la ola entrante, generan individualmente una señal que varía en frecuencia y amplitud, y su señal es demasiado pequeña para suministrar a una instalación comercial. En cambio, sí podría hacerlo si varias unidades son conectadas en paralelo. Para ello, es necesario hacer pasar la señal de cada generador por un rectificador antes de la

conexión de las mismas en un bus, pues no pueden ser conectados directamente ya que la tensión y frecuencia de cada señal generada difieren entre ellas. Y en la Figura 4.41, a la derecha podemos ver el circuito que se utilizará en la simulación, donde se conectarán todos los generadores en paralelo a una carga R y a una fuente de CC que simula la red en el puente de continua. En la Tabla 4.8 podemos observar las características de los generadores para dicha simulación.

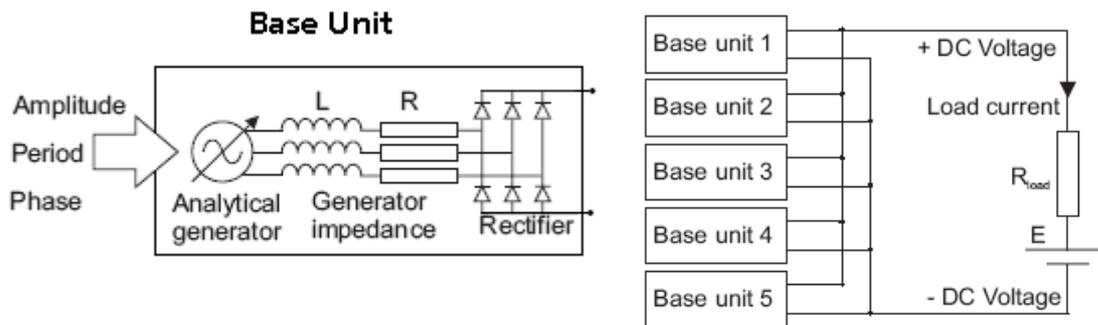


Figura 4.41: Esquema de simulación [4.30]

IZQ: Esquema de base unitaria equivalente del generador, formado por un generador, una impedancia y un rectificador

DER: Circuito de simulación, formado por los 5 generadores, la carga y una fuente E que simula la red desde el lado de CC del puente de continua.

Tabla 4.8: Características de los generadores utilizados en la simulación [4.30]

Parámetros	Valor	Unidad
Tensión nominal	200	V
Potencia nominal	13	kW
Periodo de ola (de diseño)	5	s
Factor de potencia	1	
Altura de ola (valle-cresta)	2	m
Ancho de polo	100	mm
Ancho del lado del estator	400	mm
Ancho de dentadura	8	mm
Total número de polos	100	
Ratio del devanado	1,20	
Número de cables por ranura	6	
Ángulo de carga	0	rad
Campo magnético en la dentadura	1,55	T
Resistencia de carga	3,1	Ω
Resistencia del cable	0,3735	Ω
Inductancia de la máquina	11,5	mH
Tensión CC	200	V

Para realizar la simulación se ha utilizado un software de Elementos Finitos, y se asume que el generador se desplaza verticalmente con una velocidad de comportamiento senoidal, según las siguientes ecuaciones:

$$x(t) = h \cdot \sin(\Omega \cdot t)$$

$$x'(t) = \Omega h \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

Donde x es la posición del traductor, h es la posición máxima alcanzable en la carrera del traductor que coincide con la amplitud de la ola (o altura de la ola) y Ω es la frecuencia angular del traductor. Y en la Figura 4.42 podemos observar una ilustración del movimiento del generador.

En la simulación se analizaron varios casos en los que se introdujeron desplazamientos de diferentes características, por ejemplo igual amplitud, fase y frecuencia, distintas frecuencias, distintas amplitudes, etc. Finalmente se realiza una simulación en la que se amplía el número de dispositivos y cuya posición entre ellos es configurada de una forma previamente estudiada para disminuir las fluctuaciones.

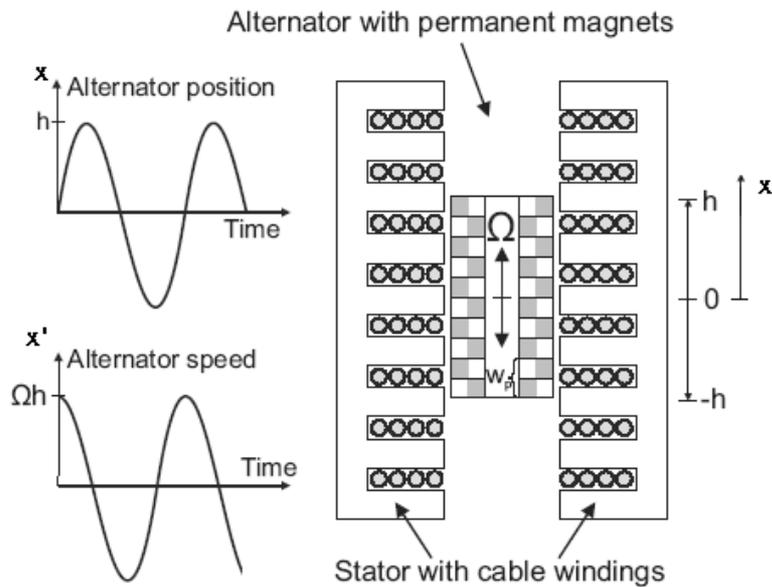


Figura 4.42: Movimiento del generador lineal [4.30]

En el primer caso, todos los generadores son accionados con un movimiento de igual amplitud, fase y frecuencia, Figura 4.43 IZQ. La señal generada, Figura 4.43 DER, muestra que al coincidir todos los generadores en los puntos de retorno, la corriente pasa por cero en tales instantes y, de forma similar, se produce un pico de corriente cuando ambos pasan por la posición cero.

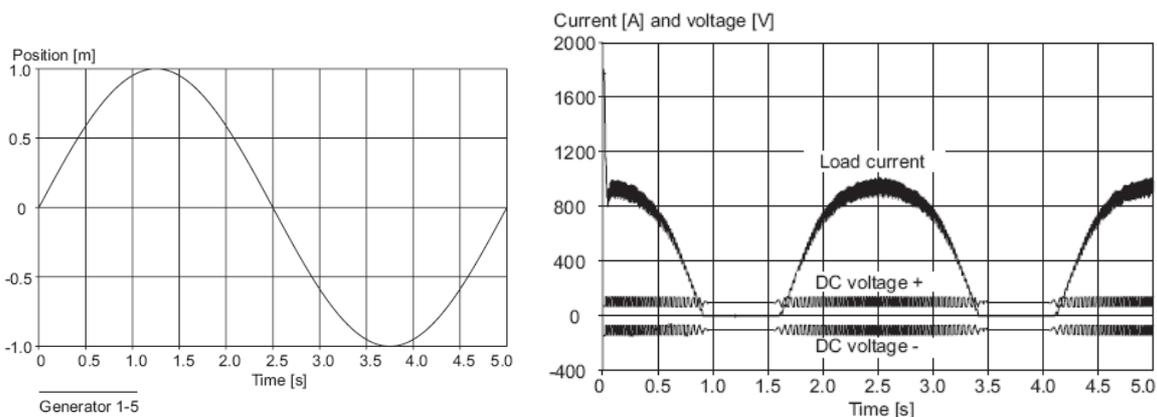


Figura 4.43: Posición y generación en el primer caso [4.30]

En el segundo caso, se introduce un desfase de forma equitativa en la posición entre generadores, de modo que se introduce el mismo desfase en el desplazamiento de los translators, Figura 4.44 IZQ. En su generación, Figura 4.44 DER, se puede observar cómo, en este caso, la corriente producida se trata de una señal de comportamiento aproximadamente constante a 450 A, pues con tal desfase los puntos de retorno quedan cubiertos por otros generadores que no están en este instante en el punto de retorno de su recorrido.

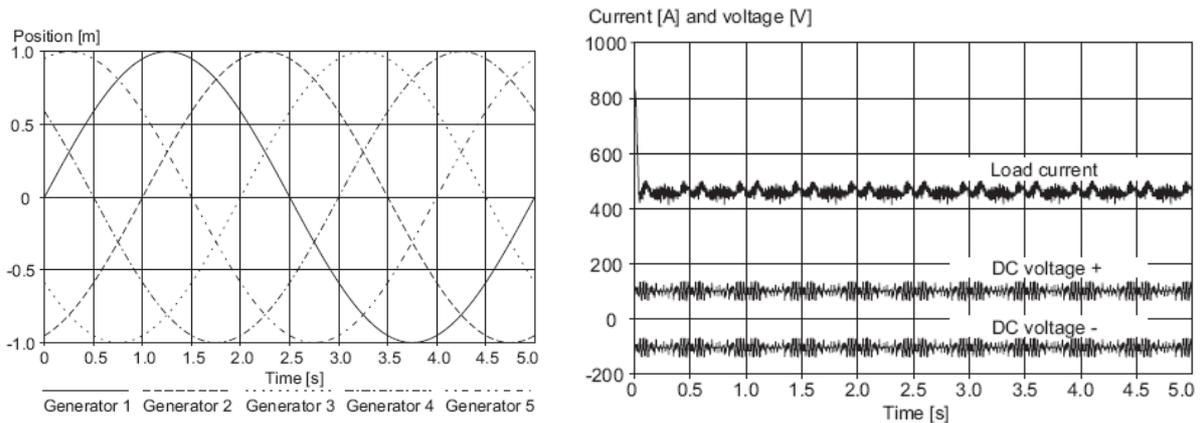


Figura 4.44: Posición y generación en el segundo caso [4.30]

En el tercer caso, introducimos una señal de posición que posee la misma fase pero distinta frecuencia, tal y como podemos ver en la Figura 4.45 IZQ, y en la Figura 4.45 DER podemos observar los resultados obtenidos. Donde podemos destacar la alta corriente generada al principio de la simulación debido a que las máquinas están en fase y, por tanto, todas están generando a la vez en dicho instante. Observando su evolución se observa un cierto comportamiento sinusoidal, aunque siendo una onda algo inestable no observa pasos por cero, aunque puede darse el caso.

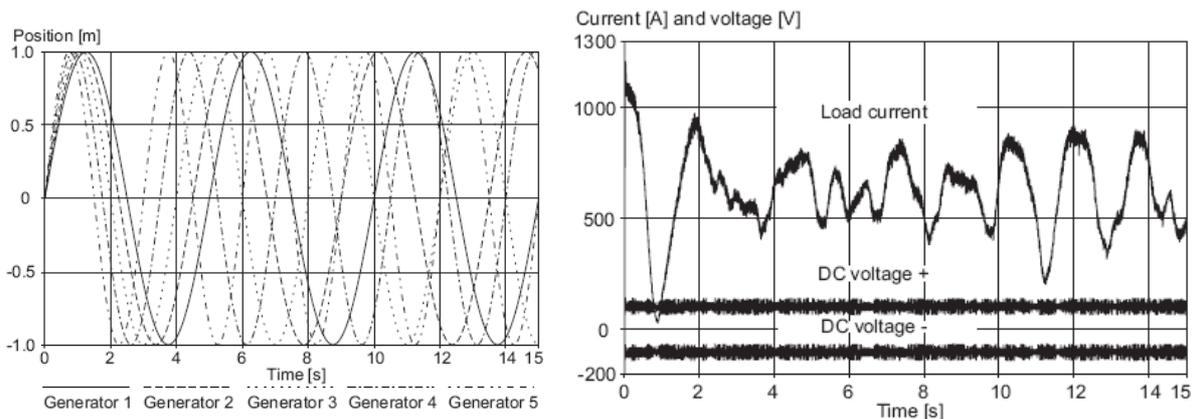


Figura 4.45: Posición y generación en el tercer caso [4.30]

En el cuarto caso, se implementan posiciones desfasadas de forma equitativa, con la misma frecuencia sin embargo con distintas amplitudes, Figura 4.46 IZQ. En este caso, se observa una corriente producida de forma sinusoidal que oscila alrededor de los 400 A. También se muestra como la mayor contribución es aportada por el generador cuyo movimiento es de mayor amplitud.

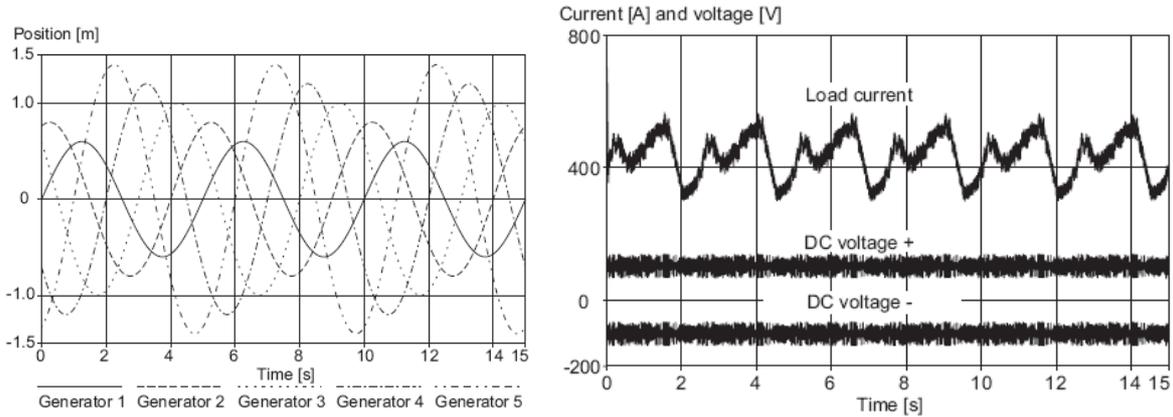


Figura 4.46: Posición y generación en el cuarto caso [4.30]

En el quinto, los movimientos implementados son los correspondientes a un espectro real de oleaje obtenido del océano Atlántico, aplicando uno distinto a cada generador, ver Figura 4.47 IZQ. En los resultados se pueden detectar, más o menos 7 picos distinguidos en la señal generada de corriente, Figura 4.47 DER, correspondientes a los pasos por cero del generador con mayor amplitud y también como en ciertas ocasiones la corriente llega a pasar por cero.

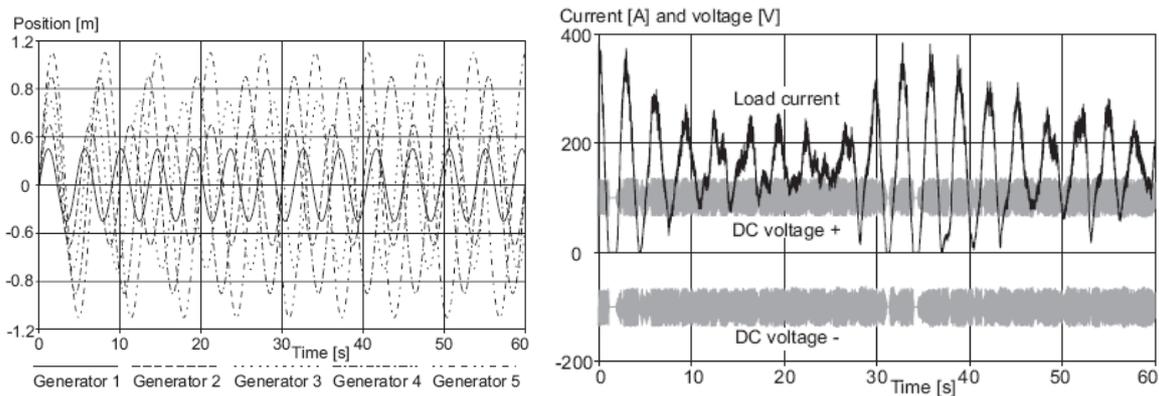


Figura 4.47: Posición y generación en el quinto caso [4.30]

En el último caso, se utiliza el mismo espectro de oleaje que en el caso anterior, sin embargo el número de generadores es incrementado a 10. La configuración entre los dispositivos es que todos son interconectados y dos unidades comparten la altura de la ola y el periodo de la ola pero con $\frac{3}{4}$ de retraso, tal y como podemos observar en la Figura 4.48. Para este espectro y posiciones de los generadores determinados, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.49.

Si se observa los resultados del quinto caso, la corriente varía ampliamente entre 0 y 400 A de hecho existen puntos de paso por cero cuando varias máquinas alcanzan el punto de retorno, pues sus velocidades son bajas. En cambio, cuando se amplía el número a 10 generadores el espaciado entre máquinas es cuidadosamente seleccionado para disminuir tales variaciones y se observa que se consigue una onda que varía entre 200 y 400 A, y de forma más estable.

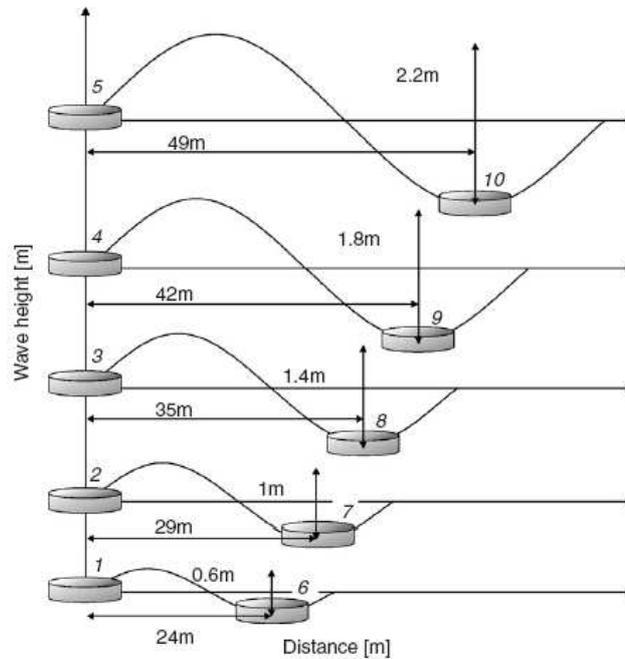


Figura 4.48: Posiciones para el último ensayo [4.31]

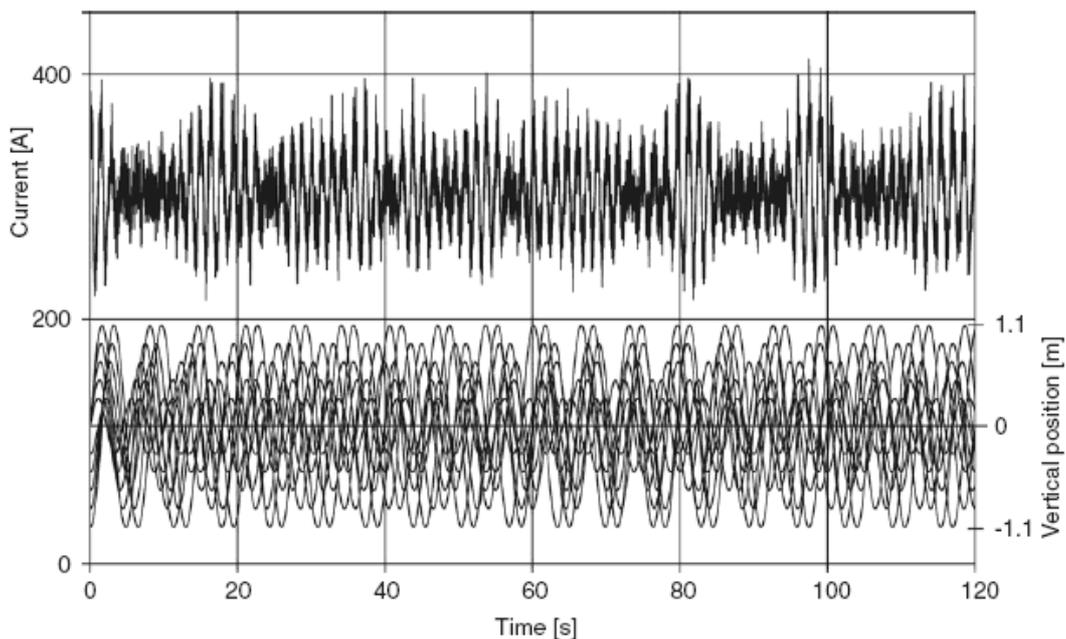


Figura 4.49: Posición y generación en el último caso [4.31]

De los resultados obtenidos se pueden obtener varias conclusiones:

- La potencia generada depende de la velocidad del traductor.
- El valor máximo de la potencia generada ocurre en los pasos por cero, es decir en la posición de mayor velocidad. En cambio, los valores mínimos, incluso valor cero, se da en los puntos de retorno en el recorrido del traductor donde la velocidad es cero.
- Un número considerable de generadores conectados en paralelo puede reducir los pasos por cero de la generación global, además de suavizar la señal y, en

circunstancias óptimas de oleaje, incluso llegar a un comportamiento prácticamente constante.

- A mayor número de dispositivos conectados, se consigue una mayor reducción de fluctuaciones en la señal de generación, evitando incluso los pasos por cero en la misma.
- Es necesario estudiar el espaciado entre generadores para evitar la sincronización en los movimientos del traductor, lo que da lugar a mayores variaciones en la señal.

Por tanto, con una formación en clúster de generadores es capaz de producirse una señal de mayor calidad para su tratamiento e inyección a red, por lo que requerirá filtros capacitivos de menor tamaño y, consecuentemente, de menor coste, para lograr la suficiente suavización en la onda y sea posible la operación en la red.

4.5.2 Esquemas de conexión

Una planta de generación undimotriz consistirá en la conexión de múltiples dispositivos para combinar la energía generada por cada uno. Para conseguirlo hay que tener en cuenta que generadores con diferentes frecuencias no podrán ser conectados juntos, así que la corriente de cada generador debe ser rectificadas a corriente continua a la salida de cada uno de ellos. Posteriormente, estas salidas independientes se conectan en un mismo bus en corriente continua, de modo que la potencia de salida es incrementada.

Así que podemos definir que una unidad de generación sería la formada por un generador y su equipo (electrónica de potencia, transformadores, etc.). La forma de transporte a la red onshore depende fundamentalmente del tamaño de la granja, distancia a la red y nivel de tensión. La generación de estas unidades puede ser transportada de diversos modos a tierra, obteniendo en cada uno de ellos ciertos beneficios e inconvenientes, por lo que vamos a analizar algunos casos posibles, [4.37].

Una primera conexión posible sería conectar cada unidad directamente a tierra, como en la Figura 4.50. De este modo la disponibilidad y fiabilidad obtenidas por el sistema son altísimas, pero en cambio, los costos sólo en la instalación del sistema también lo son.

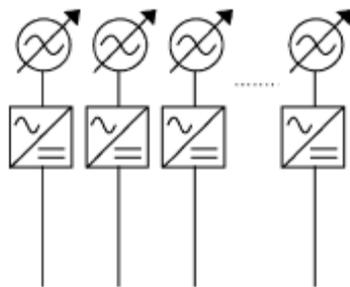


Figura 4.50: Conexión directa a tierra (a) [4.37]

La segunda posibilidad sería conectarlos todos a un mismo punto, y de este nodo transportar la energía a tierra, Figura 4.51. En este caso, nos encontramos con un sistema de muy poca fiabilidad, pues un solo fallo en el cable o sistema de transmisión y la generación del parque a se verá interrumpida, teniendo que hacer frente además a los costes asociados a tal interrupción. Por otro lado, es el esquema de menor coste de instalación, lo cual hace que esta opción sea de interés pero sin embargo existe un gran riesgo a asumir, como se comentó antes.

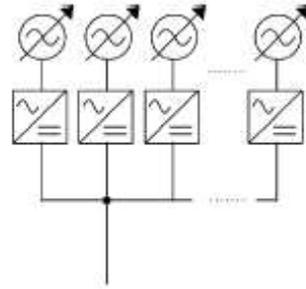


Figura 4.51: Conexión global a un solo cable (b) [4.37]

La tercera opción consiste en realizar agrupaciones de varios dispositivos (clúster) y llevar su energía a red con cables independientes para cada agrupación, como se observa en la Figura 4.52. Esta opción se trata de una solución intermedia entre las anteriores, ya que se resuelve el problema de la poca fiabilidad y disponibilidad del anterior, pero incurriendo en mayores costes de instalación. También se dota de redundancia en el cableado de transmisión a tierra desde la granja, por ello las posibilidades de interrupción en la generación son menores.

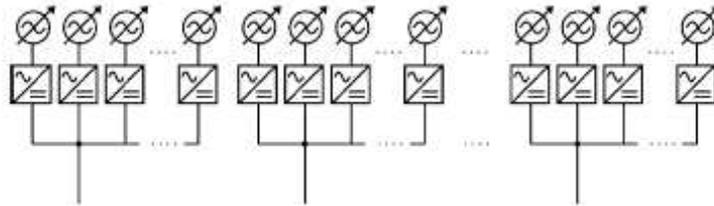


Figura 4.52: Varios grupos conectados independientemente a tierra (c) [4.37]

Una última cuarta opción en la conexión de los dispositivos sería la unión de los clústeres en un solo cable a tierra, de modo que los costos en materiales e instalación serán menores. En cambio se vuelve a perder en disponibilidad y fiabilidad del sistema, y la instalación se vuelve bastante compleja.

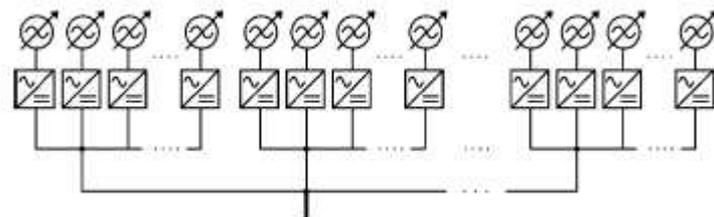


Figura 4.53: Varios grupos conectados en paralelo y un solo cable a tierra (d) [4.37]

Para comparar todas las opciones comentadas, se pueden representar cualitativamente éstas en una figura que enfrente coste con disponibilidad del sistema, Figura 4.54, y en una tabla comparativa, Tabla 4.9, donde se introducen de forma resumida las ventajas e inconvenientes que se obtienen con cada opción, además del tipo de granja preferente para su instalación. El riesgo del que se habla en la tabla se trata de un riesgo de incidente, es decir, si se instala un cable en zona con una densidad de transporte marítimo alto, existirá un riesgo alto.

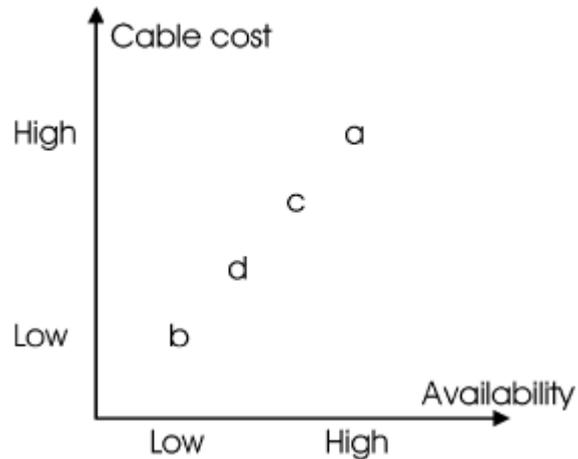


Figura 4.54: Coste vs disponibilidad en los esquemas de conexión [4.37]

Tabla 4.9: Tabla comparativa de los esquemas de conexión [4.37]

Concepto	Esquema (a)	Esquema (b)	Esquema (c)	Esquema (d)
	Muy alta disponibilidad	Muy bajo coste de instalación	Muy alta disponibilidad	Bajo coste de instalación
Ventajas	Pequeñas pérdidas Configuración muy simple	Mantenimiento simple		
Inconvenientes	Alto coste de instalación Necesaria conexiones onshore	Baja disponibilidad Puede implicar altas pérdidas	Necesarias conexiones onshore	Dificultad para encontrar faltas Sistema complejo
Preferencias	Granjas muy pequeñas cercanas a la costa	Granjas pequeñas con bajo riesgo	Granja grande con riesgo alto	Granjas grandes con bajo riesgo

4.6 Referencias

- [4.1] Osa Amilia J.L., Iturregi Aio A. (2010). "Selection of the Electrical Generator for a Wave Energy Converter". International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), España.
- [4.2] O'Sullivan D.L. and Lewis A.W. (2008). "Generator Selection for Offshore Oscillating Water Column Wave Energy Converters". 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)
- [4.3] ORECCA. WP3: Technologies state of the art. Task 3: Grid integration aspects
- [4.4] Sanz-Feito J. "Máquinas Eléctricas". ISBN: 84-205-3391
- [4.5] João Cruz. "Ocean Wave Energy. Current Status and Future Perspective". ISBN 978-3-540-74894-6

- [4.6] Mueller M., et al. (2007). "A novel Lightweight Permanent Magnet Generator for Direct Drive Power Take Off in Marine Renewable Energy Converters". Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.
- [4.7] "Chapter 6. Synchronous Machines". 48550 Electrical Energy Technology. University of Technology, Sydney Faculty of Engineering.
- [4.8] Página Web: <http://www.electric-motors-price.info/induction-motor/>
- [4.9] Hansen A.D., Michalke G. (2007). "Fault Ride-Through Capability of DFIG Wind Turbines". Renewable Energy 32, 1594-1610.
- [4.10] Singh M., Khadkikar V., Chandra A. (2011). "Grid Synchronisation with Harmonics and Reactive Power Compensation Capability of a Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Variable Speed Wind Energy Conversion System". IET Power Electron., Vol. 4, Iss. 1, pp. 122-130.
- [4.11] Brooking P.R.M., Mueller M.A. (2005). "Power Conditioning of the Output from a Linear Vernier Hybrid Permanent Magnet Generator for Use in Direct Drive Wave Energy Converters". IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 152, No. 5.
- [4.12] Ivanova I., et al. "Simulation of a 100kW Permanent Magnet Octogonal Linear Generator for Ocean Wave Conversion"
- [4.13] Mueller M. (2002). "Electrical Generators for Direct Drive Wave Energy Converters", IEEE.
- [4.14] Rhinefrank K., Prudell J., Schacher A.()2009 "Development and Characterization of a Novel Direct Drive Rotary Wave Energy Point Absorber". MTS-IEEE Oceans Conference Proceedings.
- [4.15] Torre-Enciso Y., et al. (2009). "Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality". Proceeding of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden.
- [4.16] Heath T.V. (2007). "The Development of a Turbo-Generation System for Application in OWC Breakwaters". Proceeding of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.
- [4.17] Torre-Enciso Y. (2006). "MUTRIKU Wave Power Plant: From Conception to Reality". CoM 37 – EUREC Agency. Bilbao.
- [4.18] Neumann F., et al. (2007). "Pico OWC Recovery Project: Recent Activities and Performance Data". Proceeding of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.
- [4.19] Falcão A. (2000). "The shoreline OWC Wave Power Plant at the Azores". Proceeding of the Fourth European Wave Conference, Aalborg, Denmark. Paper B1
- [4.20] Brito-Melo A., Neumann F., Sarmiento A.J.N.A. (2007). "Full-scale Data Assessment in OWC Pico Plant". Proceeding of the Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal.
- [4.21] Página Web: <http://www.seabased.com/>

- [4.22] Thorburn K., Bernhoff H., Leijon M. (2004). "Wave Energy Transmission System Concepts for Linear Generator Arrays". *Ocean Engineering* 31, 1339-1349, 2004
- [4.23] Rahm M., et al. (2010). "Offshore Underwater Substation for Wave Energy Converter Arrays". *IET Renew. Power Gener.*, Vol.4, Iss. 6, pp. 602-612.
- [4.24] Boström C., et al. (2009). "Design proposal of electrical system for linear generator wave power plants". 978-1-4244-4649-0/09 IEEE.
- [4.25] Clifton P.C.J., McMahon R.A., Kelly H-P. (2010). "Design and Commissioning of a 30kW Direct Drive Wave Generator".
- [4.26] Página Web: <http://www.tridentenergy.co.uk/>
- [4.27] Cameron L. et al. (2010). "Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter". 3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao.
- [4.28] Keysan O., et al. "C-Gen, a Lightweight Direct Drive Generator for Marine Energy Converters".
- [4.29] Página Web: <http://www.aquamarinepower.com/>
- [4.30] Thorburn K. and Leijon M. (2006). "Analytical and Circuit Simulations of Linear Generators in Farm". IEEE.
- [4.31] Thorburn K., Leijon M. (2007). "Farm Size Comparison with Analytical Model of Linear Generator Wave Energy Converters". *Ocean Engineering* 34, 908-916
- [4.32] Leijon M., et al. (2006). "An Electrical Approach to Wave Energy Conversion". *Renewable Energy* 31, 1309-1319.
- [4.33] Boström C., et al. (2009). "Experimental Results of Rectification and Filtration from an Offshore Wave Energy System". *Renewable Energy* 34, 1381-1387.
- [4.34] Página Web: <http://www.seewec.org>
- [4.35] Molinas M., et al. (2007). "Power Smoothing by Aggregation of Wave Energy Converters for Minimizing Electrical Energy Storage Requirements". *Proceeding of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.*
- [4.36] Garces A., et al. (2010). "Power Collection Array for Improved Wave Farm Output based on Reduced Matrix Converters", 2010
- [4.37] Thorburn K., Bernhoff H., Leijon M. (2004). "Wave Energy Transmission System Concepts for Linear Generator Arrays". *Ocean Engineering* 31, 1339-1349.