

# CHALMERS



## Diseño eléctrico de una boya para energía olamotriz.

SARA HOYA ARIJA

Departamento de Electricidad.  
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
Leganés, España 2011

Department of Energy and Environment  
*Division of Electric Power Engineering*  
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Göteborg, Sweden 2011

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO.....	1
SYSTEMA DE BOYA .....	2
CONTROL DE LA BOYA .....	3
GENERADOR DE POTENCIA .....	4
Conversion de energía: Sistemas eléctricos o hidráulicos.....	4
Generador lineal o rotórico .....	5
TECNOLOGÍA INTERFAZ: CONVERTIDORES .....	6
Dependiendo del generador y control de velocidad .....	6
Dependiendo de la red a la que se conecta.....	7
CONEXIONES A LA RED .....	7
Sistemas de conexión y transmisión.....	7
Esquemas de conexión .....	8
CABLES .....	9

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Boya.....	1
Figura 2. Esquema del diseño eléctrico de uan boya para energía olamotriz.....	2
Figura 3. Diferentes tipos de sistema de extracción de potencia de las olas .....	2
Figura 4. Sistema de boya arriba y abajo .....	3
Figura 5. Formas de onda de los diferentes tipos de control .....	3
Figura 6. Esquemas de conversión: a) eléctrico b) hidráulico.....	4
Figura 7. Generador rotórico y generador lineal .....	5
Figura 8. Esquema representación de un sistema.....	6
Figura 9. Distintos sistema de conexión dependiendo de al red, AC pura, AC/DC y DC pura ...	7
Figura 10. Ejemplos de distintas conexiones a al red.....	8
Figura 11. Ejemplos de distintos esquemas de conexión entre las boyas y estas a tierra.....	9
Figura 12. Gráficas comparativas de cables.....	10

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas de los generadores lineales y rotóricos.....	5
Tabla 2. Evaluación de los ejemplos de esquemas de conexión .....	9

## INTRODUCCIÓN

La energía olamotriz es el transporte de energía por las olas marinas, y la transformación de ésta en trabajo útil usado como por ejemplo, para la generación de electricidad, desalación o bombeo de agua.

Las olas marinas son causadas por el viento cuando sopla sobre el mar. Las olas son una poderosa fuente de energía. Se estima que la potencia global está alrededor de 8,000-80,000TWh/año (1-10TW), mismo orden de magnitud que el consumo de energía eléctrica mundial.

La energía olamotriz es producida cuando generadores eléctricos se colocan en la superficie del océano. La cantidad de energía extraída se determina por el peso, velocidad y longitud de la ola y densidad del agua.

El mayor problema es que no es tan fácil obtener esta energía y convertirla en electricidad en grandes cantidades.

La energía olamotriz tiene importantes ventajas:

- Es energía libre (no necesita combustible y no se producen desechos).
- No es cara de operar y mantener.
- Puede producir una gran cantidad de energía.

Pero también algunas desventajas y aspectos a tener en cuenta:

- Depende de las olas ( a veces se producirá mucha energía , otras casi nada).
- Algunos diseños son ruidosos.
- Una estación de energía olamotriz necesita poder soportar un tiempo climatologico duro, y también poder generar potencia de olas pequeñas.
- Necesidad de ser construido donde haya muchas y fuertes olas.

A día de hoy hay pocas plantas de generación en operación en el mundo. La primera planta comercial de energía olamotriz se situó en Portugal, en el Aguçadoura Wave Park, el cual consiste en tres dispositivos Pelamis de 750 kilovatios, y los principales países trabajando en el desarrollo de esta energía son Dinamarca, India, Irlanda, Japón, Noruega, Portugal, Holanda, Australia, UK y Usa.

## OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es diseñar todas las partes eléctricas necesarias para transformar la energía de las olas en potencia eléctrica. Para ello, algunos elementos esenciales tienen que ser diseñados:



Figura 1. Boya

- Control
- Generadores de potencia
- Convertidores: frecuencia de la ola y de la red
- Conexiones a la red
- Cables

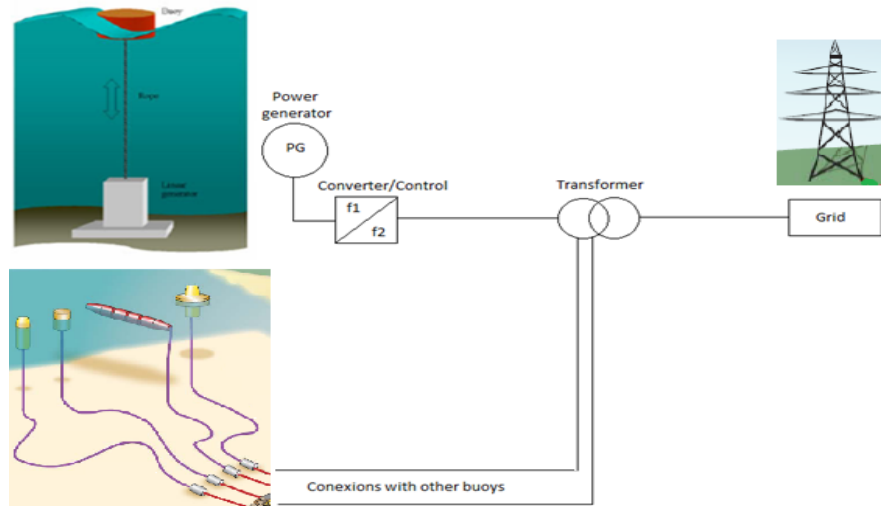


Figura 2. Esquema del diseño eléctrico de un buque para energía olamotriz

## SYSTEMA DE BOYA

Hay varios tipos de sistemas para extraer potencia que usan el movimiento arriba-abajo de las olas para generar energía. La mayoría de ellos tienen una boya que aprovecha este movimiento, pero hay otros como la “snake”, línea de tubos flotantes en la superficie del agua que se ondula al pasar las olas por él. En la figura 3 distintos modelos pueden ser vistos.

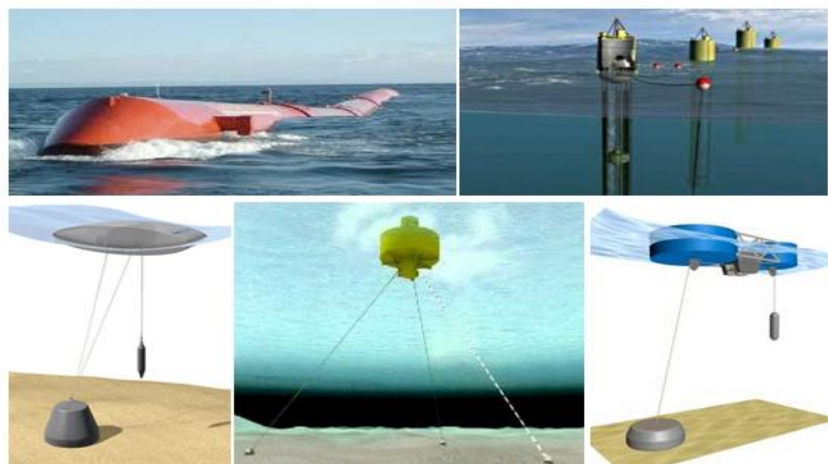


Figura 3. Diferentes tipos de sistema de extracción de potencia de las olas

Este proyecto se centra en el sistema de boya explicado en la figura 4.

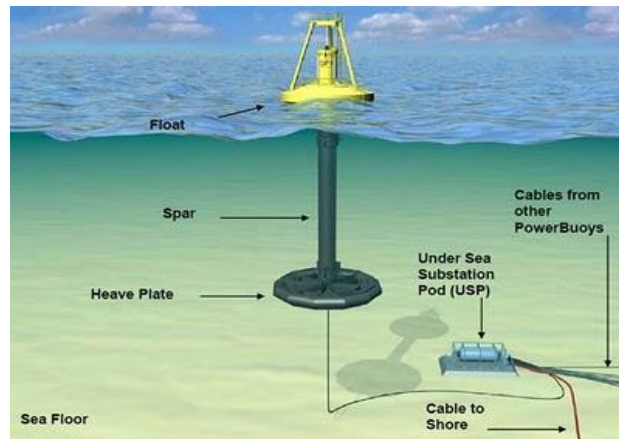


Figura 4. Sistema de boya arriba y abajo

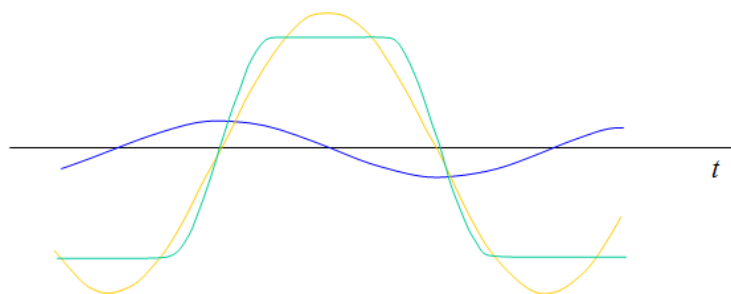
Este sistema trabaja teniendo una boya anclada al suelo del océano. Cuando las olas vienen, la parte de la boya que flota funciona como un pistón con la parte anclada, generando energía electro-mecánica. Pero hay varios tipos de sistemas y generadores usados para ello, y lo difícil es saber cuál es el mejor.

## CONTROL DE LA BOYA

La potencia extraída de los convertidores de energía puede verse aumentada controlando la oscilación para acercarse a una óptima iteración entre el convertidor de energía y la ola incidente. Esto evitará, en cierto modo, el inconveniente de tener picos en altas potencias, y también ayudará a mejorar significativamente el coste –eficiencia de los dispositivos.

Dos tipos de control de fase están siendo considerados tradicionalmente:

- **Control “Reactivo”**: Corresponde a la óptima interferencia de la ola. ( Control continuo)
- **Control “Latching”**: Teniendo en cuenta limitaciones físicas, corresponde a la interferencia sub-óptima de la ola. (Control discreto)



Wave and heave motion of power buoy

Optimal phase at resonance or by reactive control

Phase control by latching

Figura 5. Formas de onda de los diferentes tipos de control

Estudios muestran que una posible potencia máxima absorbida de 24 kW, 137 kW, o 172 kW para el caso sin control de fase, sub-óptimo control “latching”, y óptimo control “reactivo”, respectivamente, pueden ser estimados.

## GENERADOR DE POTENCIA

### Conversion de energía: Sistemas eléctricos o hidráulicos

Los sistemas hidráulicos y neumáticos son los más usados desde hace varios años para obtener energía, pero hoy en día las nuevas técnicas electromagnéticas y el desarrollo en esos materiales hacen que la obtención de energía con dispositivos eléctricos sea una opción a tener en cuenta.

En la figura 6 dos esquemas son mostrados: *a)* corresponde a un ejemplo de conversión eléctrica y *b)* a un ejemplo de conversión hidráulica.

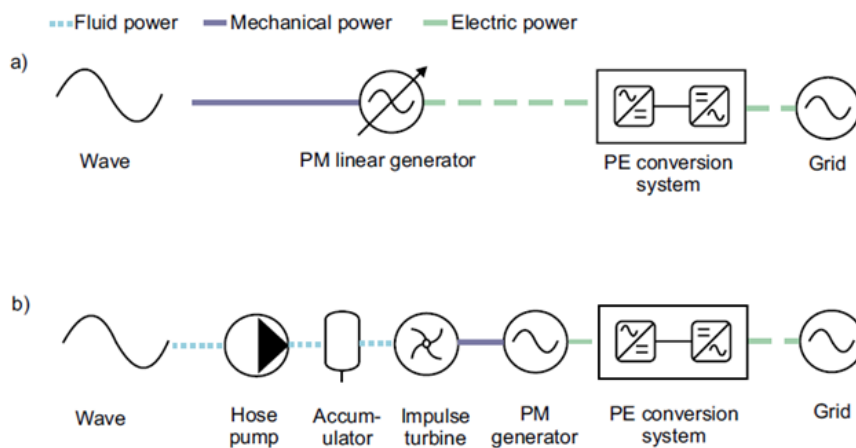


Figura 6. Esquemas de conversión: a) eléctrico b) hidráulico

Estudios han sido hechos comparando estos dos sistemas para ver los beneficios de uno sobre el otro, teniendo en cuenta también la construcción y operación de ambos. Los resultados obtenidos se resumen en:

- Aunque el coste de la máquina eléctrica es mayor que el del cilindro hidráulico, el coste general del todo el sistema de extracción de energía es similar.
- El sistema eléctrico es más eficiente que el hidráulico.
- El sistema hidráulico tiene una potencia de salida más suave.
- El sistema eléctrico no requiere tanto mantenimiento periódico como el hidráulico.

La conclusión genérica es que el sistema eléctrico ofrece más ventajas que el hidráulico y por ello el desarrollo de prototipos en este campo está justificado.

Actualmente, el nuevo desarrollo de generadores lineales en esta área está aumentando, obteniendo muy buenos resultados, pero no hay que olvidar que los generadores rotóricos son un campo muy amplio y muy desarrollado que también ofrecen ciertas ventajas.

## Generador lineal o rotórico

Para estos sistemas, dos tipos de generadores son comparados: generador lineal y rotórico, mostrados en la figura 7, donde también se puede apreciar otro caso con generador síncrono con un diodo rectificador y un convertidor DC/DC en vez del normal rectificador con transistores.

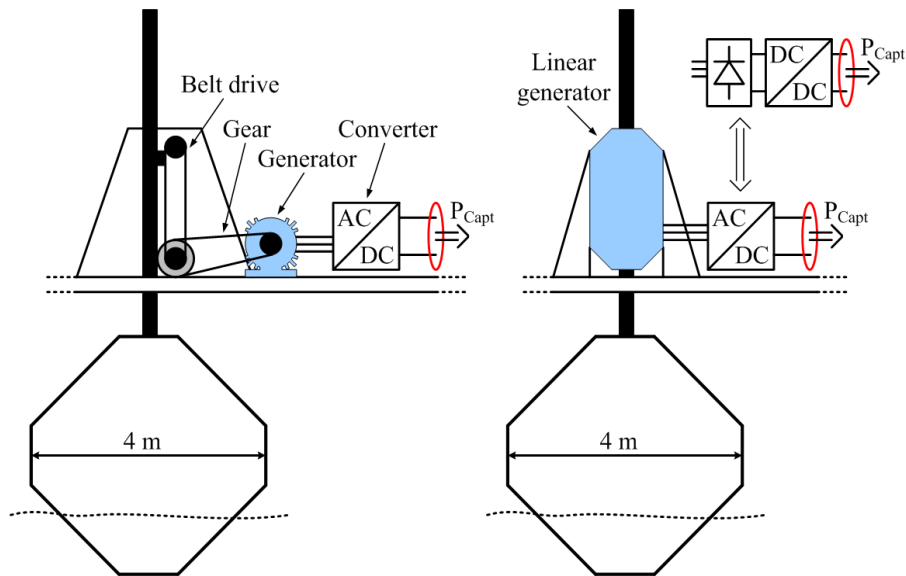


Figura 7. Generador rotórico y generador lineal

Las ventajas de ambos generadores en su uso para la energía olamotriz son comparados en la tabla 1.

Tabla 1. Ventajas de los generadores lineales y rotóricos

Ventajas del generador lineal:	Ventajas del generador rotórico:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No necesita engranajes ya que la boya esta directamente conectada con el pistón</li> <li>• Menor mantenimiento y con menor frecuencia</li> <li>• Condiciones de trabajo más fiables</li> <li>• Gran fuerza (dependiendo del tamaño y del convertidor)</li> <li>• Menos pérdidas del sistema como conjunto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El movimiento rotórico normalmente se ajusta a la velocidad óptima del generador a través de los engranajes.</li> <li>• <b>Mayor rendimiento del generador</b></li> <li>• <b>Menor coste</b></li> <li>• Mayor facilidad para aumentar el voltage inducido</li> </ul>

Es un proceso difícil saber cuándo usar un generador lineal o rotórico. Incluso si el generador lineal parece ser preferido en específicas aplicaciones debe ser diseñado, simulado y probado.

Los generadores lineales tienen obvias ventajas, pero estas ventajas pueden recaer sobre su alto coste, con lo que siguiendo un criterio de mayor eficiencia y menor coste, deberíamos inclinarnos por el generador rotórico.

## TECNOLOGÍA INTERFAZ: CONVERTIDORES

Una tecnología interfaz con potencia de electrónica se necesita para completar el generador dado que la boya está trabajando con velocidad variable y para producir corriente alterna o directa, según la red.

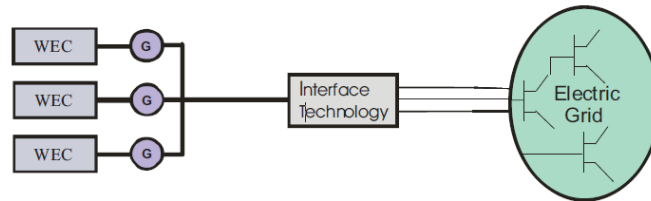


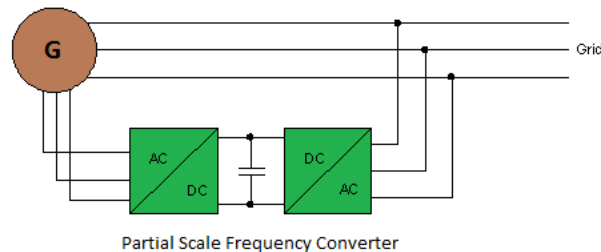
Figura 8. Esquema representación de un sistema

Esta conversión de energía puede ser hecha de varios modos dependiendo de la red a la que se conecta y las características propias del generador y de la red.

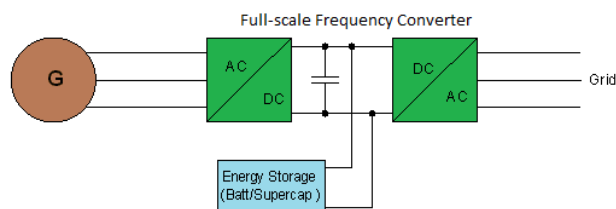
### Dependiendo del generador y control de velocidad.

Los tres modelos más usados son:

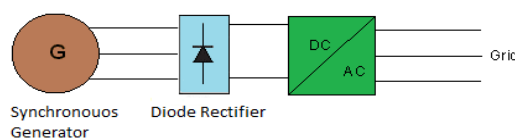
- Control parcial de la velocidad: la principal ventaja de este modelo es que no necesita convertidores caros de alta precisión.



- Control completo de la velocidad: en la red continua se puede añadir un dispositivo de almacenaje de energía, que puede ser usado para el control de flujo, pero esto conlleva convertidores de mayor calidad y precisión y por tanto más caros.



- Diodo rectificador: rectificador más común debido a su simplicidad, bajo coste y bajas pérdidas. El generador y el rectificador deben ser elegidos en combinación. Un diodo rectificador puede ser usado sólo con un generador síncrono.





## Dependiendo de la red a la que se conecta

En la figura 9 se pueden ver distintas conexiones: AC pura, AC/DC y DC pura.

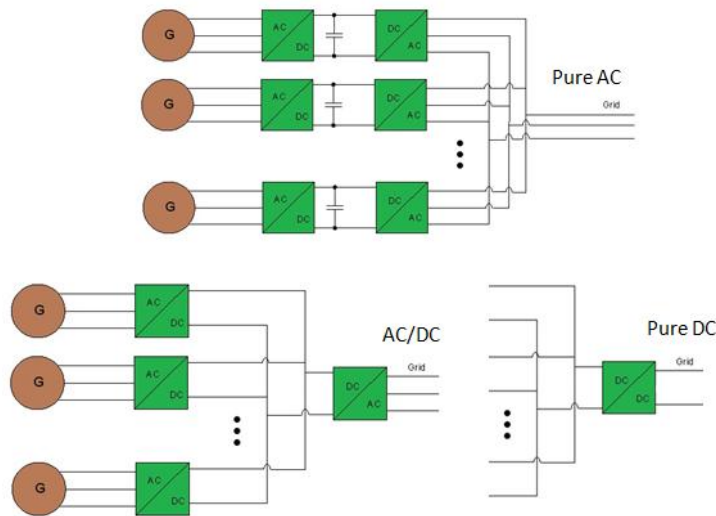


Figura 9. Distintos sistema de conexión dependiendo de al red, AC pura, AC/DC y DC pura

Para todas las conexiones de redes mostradas, los convertidores son los componentes que contribuyen más directamente al aumento del coste en la producción de energía, con un 7% hasta el 32% dependiendo del sistema, método de control y tipo de ola.

Comparando los sistemas de red puramente AC, puramente DC y AC/DC, se puede apreciar que los convertidores en el sistema de red pura AC, tienen mucha más contribución. El convertidor grande común para la plataforma de red DC/AC es más barato por kVA y eficiente que los pequeños convertidores para la plataforma de red AC, por lo que la plataforma de red AC es más cara que el sistema de DC/AC.

Cuando comparamos el sistema DC/AC con el de red DC, se puede apreciar que éste último es más barato. Esto se debe al hecho de que los convertidores DC/DC son más baratos y eficientes, pero hoy en día no es posible comprar estos convertidores >DC/DC a una compañía dado que todavía no están muy desarrollados.

El sistema DC/AC es el más común usado por las compañías.

## CONEXIONES A LA RED

### Sistemas de conexión y transmisión

En una planta, los convertidores de energía (unidades base) pueden ser conectados en grandes cantidades desde decimos a miles de convertidores individuales. Las conexiones de éstos con la red pueden ser realizadas de diversas formas, como por ejemplo las mostradas en la figura 10.

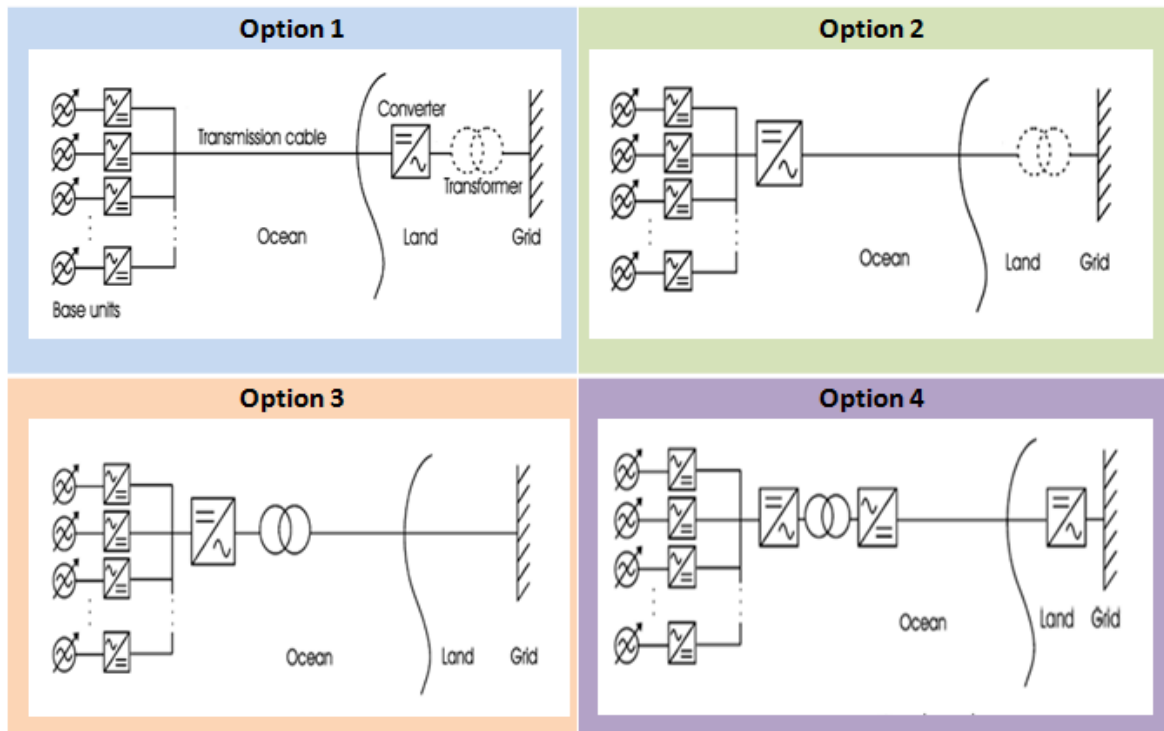


Figura 10. Ejemplos de distintas conexiones a al red

Cuanto menos convertidores sean situados en el agua mejor, ya que los sistemas con el convertidor en el mar (opción 2, 3 y 4), tienen un mantenimiento más complejo por ello, dependerán más de las condiciones meteorológicas y serán menos accesibles. En los sistemas con el transformador colocado en el océano (opción 3 y 4), las pérdidas resistivas de transmisión,  $I^2R$ , serán menores ya que el voltaje de transmisión será mayor y la corriente menor. En la opción 4 se incluye un dispositivo de alto voltaje HVDC, muy útil para la transmisión de grandes cantidades de potencia en largas distancias pero requiere equipo complejo para su instalación conllevando un alto coste aunque las pérdidas de transmisión son mínimas.

Mientras las opciones 1 y 2 son buenas para pequeñas estaciones situadas cerca de la costa, la opción 3 se prefiere para medianas o grandes estaciones con poca distancia a la costa y la opción 4 para grandes estaciones a distancias muy grandes de la costa.

### Esquemas de conexión

Hay muchas formas de conectar las unidades base entre ellas y con la red, como ejemplo, en la figura 11 se puede apreciar 4 esquemas de 4 casos posibles: un cable desde cada base unidad a tierra (a), un solo cable desde la estación a tierra (b), un cable desde cada subunidad (varias base unidad juntas) a tierra (c), y un solo cable desde las subunidades a tierra (d).

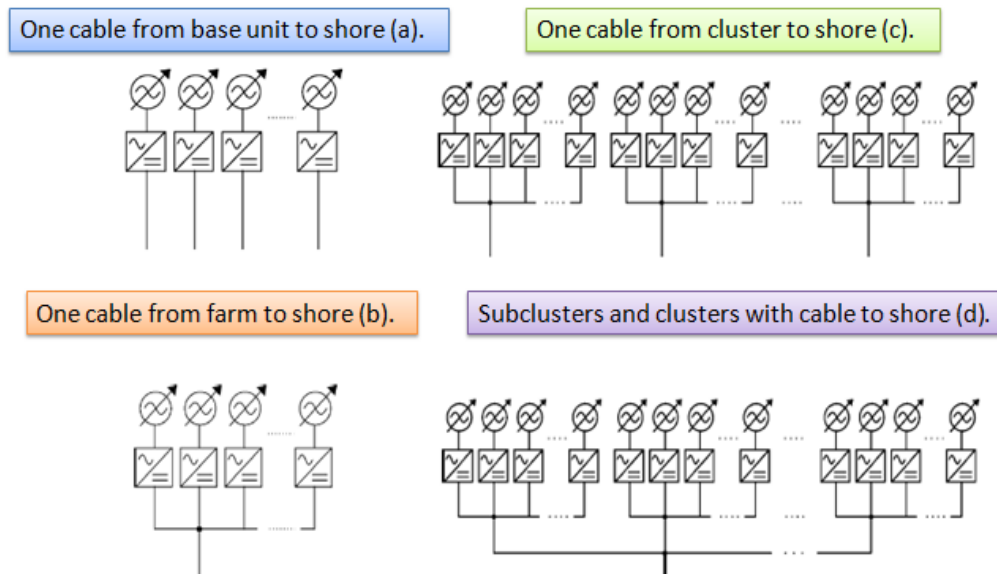


Figura 11. Ejemplos de distintos esquemas de conexión entre las boyas y estas a tierra

En la tabla 2 se indican los pros y los contras de los diferentes esquemas de conexión. El riesgo presentado en “Instalación” se refiere a riesgo de incidencia. Si un cable tiene que ser instalado en una zona de tráfico de barcos de pesca, por ejemplo, el riesgo será muy alto.

Tabla 2. Evaluación de los ejemplos de esquemas de conexión

	Esquema a	Esquema b	Esquema c	Esquema d
Pros	Disponibilidad y accesibilidad muy alta	Coste de instalación muy bajo	Disponibilidad y accesibilidad alta	Coste de instalación bajo
	Pocas pérdidas	Mantenimiento simple		
	Configuración Muy simple			
Contras	Alto coste de instalación	Disponibilidad y accesibilidad baja	Conexiones a tierra necesarias	Difícil encontrar fallos
	Conexiones a tierra necesarias	Muchos implica altas pérdidas		Sistema complejo
Instalación	Estaciones muy pequeñas cercanas a la costa	Estaciones pequeñas con bajo riesgo	Grandes estaciones con alto riesgo	Grandes estaciones con bajo riesgo

## CABLES

En los sistemas de convertidores de energía que son diseñados para estar en el agua, los cables son un importante componente, ya que pueden estar sumergidos. Pero no hay que olvidar que los cables conllevan costes, por lo que un análisis de su distribución en el sistema es muy beneficioso.

Para los sistemas analizados anteriormente, dependiendo de las conexiones a la red (opción 1, 2, 3 y 4) las pérdidas y la complejidad del sistema ha sido analizada y comparada, al

igual que para los esquemas de conexión (a, b, c y d), donde se ha comparado el coste del cable, tanto material como instalación, con la disponibilidad y la accesibilidad. El resultado se puede ver en la figura....

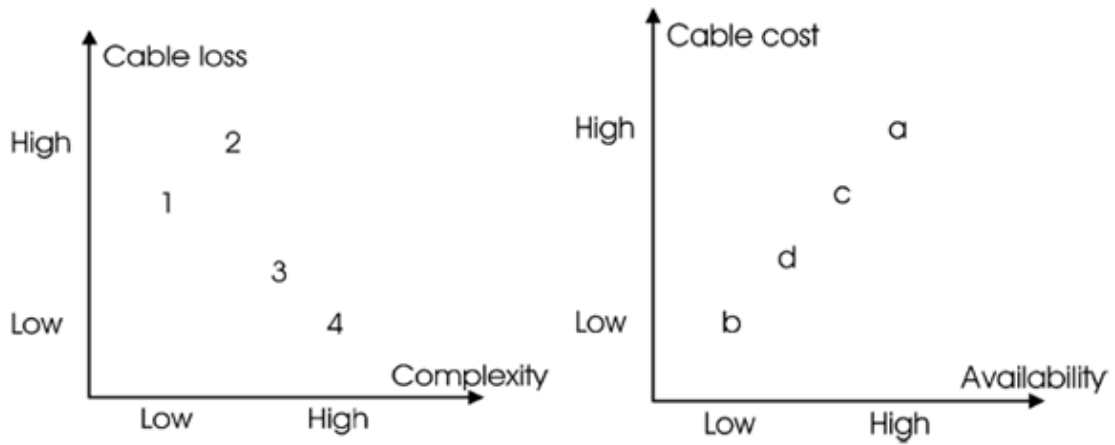


Figura 12. Gráficas comparativas de cables

El emplazamiento del transformador y los dispositivos electrónicos en tierra, conlleva más pérdidas, pero la complejidad aumenta al colocarlos en mar. Teniendo en cuenta los criterios de complejidad y pérdidas los mejores sistemas a elegir serían las opciones 1 y 3.

En la figura de la derecha podemos observar como los esquemas de conexión donde las unidades bases están conectados en un mismo punto que se une a tierra mediante sólo un cable tienen un coste menor, pero menor accesibilidad. Por lo que el mejor esquema sería algo intermedio como los esquemas c y d.