

**Desarrollo técnico de un dispositivo autónomo para
la instalación de cables eléctricos y de
comunicaciones submarino, con principal aplicación
en parques eólicos offshore**



Master en Energías Renovables: Generación Eléctrica

Trabajo Fin de Master

Jan Sellner

Directores del proyecto:

Miguel Garcia Solano (UPNA)

Antonio Rubio Rico (Tecnalia)

Pamplona, 19 de febrero de 2016



Summary:

An innovative concept for submarine cables installation is developed and its application to inter-array cables is evaluated economically. The state of the art in the installation of subsea power cables in offshore wind farms is first reviewed. The innovative concept for a remote-controlled submarine vehicle to install subsea cables is then presented.

The proposed system can significantly reduce or eliminate altogether the need for expensive specialist surface vessel. The dimensions and technical characteristics of the vehicle are specified based on the design requirements for the installation of inter-array cables in offshore wind farms.

Cost calculation based on publically available quotes show that if successfully implemented, this innovative concept could easily lead to a 50% reduction in the cost of the installation of inter-array cables in offshore wind farms, corresponding to a potential reduction of the order of 5% in the cost of energy.

Key words:

Offshore; wind energy; submarine; cable; installation; remote; vehicle; Inter array

Índice

1	INTRODUCCIÓN	5
2	DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA EÓLICO OFFSHORE Y ESTADO DEL ARTE EN LA INSTALACIÓN DE CABLES SUBMARINOS	7
2.1	COMPONENTES DE UN PARQUE EÓLICO OFFSHORE	7
2.1.1	Los aerogeneradores	7
2.1.2	Los cables de conexión entre los aerogeneradores (inter array)	7
2.1.3	La subestación offshore	9
2.1.4	La conexión eléctrica a la costa (cable export)	9
2.2	PROCESO ACTUAL DE LA INSTALACIÓN DE CABLES SUBMARINOS	11
2.2.1	Reconocimiento del terreno y planificación de la ruta	11
2.2.2	Barcos cableros y su equipamiento	11
2.2.3	Instalación de los cables submarinos del parque eólico offshore	15
2.2.4	Resumen del proceso actual de la instalación de cables submarinos	19
3	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DEL TRABAJO	20
4	ELECCIÓN DEL PROCESO DE INSTALACIÓN ÓPTIMO	21
4.1	ESCENARIOS POSIBLES EN LA INSTALACIÓN DEL CABLE CON EL VEHÍCULO SCARGO	22
4.1.1	Escenario 1: SCARGO I - Inter array cable hasta 3km	22
4.1.2	Escenario 2: SCARGO II – Inter array cable hasta 10km	22
4.1.3	Escenario 3: SCARGO III –cable export	23
4.1.4	Evaluación de la viabilidad de los tres escenarios	23
4.2	PROCESO DE INSTALACIÓN CON EL VEHÍCULO SCARGO II	23
4.2.1	Transporte de las bobinas de cable y del vehículo SCARGO II al parque	25
4.2.2	Conexión del cable a los aerogeneradores	26
4.2.3	Vuelta a la subestación	30
4.2.4	Operación de carga del cable en el vehículo	30
5	PARAMETRIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL VEHÍCULO SCARGO Y SU EQUIPAMIENTO	34
5.1	ELECCIÓN DE LOS CABLES Y DIMENSIONAMIENTO DE LA BOBINA DEL VEHÍCULO	34
5.1.1	Dimensionamiento de la bobina para el transporte de cable inter array con el vehículo SCARGO	34
5.1.2	Dimensionamiento de la bobina para el transporte de cable de transmisión a costa (cable export) con el vehículo SCARGO	39
5.2	DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS DEL VEHÍCULO	42
5.2.1	Sistema de propulsión	43
5.2.2	Dimensionamiento del tambor para el cable de potencia	50
5.2.3	Casco de suspensión	51
5.2.4	Equipo del enterramiento del cable	55
5.2.5	Sistema de tensionado del cable	57
5.2.6	Brazo de manipulación del cable	59
5.2.7	Transformador	60
5.2.8	Batería auxiliar para el desplazamiento	65
5.2.9	Sistemas de control, navegación y comunicación	66
5.2.10	Sistema de conexión entre el vehículo SCARGO y el cable de potencia	67

6	POSIBLES RIESGOS CAUSADOS POR EL CABLE ENERGIZADO	73
6.1	CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR LA BOBINA ENERGIZADA.....	73
6.2	RESUMEN.....	77
7	COMPARATIVA DE COSTES DE LA INSTALACIÓN ENTRE EL PROCESO INNOVADOR Y CONVENCIONAL	78
7.1	PROCEDIMIENTO	78
7.2	CÁLCULOS DE LOS COSTES DEL PROCESO INNOVADOR DE INSTALACIÓN CON EL VEHÍCULO SCARGO	78
7.2.1	<i>Cálculo de la inversión</i>	<i>78</i>
7.2.2	<i>Coste de operación</i>	<i>82</i>
7.2.3	<i>Costes de financiación y de seguros</i>	<i>84</i>
7.3	CÁLCULO DE LOS COSTES DEL PROCESO CONVENCIONAL DE INSTALACIÓN (CON BARCOS)	86
7.3.1	<i>Cálculo del coste de la inversión de los barcos PLEIJEL y MADSEN.....</i>	<i>89</i>
7.3.2	<i>Coste de operación del proceso de la instalación convencional.....</i>	<i>90</i>
7.3.3	<i>Coste de financiación y de seguros.....</i>	<i>91</i>
7.4	COMPARATIVA DE COSTES ENTRE LOS PROCESOS DE INSTALACIÓN CONVENCIONAL E INNOVADOR	92
7.4.1	<i>Reparto anual del tiempo de operación</i>	<i>93</i>
7.4.2	<i>Condiciones de enterramiento de cable</i>	<i>94</i>
7.4.3	<i>Coste fijo anual de la inversión.....</i>	<i>95</i>
7.4.4	<i>Costes operativos</i>	<i>95</i>
7.4.5	<i>Costes de los seguros del cable.....</i>	<i>95</i>
7.4.6	<i>Coste total anual de la instalación y coste por metro de cable</i>	<i>96</i>
7.5	ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS.....	96
7.5.1	<i>Distribución de tiempo operativo-inoperativo.....</i>	<i>98</i>
7.5.2	<i>Velocidad de enterramiento</i>	<i>98</i>
7.5.3	<i>Coste de inversión (CAPEX).....</i>	<i>98</i>
7.5.4	<i>Coste de la instalación por metro de cable.....</i>	<i>99</i>
7.6	IMPACTO ECONÓMICO DEL PROCESO INNOVADOR EN EL MERCADO DE LA INDUSTRIA EÓLICA OFFSHORE 100	
8	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	101
9	PATENTES	102
10	BIBLIOGRAFÍA	103

1 Introducción

El crecimiento de la población mundial y el calentamiento global está relacionado directamente con las emisiones de las energías fósiles. Con el objetivo de frenar el calentamiento y satisfacer la demanda creciente de energía muchos países están poniendo mayor hincapié que en el pasado en el desarrollo y el uso de las energías renovables.

En Europa y muchos otros países del mundo, la energía renovable ya juega un papel importante en la generación de energía eléctrica. Es la única alternativa para conseguir los objetivos de la Unión Europea respecto a las emisiones de CO₂. Para el año 2020 la UE ha fijado en un mínimo del 20 % el objetivo de generación de electricidad procedente de fuentes renovables y para 2030 lo sitúa por encima del 40%.

Actualmente la energía eólica terrestre contribuye en mayor manera a la generación de energía eléctrica renovable a nivel europeo y mundial. Eso es debido a que muchos países desde hace décadas están fomentando el desarrollo de esta tecnología. Hoy en día la energía eólica terrestre ha alcanzado un estado maduro y fiable y sus costes son muy competitivos en comparación con los costes de las energías fósiles.

Un inconveniente que plantea la explotación de la energía eólica terrestre es que la cantidad de emplazamientos para los aerogeneradores es limitada y actualmente los lugares con mejores recursos eólicos ya están ocupados en muchos países.

Es por esto que para poder incrementar la generación eólica terrestre, se están sustituyendo aerogeneradores de parques antiguos por una nueva tecnología más rentable (Repowering o repotenciación). Además cada vez hay más rechazo social a los parques eólicos en países desarrollados debido a aspectos medioambientales (sobre todo impacto visual y de ruido).

Estas son las razones por las que el énfasis en la generación de la energía eólica se desplaza cada vez más hacia el entorno offshore (marino), donde cuenta con mayores ventajas que la eólica terrestre.

En primer lugar el viento suele tener más fuerza, es más estable y se producen menos turbulencias y además la velocidad promedio anual sobre el mar está un 90% por encima de la velocidad promedio terrestre. Todo esto resulta en una mayor generación de electricidad por aerogenerador que en los emplazamientos terrestres [1].

En segundo lugar, existe mucha más superficie explotable sobre el mar que en tierra y hay una mejor aceptación social dado que los parques marinos no suelen molestar ni acústicamente ni visualmente.

Aun teniendo en cuenta todas las restricciones legales existentes para los emplazamientos offshore y excluyendo sitios de profundidades superiores a 50 metros los recursos disponibles de energía offshore se estiman en 3.000TWh, considerando solo Europa. Esto corresponde aproximadamente con un 60% de la demanda de la energía estimada para todo Europa en 2030 [2].

Una de las mayores desventajas de los parques eólicos offshore es su distancia hasta la costa y la falta de una infraestructura eléctrica en el mar; como consecuencia de ello el coste de la generación de la energía eólica offshore es hoy en día aproximadamente el doble que en la energía eólica terrestre.

Estos inconvenientes se pueden compensar en el largo plazo con la disposición de mejores condiciones de viento y una mayor superficie de emplazamientos disponible. Muchos países de la Unión Europea actualmente están intensificando sus esfuerzos en el sector de la energía eólica offshore para conseguir reducir sus costes y así mejorar su competitividad frente a las energías fósiles.

En la Figura 1-1 se muestra el coste de los diferentes componentes de la inversión necesaria para la construcción de un parque eólico offshore. Aproximadamente un 20% del coste de la inversión corresponde a las instalaciones eléctricas; únicamente el coste de la instalación de los cables submarinos para evacuar la energía a tierra (cables export) supone un 5% y la instalación de los cables de conexionado entre aerogeneradores (cables inter array) alcanza el 4% de toda la inversión.

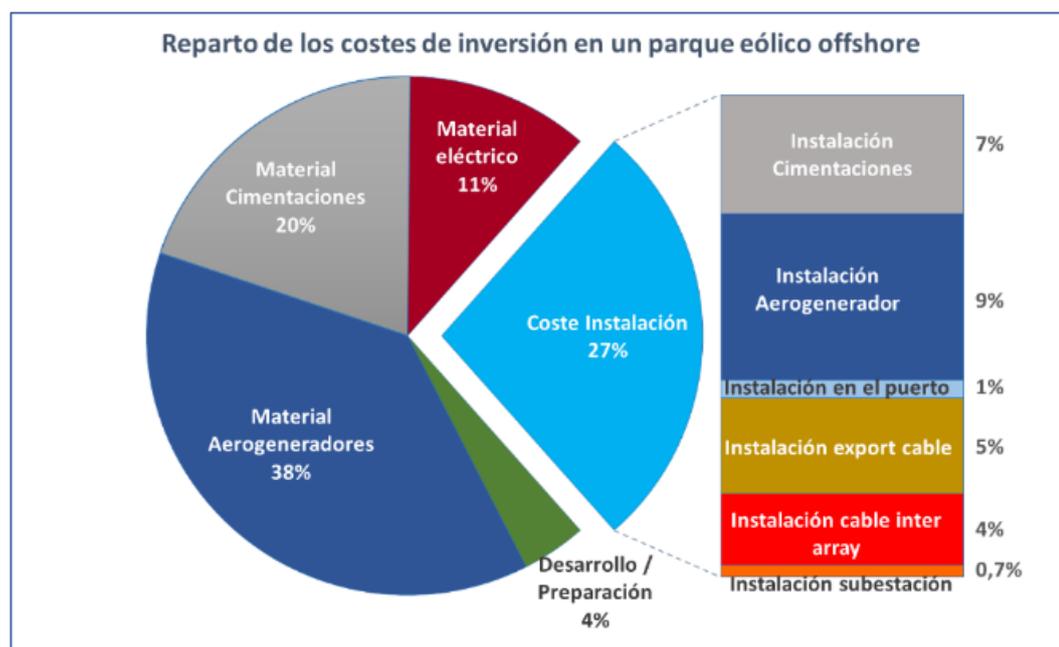


Figura 1-1: Reparto de los costes de inversión en un parque eólico offshore [3]

Actualmente la instalación de los cables submarinos se realiza mediante barcos cableros acompañados de barcos auxiliares, lo que supone un alto coste tanto de inversión como operativo (tripulación). Los trabajos de la instalación de los cables únicamente se pueden realizar con buenas condiciones meteorológicas y pueden sufrir retrasos importantes debidos a periodos de mal tiempo.

El objetivo de este trabajo es realizar un diseño técnico y un análisis de la viabilidad económica de un proceso innovador para la instalación de cables submarinos mediante un vehículo de operación remota, que puede contribuir a una reducción de los costes de generación de la energía eólica offshore y que permite trabajar con condiciones meteorológicas adversas.

2 Descripción de un sistema eólico offshore y estado del arte en la instalación de cables submarinos

2.1 Componentes de un parque eólico offshore

Un parque eólico se compone principalmente de un conjunto de aerogeneradores, una o varias subestaciones de transformación de electricidad en el mar, una subestación en tierra y las conexiones eléctricas entre todos los elementos como muestra la Figura 2-3.

2.1.1 Los aerogeneradores

Los aerogeneradores están montados sobre una cimentación que realiza su fijación al fondo del mar, así como una pieza de transición que se monta encima de la cimentación y sobresale del agua. Sobre esa pieza se instala la torre y el resto de la estructura del aerogenerador, Figura 2-2.

Cada aerogenerador está equipado con un transformador para convertir a media tensión (33kV o 66kV) la energía que sale del generador.

2.1.2 Los cables de conexión entre los aerogeneradores (inter array)

Por lo general, los aerogeneradores están conectados entre sí en líneas radiales que terminan en una subestación offshore. La conexión entre los aerogeneradores se realiza mediante cables submarinos de media tensión de entre 33kV y 66kV llamados cable inter array. Una diseño de un cable de potencia trifásico submarino (media o alta tensión) se muestra en la Figura 2-1.

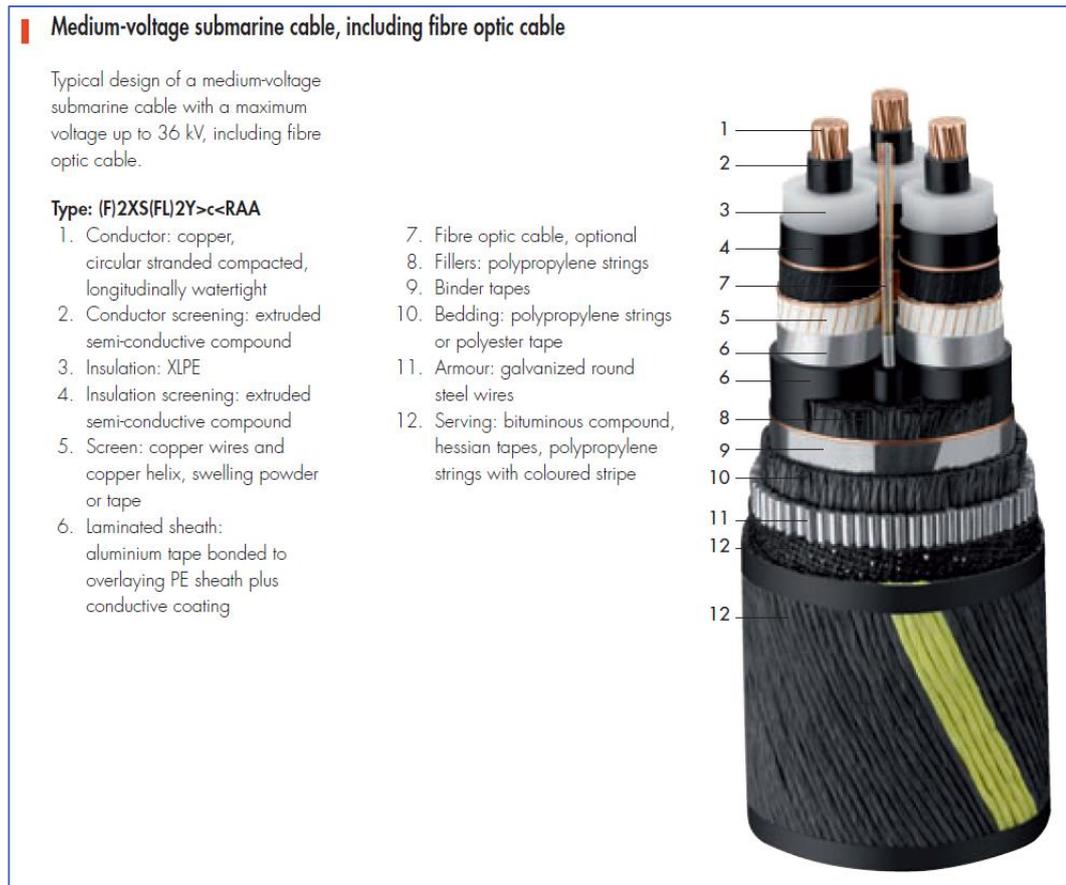


Figura 2-1: Elementos de un cable submarino trifásico de media tensión [4]

Los radiales suelen estar conectados a una subestación offshore también vía cable inter array.

Cada aerogenerador (excepto el último de cada radial) está conectado con dos cables inter array, uno entrante y uno saliente, ver Figura 2-2. Los cables que suben al aerogenerador están protegidos por tubos que se llaman J-tubes. Su nombre viene de la forma del tubo que recuerda a la letra “J”. Los “J-tubes” suelen estar fijados de forma vertical en el exterior del aerogenerador. El J-tube estabiliza y protege el cable de las fuerzas del mar y otros objetos flotantes o suspendidos. Adicionalmente sirve como sujeción del cable en su recorrido hacia el aerogenerador.

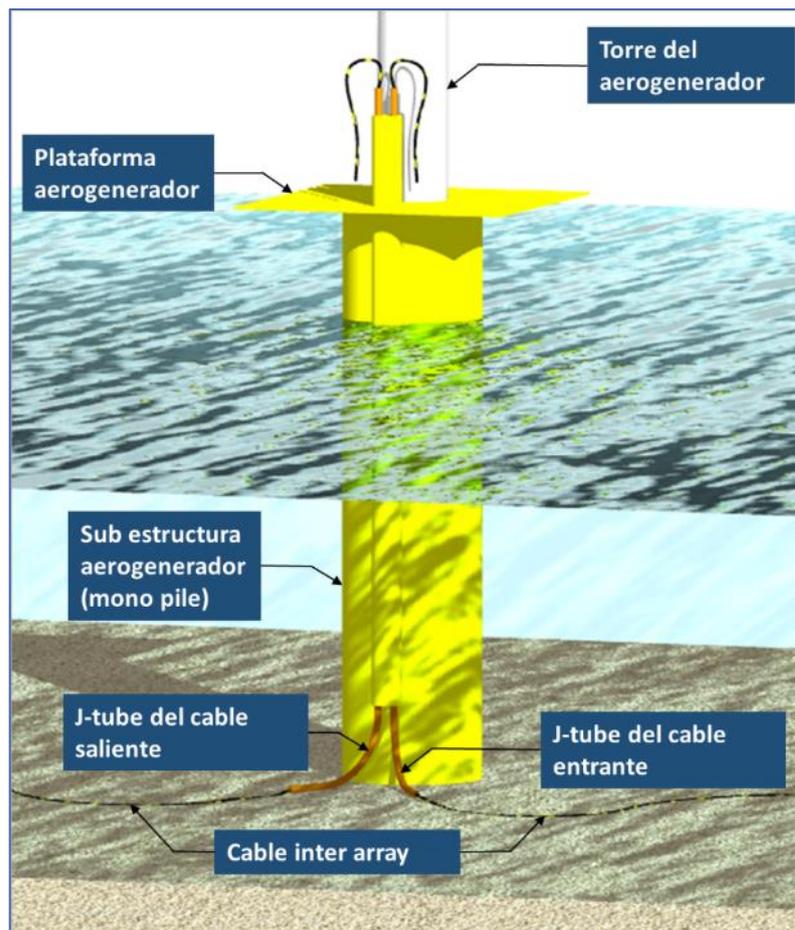


Figura 2-2: Cables inter array y "J-tubes" en la estructura de un aerogenerador offshore

Dependiendo del grado de erosión (Scour) que exista en el fondo del mar en las cercanías de las cimentaciones, los J-tubes pueden estar equipados con una extensión horizontal para proteger los cables de las fuerzas de esa erosión y mantenerlos en posición.

2.1.3 La subestación offshore

La subestación offshore transforma la energía que llega de los aerogeneradores de media a alta tensión. La energía transformada puede ser de tensión alterna o de tensión continua dependiendo de la distancia del parque a la costa.

2.1.4 La conexión eléctrica a la costa (cable export)

La evacuación de la energía del parque a la costa se realiza mediante uno o varios cables submarinos de alta tensión llamados cables export. La cantidad de cables export a instalar hasta la costa depende de la potencia del parque, del valor y del tipo de la tensión (alterna o continua) y del grado de redundancia (disponibilidad frente a fallos).

El transporte con corriente alterna tiene pérdidas dependiendo de la frecuencia y del dieléctrico de aislamiento del cable. Estas pérdidas son proporcionales a la longitud del cable. En caso de optar por una evacuación en corriente continua, hay que tener en cuenta que la transformación a continua se realiza con convertidores de electrónica de potencia que requieren una inversión considerablemente más alta comparada con la evacuación en corriente alterna. A partir de una cierta distancia, que actualmente se

encuentra entre 50 y 100 Km, las pérdidas de energía por el cable superan los costes de la inversión requerida para una transformación a corriente continua y por ello se justifica el uso de la tecnología de transmisión en corriente continua.

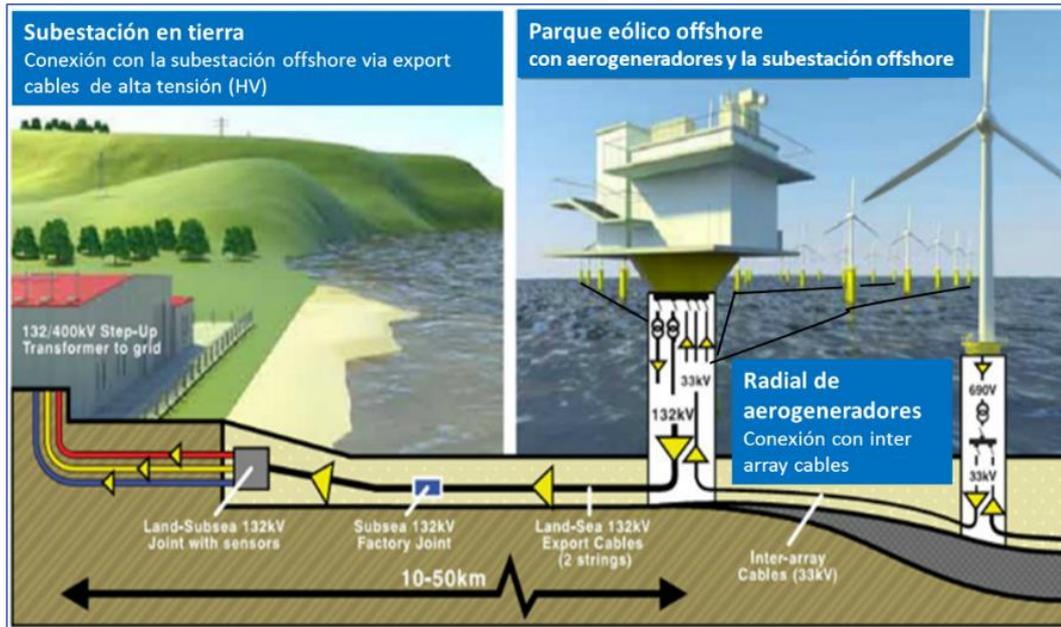


Figura 2-3: Esquema eléctrico de las conexiones de un parque eólico offshore [5]

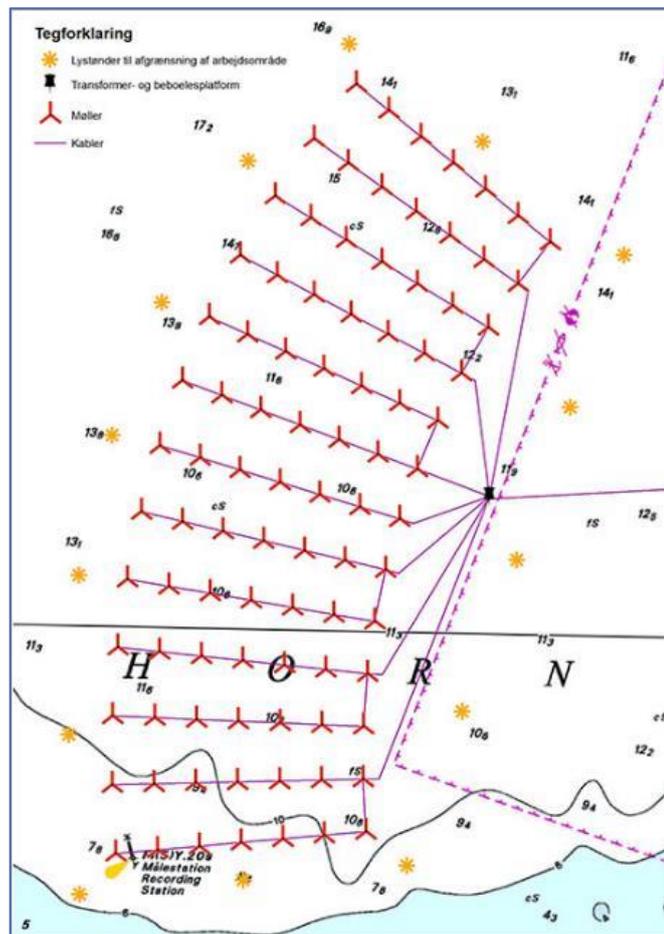


Figura 2-4: Plano del parque eólico Horns Rev en el mar del Norte [6]

2.2 Proceso actual de la instalación de cables submarinos

En este apartado se explica en detalle el estado del arte actual en el proceso de instalación de los cables submarinos en los parques eólicos offshore.

2.2.1 Reconocimiento del terreno y planificación de la ruta

Antes del comienzo de la instalación se realizan varias tareas como la exploración del fondo marino con batimetría, así como pruebas y ensayos del suelo que determinan el modo de enterramiento a emplear. Además se miden las condiciones meteorológicas del mar como corrientes, mareas, oleajes, temperatura del agua, condiciones de congelación y las condiciones atmosféricas como el viento, la humedad y la temperatura. Adicionalmente se debe tener en cuenta la legislación medioambiental de la zona que puede restringir el método del enterramiento a emplear.

Una vez obtenida toda la información del emplazamiento se diseña la ruta que deben seguir los cables tratando de optimizar el coste y tomando en consideración la seguridad de los trabajos del enterramiento.

2.2.2 Barcos cableros y su equipamiento

Para la instalación de los cables inter array y de los cables export es necesario realizar su transporte y colocación en el fondo del mar con alta precisión de posicionamiento. Normalmente el cable debe ser enterrado a una profundidad que oscila entre 1 y 3 metros para protegerlo de los daños que pueden causar las anclas de barcos y las actividades relacionadas con la pesca.

Actualmente los trabajos de transporte, colocación y enterramiento de cables se realizan mediante barcos cableros que tienen equipamientos especiales para el manejo de los mismos y que disponen de sistemas de navegación y propulsión sofisticados que garantizan un correcto posicionamiento del barco a lo largo la trayectoria de la instalación del cable.

La Ilustración 2-1 muestra el equipamiento principal necesario en un barco cablero.

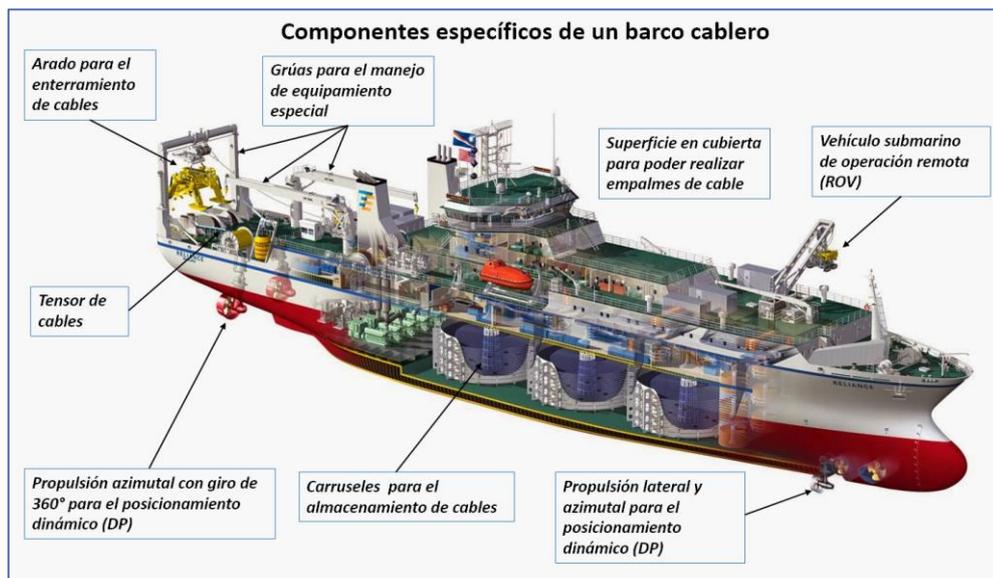


Ilustración 2-1: Esquema de un barco cablero [7]

2.2.2.1 Arado para el enterramiento del cable

Un arado realiza los trabajos de abrir una zanja en el fondo del mar y suele ser arrastrado por el barco cablero. En muchos casos el arado realiza las actividades de colocación y de enterramiento del cable simultáneamente, como se puede ver en la Ilustración 2-2 y en la Ilustración 2-3.

Existen variantes de arados que disponen de eyectores de agua a presión situados en la espada del arado que facilitan la apertura de la zanja y reducen así la fuerza de tracción y/o pueden aumentar la velocidad de enterramiento.



Ilustración 2-2: Arado para el enterramiento de cables submarinos [7]

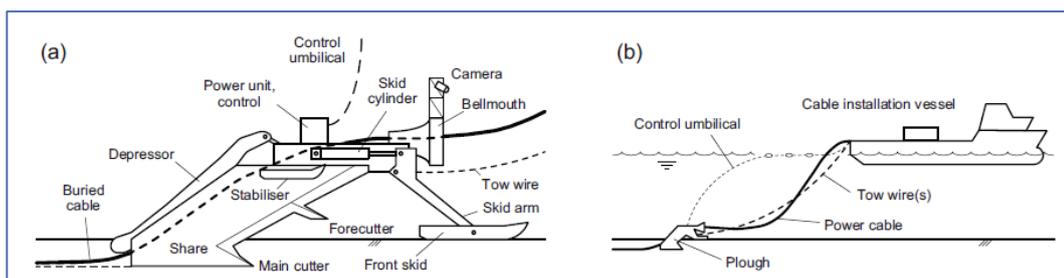


Ilustración 2-3: Componentes principales de un arado (a) y el proceso del enterramiento con un barco cablero (b) [8]

2.2.2.2 Almacenamiento de cables

Principalmente existen dos sistemas diferentes de almacenamiento de cable, que son los sistemas de almacenamiento estáticos y los sistemas giratorios. En la Figura 2-5 se muestran los diferentes sistemas empleados actualmente.

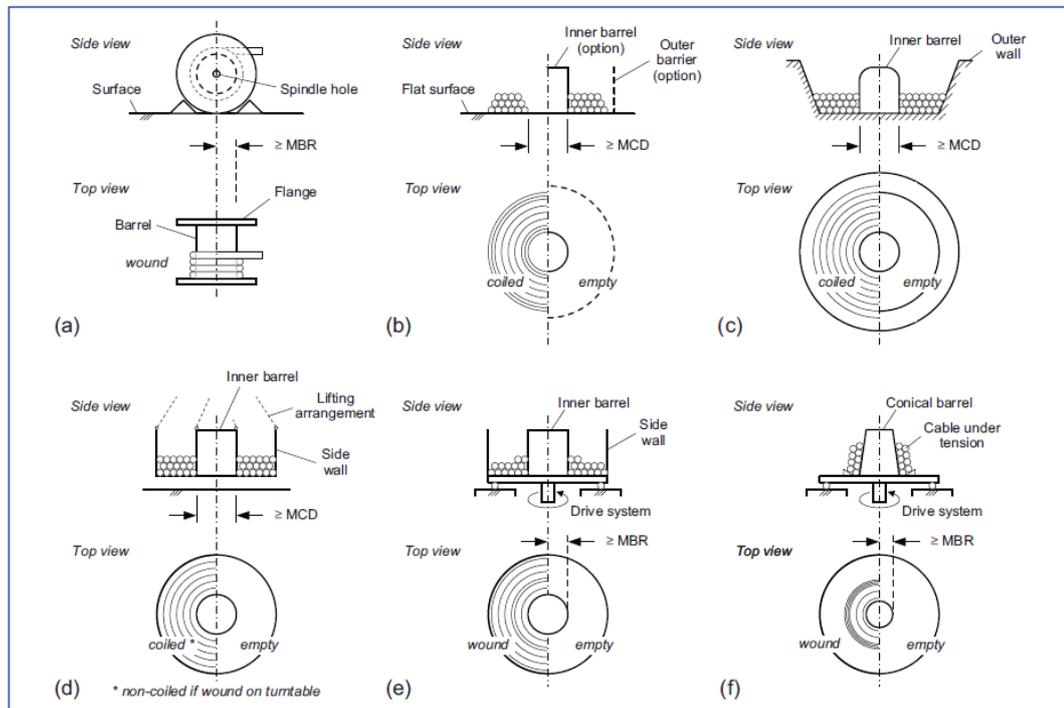


Figura 2-5: Diferentes opciones de almacenamiento de cables en barcos cableros, (a)- torno enrollador vertical, (b),(c) y (d) – tambores horizontales estáticos, (e) carrusel giratorio que apila horizontalmente, (f) - carrusel giratorio que apila verticalmente [8]

En el almacenamiento de cables submarinos se utiliza la variante (a) para pesos, diámetros y longitudes de cables relativamente pequeños, las variantes (b) hasta (d) se usan para cables de diámetros medianos y las variantes (e) y (f) para cables de diámetros grandes y longitudes elevadas.

Almacenamiento en tambor - variantes (a), (b), (c) y (d)

Se utiliza el almacenamiento en tambores cuando el cable es relativamente flexible, lo que implica que su radio mínimo de curvatura es menor mientras que el diámetro exterior y el peso específico del cable no son muy grandes.

En las variantes (b), (c) y (d) en el proceso de bobinado en el tambor se emplea una torsión por vuelta de cable que es inversa y de igual valor a la que se genera en el proceso del desbobinado. De esta manera se evita la formación de lazos y nudos.

Almacenamiento en carrusel – variantes (e) y (f)

Un carrusel es un tambor giratorio que se usa para el almacenamiento de cables de gran diámetro y peso. El bobinado y el desbobinado se realizan con una guía móvil que coloca el cable sin tensión en el carrusel y que gira a una velocidad sincronizada con el avance del cable. Se distinguen dos variantes de apilamiento: en espirales horizontales (e), ver Ilustración 2-4 o en espirales verticales (f).

De esta forma se almacenan actualmente longitudes de hasta 70 Km de cables de potencia de alta tensión con un diámetro que puede alcanzar los 400 mm. El peso de una bobina puede ser aproximadamente de 7000 toneladas.



Ilustración 2-4: Carrusel para el almacenamiento de cables de potencia [9]

2.2.2.3 Tensor de cables

El tensor de cables es necesario para ajustar la tensión del mismo de forma que la colocación del cable en el fondo del mar se haga a la tensión óptima. La Ilustración 2-5 muestra su posición en el barco, queda situado entre el carrusel (o tambor) y la salida del cable por la borda del barco.

Una explicación detallada de la necesidad del nivel de pretensado se encuentra en el apartado 5.2.5

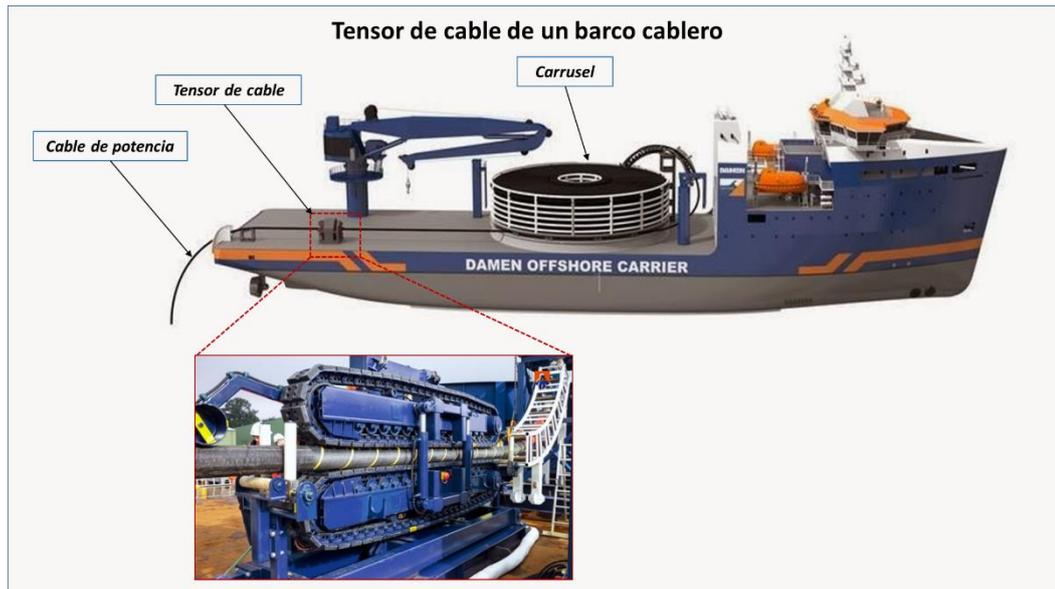


Ilustración 2-5: Tendido del cable [7]

Para la gestión de los trabajos de corte, colocación y enterramiento del cable submarino el barco necesita una tripulación experimentada y un equipo de técnicos que pueden alcanzar más de 60 personas. Se requiere además del barco cablero uno o varios barcos auxiliares que se encargan de ejecutar trabajos de anclaje, observación con buzos y desplazamientos del personal de los barcos.

2.2.3 Instalación de los cables submarinos del parque eólico offshore

2.2.3.1 *Procesos del tendido del cable*

Existen diferentes procesos del tendido y enterramiento del cable.

Tendido y enterramiento a la vez

En la mayoría de las instalaciones de cables submarinos se opta por un proceso que combina la colocación y el enterramiento del cable al mismo tiempo. Un arado arrastrado por el barco cablero abre una zanja en el fondo del mar en la que acto seguido se coloca el cable. La complicada coordinación de este proceso, incluyendo paradas y ajustes, da como resultado una velocidad de avance muy baja que suele estar por debajo de 0,5 metros por minuto.

También hay procesos de enterramiento con vehículos de operación remota, por ejemplo el CBT 1100 [10] que ejecuta los trabajos de colocación y enterramiento del cable moviéndose por el fondo del mar. Estos vehículos necesitan del barco cablero para su abastecimiento eléctrico. El barco lleva el cable de potencia que posteriormente se traspa al vehículo de operación remota que lo coloca en el fondo del mar [11].

Tendido y enterramiento de forma independiente

Otra variante del proceso consiste en repartir los trabajos de enterramiento y colocación del cable en dos pasos que se realizan de forma independiente. En un primer paso se coloca el cable mediante un barco cablero con un sistema de posicionamiento dinámico (DP), ver apartado 2.2.3.2. En un segundo paso un vehículo de operación remota ejecuta el enterramiento del cable, por ejemplo usando el sistema de Capjet de Nexans; el enterramiento se realiza de forma completamente independiente del primer paso [12].

La decisión de que variante de las anteriores se aplica en cada caso depende mucho de las características del fondo del mar y también de la tecnología accesible a la empresa instaladora del cable.

2.2.3.2 *Posicionamiento del barco cablero*

Para el proceso de colocación del cable submarino en el fondo del mar y la realización de las conexiones a los aerogeneradores y las subestaciones, se exige que el barco cablero tenga un sistema de posicionamiento de alta precisión (error de posición menor de un metro). Existen dos tipos de posicionamiento que se detallan a continuación:

Posicionamiento mediante anclajes

El método tradicional consiste en mover el barco mediante cables que están fijados en el fondo del mar con anclas y utilizando como apoyo varios barcos auxiliares. Este sistema solo permite al barco moverse pocos metros en cada dirección. Cada vez que el barco cablero recorre ciertos metros posicionando el cable, ha de parar el proceso para que los

barcos auxiliares lo reposicionen de nuevo y para ello los barcos auxiliares tienen que mover los anclajes en la dirección correspondiente y después el barco cablero puede continuar colocando cable.

Este proceso es muy lento y costoso en términos de operación e inversión. Además requiere una buena coordinación entre los barcos para realizar movimientos simultáneos.

Posicionamiento dinámico (DP)

Un barco que está equipado con este sistema es capaz de mantener su posición o rumbo con un error por debajo de un metro (suelen ser pocos centímetros) y es capaz de compensar los efectos meteorológicos como oleaje, viento y corrientes. Existen varios tipos de posicionamiento dinámico. En el sector de las instalaciones offshore se suelen utilizar barcos de clase DP2 que incorporan una redundancia de cada elemento del sistema que garantiza el funcionamiento del posicionamiento del barco en caso de fallo de uno de sus elementos.

El sistema de posicionamiento dinámico tiene los siguientes componentes:

Sistemas de medición de la posición

Sistemas que miden la posición del barco de forma diferencial comparando la misma con puntos fijos o un mapa o bien mediante el sistema de triangulación, algunos ejemplos son:

- Posicionamiento por satélite: GPS o/y GLONASS
- Sistemas ópticos con Laser
- Radar
- Sistemas hidro-acústicos

Sistemas de medición de las fuerzas externas

Las fuerzas externas tienen su origen en las condiciones meteorológicas como el oleaje, las corrientes marinas y el viento, así como en las fuerzas de reacción debido a la realización de los trabajos de enterramiento. Para su medición se utilizan unidades de posición por inercia (IMU) que incluyen varios acelerómetros y giroscopios.

Equipos de propulsión y de posicionamiento

Son los sistemas que generan la propulsión necesaria para seguir el rumbo y compensar el abatimiento causado por las fuerzas externas. Estos sistemas suelen ser propulsores azimutales en forma de hélices o de chorros de agua. Dependiendo de la masa del barco los propulsores tienen que ser muy potentes y rápidos en su accionamiento. El consumo de energía de un barco se incrementa de manera considerable utilizando el sistema de posicionamiento dinámico DP.

2.2.3.3 Proceso detallado de la instalación del cable inter array

Se ha hecho un análisis detallado del proceso de la instalación del cable inter array en parques eólicos offshore, que como hemos comentado es realizado con barcos cableros [13].

La Tabla 2-I muestra todo el proceso de la instalación de cables inter array entre aerogeneradores o entre una subestación y un aerogenerador.

PROCESO DE INSTALACION DE INTER ARRAY CABLES		
Proceso convencional con barcos cableros		
Paso	Nº	Secuencia detallada
Movilización	1	Un barco cablero y un barco auxiliar con buzos se desplazan al puerto de operación.
Preparación (en el puerto de operación)	2	En el puerto de operación el cable está bobinado en el carrusel del barco cablero.
	3	El barco está preparado y equipado con los sistemas de enterramiento necesarios para la operación.
Desplazamiento hacia el parque eólico	4	El barco cablero y el barco auxiliar se desplazan desde el puerto hacia el parque eólico offshore (a la subestación o al primer aerogenerador).
Conexión del cable en la subestación o en un aerogenerador	5	El barco cablero y el barco auxiliar con buzos se posicionan cerca de la subestación offshore.
	6	En la cubierta del barco cablero, el final del cable de potencia se equipa con un cabezal y balizas que facilitan su conexión a un cable guía auxiliar o messenger. Con la ayuda de buzos se baja del barco el final del cable de potencia y se coloca en la superficie del agua cerca del J-tube correspondiente de la subestación, ver Figura 2-6b.
	7	Con la ayuda de buzos el final del cable messenger colocado en la salida del J-tube se sube a la superficie y se conecta al cabezal del cable de potencia, Figura 2-6b.
	8	Desde la subestación se pasa el cable messenger y el cable de potencia por el interior del J-tube, ver Figura 2-6c.
	9	En la subestación se realiza la conexión del cable de potencia a la celda de media tensión correspondiente.
	10	Desde el barco cablero se comienza el proceso de enterramiento del cable de potencia para llevarlo desde la subestación hasta los aerogeneradores, ver Figura 2-6d.
	11	Se repiten los pasos 5 a 10 para todas las conexiones de cable inter array en el parque eólico offshore.
Desplazamiento hacia el puerto de operación	12	El barco cablero y el barco auxiliar van al puerto de operación.
Desmovilización	13	Los barcos cableros y la tripulación se dirigen desde el puerto de operación a su punto de partida original.

Tabla 2-1: Instalación de inter array cables utilizando el proceso convencional con barcos cableros

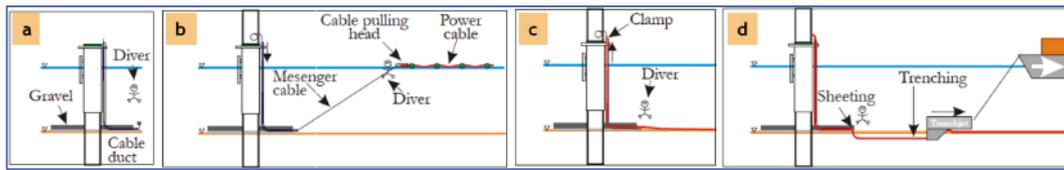


Figura 2-6: Proceso actual de la conexión del cable de potencia al aerogenerador o subestación vía J-tube [13]

2.2.3.4 Proceso de la instalación del cable export

La Tabla 2-II muestra todo el proceso detallado de la instalación de cables export entre el punto de conexión con tierra y la subestación offshore.

PROCESO DE INSTALACION DE EXPORT CABLES		
Proceso convencional con barcos cableros		
Paso	Nº	Secuencia detallada
Movilización	1	Un barco cablero y barcos auxiliares con buzos se desplazan al puerto de operación.
Preparación (en el puerto de operación)	2	En el puerto de operación el cable submarino está bobinado en el carrusel del barco cablero.
	3	El barco está preparado y equipado con los sistemas de enterramiento necesarios para la operación.
Desplazamiento hacia el punto de conexión en la orilla	4	El barco cablero y los barcos auxiliares se desplazan desde el puerto hacia el punto de la conexión del cable export con tierra.
	5	El barco cablero y los barcos auxiliares se posicionan a una distancia navegable y lo más cerca del punto de conexión en la orilla.
Conexión del cable export con tierra	6	En la cubierta del barco cablero se equipa el final del cable de potencia con un cabezal y balizas
	7	El cable de potencia se baja del barco cablero y se coloca en la superficie del mar mediante balizas hasta llegar al punto de conexión con tierra en la orilla. Para esos trabajos se suelen emplear buzos y equipos de trabajo que operan desde la orilla.
	8	Una vez colocado el final del cable submarino en tierra se conecta a un cable de potencia de tierra que sirve de conexión con la subestación terrestre.
Enterramiento del cable entre el punto de conexión en tierra y la subestación offshore	9	El barco cablero comienza los trabajos de enterramiento del cable según el proceso elegido, ver apartado 2.2.3.1, hasta llegar a la subestación offshore.
Conexión del cable a la subestación offshore	10	El barco cablero y los barcos auxiliares se posicionan cerca de la subestación offshore.
	11	En la cubierta del barco cablero el final del cable de potencia se equipa con un cabezal y balizas que facilitan la conexión con el cable guía o messenger. Con la ayuda de buzos se baja del barco el final del cable de potencia y se coloca en la superficie del agua cerca del

		J-tube correspondiente de la subestación, ver Figura 2-6b.
	12	Con la ayuda de buzos el final del cable messenger colocado en la salida del J-tube se sube a la superficie y se conecta al cabezal del cable de potencia, Figura 2-6b.
	13	Desde la subestación se pasa el cable messenger y el cable de potencia por el interior del J-tube, ver Figura 2-6c.
	14	En la subestación se realiza la conexión del cable de potencia a la celda de media tensión correspondiente.
	15	Desde el barco cablero se comienza el proceso de enterramiento del cable de potencia para llevarlo desde la subestación hasta los aerogeneradores, ver Figura 2-6d.
Desplazamiento hacia el puerto de operación	16	El barco cablero y el barco auxiliar van al puerto de operación.
Desmovilización	17	Los barcos cableros y la tripulación se dirigen desde el puerto de operación a su punto de partida original.

Tabla 2-II: Instalación de cables export con el proceso convencional con barcos cableros

2.2.4 Resumen del proceso actual de la instalación de cables submarinos

Como se puede apreciar en la descripción anterior el proceso de instalación de los cables submarinos (cables export e inter array) es actualmente muy complejo. La realización de la conexión de los cables a los diferentes elementos es complicada y requiere de la ayuda de buzos y coordinación entre varios barcos. Especialmente la instalación de los inter array cables requiere la colocación de muchos cables de poca longitud (cientos de tramos de menos de un kilómetro), lo que ralentiza y encarece el proceso de instalación.

Para el proceso de enterramiento de cables se necesitan barcos cableros de altas prestaciones con posicionamiento dinámico que tienen un coste muy elevado y que están muy demandados en el mercado lo que dificulta su contratación.

El proceso de instalación solo puede ser realizado bajo óptimas condiciones meteorológicas. En cada proyecto de instalación, la flota de barcos y la tripulación pasan una cantidad importante de días en el puerto a causa de las condiciones meteorológicas adversas, lo que también encarece el coste de la instalación.

Otro factor de encarecimiento son los costes relacionados con la movilización y desmovilización de los barcos y la tripulación desde su punto de partida y el puerto de operación y viceversa.

Resumiendo los puntos ya expuestos, el proceso de instalación de cables submarinos de potencia es muy complejo, depende de muchos factores externos, requiere una inversión muy elevada (barcos) y tiene unos costes operativos altos (tripulación y equipos de buzos y técnicos especializados).

3 Objetivos y metodología del trabajo

El objetivo de este trabajo es realizar un diseño técnico y un análisis de la viabilidad económica de un proceso innovador para la instalación de cables submarinos mediante un vehículo de operación remota, que puede contribuir a una reducción de los costes de generación de la energía eólica offshore y que permite trabajar con condiciones meteorológicas adversas.

La principal innovación de este trabajo consiste en usar el propio cable a enterrar como alimentación, comunicación y control de un vehículo submarino que realiza los trabajos de transporte, colocación y enterramiento del cable.

Se trata de analizar diferentes opciones y escenarios para el proceso de instalación con varios tipos de cables submarinos usando un vehículo innovador de operación remota llamado SCARGO.

Se pretende realizar una evaluación económica de este nuevo proceso con el objetivo de conseguir una posible reducción de costes en la instalación de cables submarinos en el sector de la generación de energía eólica offshore.

En un estudio conceptual se desarrolla el proceso innovador en más detalle, se dimensionan tanto el vehículo SCARGO como sus componentes y se realiza una comparativa de los costes de inversión y de los costes operativos entre el proceso innovador y el proceso convencional.

Finalmente se realiza un análisis de los resultados más relevantes, mostrando los posibles beneficios en el sector de energía eólica offshore con la puesta en marcha de este nuevo proceso, así como sus perspectivas de desarrollo y potenciales de cara al futuro.

La metodología aplicada se resume en la Tabla 3-I.

Un punto importante a mencionar es que el estudio técnico del nuevo proceso de instalación de cable ha requerido varias iteraciones entre los pasos 2, 3 y 4 de la tabla. Esto es debido a factores restrictivos, como por ejemplo el peso del cable que tiene una gran influencia en el dimensionamiento del vehículo y que limita la utilización de ciertas tecnologías. Descartando opciones no viables finalmente se ha conseguido llegar a solución que es tecnológica y económicamente viable.

Nº	Fase	Pasos
1	Análisis del proceso actual de instalación de cables submarinos	<ul style="list-style-type: none"> Estudio detallado del proceso de instalación de cable inter array y export empleado en los parques eólicos offshore.
2	Desarrollo de un proceso innovador de instalación de cables	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollo de diferentes escenarios para el proceso de instalación de cables submarinos.
3	Parametrización	<ul style="list-style-type: none"> Calculo de los parámetros, características y dimensiones principales de las bobinas de cable y del vehículo SCARGO para los diferentes escenarios.
4	Refinamiento del proceso de instalación	<ul style="list-style-type: none"> Refinar y detallar del proceso de instalación

		<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de los diferentes escenarios de instalación y de sus variantes respecto a su viabilidad técnica / económica.
5	Dimensionamiento del vehículo SCARGO	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de los componentes necesarios para vehículo SCARGO. • Cálculo o estimación de los parámetros básicos y dimensiones del vehículo y sus componentes.
6	Comparación económica entre el proceso innovador y el proceso actual	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de los costes de inversión y de operación para ambos procesos. • Realización de una comparativa económica entre los dos procesos para diferentes escenarios de operación. • Estimación del volumen de mercado y de los beneficios económicos del proceso innovador con el vehículo SCARGO.
7	Análisis de los resultados y estudio de perspectivas futuras	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de los resultados técnicos y económicos. • Búsqueda de posibles aplicaciones del proceso innovador y del vehículo SCARGO.

Tabla 3-1: Metodología de trabajo

4 Elección del proceso de instalación óptimo

El proceso innovador de instalación se basa principalmente en la idea de que el vehículo de enterramiento se abastece eléctricamente del propio cable de potencia a enterrar y no necesita ninguna conexión umbilical y ningún barco en superficie.

El cable de potencia suministra la energía a los sistemas eléctricos del vehículo SCARGO y además permite la comunicación entre el SCARGO y su tripulación de forma remota a través de los cables fibra óptica incorporados en dicho cable.

Con el objetivo de conseguir un proceso técnicamente viable y con un ahorro económico significativo se han investigado tres diferentes escenarios para la instalación de cables en un parque eólico.

Primer escenario – SCARGO I

El primer escenario se refiere a la instalación de los cables inter array entre dos aerogeneradores con una longitud de cable a cargar de máximo 3 Km. Para ello se ha dimensionado un vehículo submarino de operación remota llamado SCARGO I.

Segundo escenario – SCARGO II

El segundo escenario también se ocupa de la instalación de los cables inter array, en este caso para cubrir una longitud de 10 Km, lo que equivale a la distancia entre la subestación y el último aerogenerador de un radial. Para esta aplicación se utiliza un vehículo submarino de operación remota llamado SCARGO II, que tiene las dimensiones adecuadas para cargar una bobina de cable inter array de 10 Km.

Tercer escenario – SCARGO III

En el tercer escenario se analiza el proceso de la instalación de cables export (transmisión de la energía eléctrica a la costa) y se utiliza para ello una versión del vehículo submarino

llamado SCARGO III, que está dimensionado para cargar una bobina de cable export de una longitud de 70 Km.

4.1 Escenarios posibles en la instalación del cable con el vehículo SCARGO

4.1.1 Escenario 1: SCARGO I - Inter array cable hasta 3km

En el escenario 1 el vehículo SCARGO I trata de instalar un cable inter array de una longitud no superior a tres kilómetros que equivale a la mayor distancia posible entre un aerogenerador y la subestación offshore.

El proceso es similar al establecido actualmente con los barcos cableros que instalan los cables entre los aerogeneradores con la diferencia que el vehículo SCARGO realiza el trabajo de enterramiento sin necesidad de un cable umbilical para su alimentación y sin ayuda de un barco en la superficie. La energía necesaria para el funcionamiento del vehículo SCARGO proviene del mismo cable de potencia a instalar. Un extremo de este cable tiene que estar conectado con un grupo electrógeno situado en la subestación.

La ventaja de este procedimiento es que no se necesita mucha longitud de cable, el peso y las dimensiones del vehículo son lo más pequeñas posibles y su maniobrabilidad es máxima.

Su desventaja son los costes de material y de preparación. Todos los cables a enterrar tienen que ser confeccionados con su tambor, un casco de suspensión y un conector húmedo. Un conector húmedo es un sistema de conexión eléctrica o de fibra óptica que se puede realizar en un medio húmedo o líquido como por ejemplo en el agua, se incluye información detallada al respecto en el apartado 5.2.10. Además se necesita transportar y colocar cada bobina cerca del lugar de enterramiento. Para garantizar el abastecimiento del SCARGO a través del cable de potencia, cada cable enterrado tiene que ser conectado al aerogenerador inmediatamente antes de proceder al enterramiento. De esta manera SCARGO sigue siendo alimentado por el grupo electrógeno de la subestación a través de los aerogeneradores de un radial que ya están conectados entre ellos y la subestación.

La desventaja de este proceso son la logística y coordinación necesarios para los desplazamientos de personas a los aerogeneradores cada vez que el SCARGO termina un tramo de enterramiento en un aerogenerador, lo que encarece mucho el proceso de instalación.

4.1.2 Escenario 2: SCARGO II – Inter array cable hasta 10km

En el segundo escenario se dimensiona el vehículo SCARGO II para cargar aproximadamente diez kilómetros de cable Inter array en una secuencia continua. Los diez kilómetros son aproximadamente la distancia de un radial de aerogeneradores en un parque eólico offshore.

El supuesto principal de este escenario es la realización del proceso de enterramiento para todos los aerogeneradores a la vez. Para ello la bobina a cargar en el vehículo SCARGO tiene que estar conectada al grupo electrógeno de la subestación offshore. De esta manera la instalación se puede efectuar de una forma más autónoma sin dependencia de elementos externos como equipos de técnicos en los aerogeneradores.

La conexión del cable a los aerogeneradores puede realizarse de forma independiente a los trabajos de enterramiento del cable con el SCARGO. Tampoco requiere de la ayuda de barcos y buzos (excepto de una embarcación para el traslado de los técnicos al aerogenerador).

El equipamiento de las bobinas y del vehículo SCARGO con cascos de suspensión individuales permite que ambos sean arrastrados desde el puerto de operación al parque eólico offshore con barcos remolcadores que tienen bajo coste y poca tripulación.

Utilizando un cable trifásico con capacidad para evacuar 34 MW de potencia (33kV, 400mm² de cobre), el peso de la unidad a remolcar está por debajo de 300 toneladas, lo que ha permitido diseñar un vehículo de dimensiones técnicamente viables y buena maniobrabilidad.

4.1.3 Escenario 3: SCARGO III –cable export

El tercer escenario consiste en la instalación del cable export con el vehículo SCARGO III, los cálculos de las dimensiones del vehículo se basan en la longitud, grosor y peso del cable descrito en el apartado 5.1.2, ver Tabla 5-V.

La carga de un cable de alta tensión de hasta una longitud de 70 Km (valor promedio de la distancia a la costa de un parque eólico offshore en Europa) hacen que el vehículo tenga un peso y unas dimensiones tan elevados que dificultan mucho su maniobrabilidad y con la tecnología actualmente disponible impide su construcción.

Otra posibilidad analizada consiste en el enterramiento de varios cables export de menos longitud. La desventaja fundamental en este caso es que el gran número de conexiones necesarias genera un alto coste y su funcionamiento tiene un menor grado de fiabilidad.

4.1.4 Evaluación de la viabilidad de los tres escenarios

Tras analizar la viabilidad de los tres escenarios se han descartado las opciones 1 y 3 debido a las dificultades técnicas que implican y por no representar un ahorro económico significativo comparando ambas alternativas con el proceso de instalación actual.

Se ha realizado un estudio detallado del escenario 2 (cable inter array de hasta diez kilómetros), cuyo objetivo ha sido la realización de una evaluación técnica y económica de todo el proceso, así como de las necesidades de equipamiento del vehículo SCARGO II.

4.2 Proceso de instalación con el vehículo SCARGO II

La Tabla 4-I muestra la secuencia completa de la instalación de cables submarinos con el vehículo SCARGO II.

Instalación de los INTER ARRAY cables con el vehículo SCARGO II (10 Km de cable)		
Nº	Paso	Secuencia detallada
1	Preparación en el puerto de operación	1 Se preparan varias unidades a remolcar (tambores de bobinas equipados con un casco de suspensión, soporte y conector húmedo).
		2 El cable se bobina en varios tambores de cable (longitud para cada radial, máximo 10 Km).

		3	El extremo interior del cable que hay en cada bobina tiene acoplado un conector húmedo.
		4	El extremo exterior del cable de cada bobina está conectado con un cable Messenger (guía) enrollado.
2	Transporte de las bobinas a la subestación offshore	5	Las bobinas con los cascos de suspensión se remolcan con un remolcador hasta la subestación.
		6	Para cada bobina: El cable messenger de la bobina se sube a la subestación para ser conectado con el cable messenger del J-tube de la subestación.
		7	La bobina se baja al fondo del mar, junto a la subestación en la posición donde comienza el tramo radial a instalar y cerca de su J-tube correspondiente.
		8	El extremo exterior del cable de cada bobina se sube a la superficie para ser conectado con el cable messenger del J-tube de la subestación. El cable de potencia es subido a la subestación por el interior del J-tube y conectado eléctricamente a una fuente de energía auxiliar.
3	Transporte del vehículo SCARGO a la subestación offshore	9	En el puerto se monta un casco de suspensión (de las bobinas) al vehículo SCARGO y se remolca hacia la subestación
		10	El vehículo SCARGO es bajado al fondo del mar, cerca de la subestación con la ayuda del barco remolcador y un cable cabestrante de la subestación.
		11	SCARGO se alimenta con una batería Li-Ion y sube su baliza con la antena de control remoto a la superficie del mar.
4	Carga de la bobina al SCARGO	12	SCARGO se acerca con la parte trasera y se posiciona por debajo del conjunto bobina y casco de suspensión (sistema similar a una carretilla).
		13	SCARGO eleva la bobina y el casco de suspensión mediante unos cilindros de gran capacidad de carga y desacopla el soporte de la bobina.
		14	SCARGO retrocede cargado con la bobina y el casco de suspensión dejando el soporte de la bobina en el fondo.
		15	SCARGO baja los cilindros dejando la bobina y el casco de suspensión encima del chasis en una posición fija.
		16	El cable de la bobina se enchufa al SCARGO con un conector húmedo, cambiando de este modo su alimentación desde la batería Li-Ion al cable de potencia.
		17	SCARGO gira 180° posicionando el cable hacia el tensor mediante el brazo de manipulación.
		18	Durante el proceso de carga de la bobina, el SCARGO será alimentado por una batería de Li-Ion y su control remoto se realiza de forma inalámbrica con ayuda de una baliza en superficie que se conecta al SCARGO con un cable umbilical de control.
5	Instalación del cable entre los aerogeneradores	19	<p>Durante el proceso de enterramiento del cable:</p> <ul style="list-style-type: none"> • SCARGO se abastece mediante el cable de potencia que está enterrando. • El control remoto se realiza a través de las fibras de comunicación que contiene el propio cable a instalar. • El cable es des-bobinado con la ayuda de un brazo de manipulación y el tensor.

		20	<ul style="list-style-type: none"> • SCARGO empieza el proceso de enterramiento hasta llegar cerca del primer aerogenerador. • Unos 50 metros antes del aerogenerador deposita el cable sin enterrar. • Variante a): SCARGO posiciona el cable (sin cortar) en un dispositivo (media rueda) en el fondo del mar cerca de la cimentación del aerogenerador. • Variante b): SCARGO posiciona el cable directamente dentro de dos J-tubes desplegados en el fondo del mar y abiertos (cada J-tube está formado por dos mitades de tubo) y cierra los dos J-tubes con la ayuda del brazo de manipulación.
		21	<ul style="list-style-type: none"> • Posteriormente se sube el dispositivo con el cable de potencia a la plataforma del aerogenerador mediante un cable messenger (ya preinstalado en la rueda). • El cable de potencia se corta y se conecta a dos cables messenger de dos J-tubes.
		21 a	<ul style="list-style-type: none"> • Mediante los dos cables messenger de los J-tubes los dos extremos del cable de potencia se suben por dentro de los J-tubes a la plataforma del aerogenerador y se conectan eléctricamente de forma manual, pero sin necesidad de barcos.
		21 b	<ul style="list-style-type: none"> • En una operación posterior desde la cimentación del aerogenerador, los dos J-tubes desplegados se suben a la posición vertical con un cable messenger (ya preinstalado). • Los cables se cortan y se conectan al aerogenerador en seco, en su propia plataforma (sin necesidad de barcos).
		22	<ul style="list-style-type: none"> • SCARGO sigue enterrando el cable entre los aerogeneradores del mismo radial o array hasta llegar al último aerogenerador.
6	Vuelta a la subestación	23	<ul style="list-style-type: none"> • SCARGO cambia la alimentación de potencia por la batería interna y sube la baliza de conexión inalámbrica a la superficie.
		24	<ul style="list-style-type: none"> • SCARGO desconecta el conector del cable de potencia y lo quita de la bobina mediante el brazo de manipulación.
		25	<ul style="list-style-type: none"> • SCARGO vuelve a la subestación alimentado por la batería y guiado de forma remota utilizando la conexión inalámbrica (mediante la baliza).
		26	<ul style="list-style-type: none"> • SCARGO descarga el casco de suspensión mientras se abastece eléctricamente de sus baterías.

Tabla 4-I: Proceso detallado de la instalación de los cable Inter array con el vehículo SCARGO II

4.2.1 Transporte de las bobinas de cable y del vehículo SCARGO II al parque

El primer paso del proceso de la instalación es la preparación de las bobinas en el puerto de operación. El cable está bobinado en tambores con la longitud necesaria para cubrir la distancia entre la subestación y el último aerogenerador de un radial. Cada bobina está equipada un conector húmedo, un tambor, un casco de suspensión y un soporte, ver Ilustración 5-2. En adelante se la nombrará como unidad a remolcar.

El vehículo SCARGO II dispone de un casco de suspensión propio que le da total flotabilidad y le permite ser remolcado. En el puerto de operación el vehículo SCARGO II se equipa con una bobina.

Las unidades a remolcar son arrastradas por un barco remolcador a la posición deseada cerca de la subestación offshore.

Una vez allí, cuando las unidades remolcadas están aún flotando en la superficie, los cables de cada bobina se conectan a los cables messenger que salen de los J-tubes de la subestación. Posteriormente las unidades se bajan al fondo del mar con cabestrantes y con la ayuda de la tripulación del remolcador y del equipo de la subestación.

Cuando la unidad a remolcar está colocada en el fondo del mar, el cable de potencia se sube a la subestación por el J-tube con la ayuda de un cable messenger. En la subestación el cable de potencia se conecta a un equipo de generación auxiliar (grupo electrógeno) para suministrar al vehículo SCARGO la energía eléctrica necesaria.

El vehículo SCARGO II equipado con una bobina también se remolca hasta la subestación. El proceso de conexión a la subestación y descenso al fondo del mar es idéntico al ya descrito anteriormente para las unidades remolcadas.

En cuanto el cable de potencia de la bobina del SCARGO esté conectado a la subestación, el vehículo se abastece de electricidad y comienza con el proceso de enterramiento del cable.



Ilustración 4-1: Transporte con remolcadores de las bobinas y de los vehículos SCARGO II a la subestación offshore

4.2.2 Conexión del cable a los aerogeneradores

La idea clave en el proceso de instalación de cables con el vehículo SCARGO II está en la realización del enterramiento de la longitud del cable de potencia requerida para cubrir la distancia entre el primer y el último aerogenerador de un radial del parque (entre cinco y doce aerogeneradores) sin necesidad de interrupciones ni cortes en el cable.

El vehículo SCARGO II se aproxima al aerogenerador realizando la operación de enterramiento de cable, unos metros antes del aerogenerador, el SCARGO II deja de enterrar el cable y lo coloca simplemente sobre el fondo del mar.

A continuación, SCARGO II coloca el cable de potencia en un dispositivo recogedor que posteriormente puede ser subido a la plataforma del aerogenerador. Una vez subido el cable de potencia, se corta y los dos extremos resultantes se conectan a las celdas de media tensión correspondientes situadas en el interior del aerogenerador.

Se han desarrollado dos variantes de subida del cable al aerogenerador, una basada en procedimientos existentes ya probados y otra innovadora que reduce el tiempo de instalación de forma significativa y genera menos estrés mecánico en el cable durante esta fase de instalación.

4.2.2.1 *Variante 1: Proceso de subida del cable al aerogenerador mediante un dispositivo de recogida (media rueda)*

Esta variante tiene dos fases:

En la primera fase el SCARGO II deja de enterrar el cable unos metros antes de llegar a la cimentación del aerogenerador y coloca el cable en forma de serpentina lo suficientemente larga para que el cable pueda ser subido a la plataforma del aerogenerador. Un dispositivo recogedor con una apertura para el cable de potencia está fijado en la estructura del aerogenerador cerca del fondo del mar. El vehículo SCARGO II coloca el cable en el dispositivo recogedor con la ayuda de su brazo de manipulación; posteriormente sigue instalando cable, pero esta vez no lo enterrará durante un tramo de varios metros posteriores a la salida del aerogenerador. Una vez se ha alejado unos metros del aerogenerador continúa con el proceso de enterramiento hasta el próximo aerogenerador, ver Ilustración 4-3 e Ilustración 4-4.

Durante la segunda fase se realiza la subida, corte y conexión del cable de potencia al aerogenerador. Este proceso es posterior al enterramiento de todo el cable a lo largo del radial. Desde la plataforma del aerogenerador se sube el dispositivo recogedor con el cable de potencia colocado en su interior. Una vez se ha subido el cable de potencia a la plataforma, se corta el mismo y se conectan los dos extremos resultantes a dos cables messenger de los correspondientes J-tubes.

Para cada cable y con la ayuda de un cabestrante, se arroja al agua el extremo del cable unido a su cable messenger (de la parte superior del J-tube) para que este baje y pueda pasar por el interior del J-tube. A continuación se sube de nuevo el cable de potencia a la plataforma del aerogenerador esta vez por el interior del J-tube. Finalmente se conectan los dos cables de potencia a las celdas de media tensión correspondientes en el interior del aerogenerador.

Todos los trabajos incluidos en esta segunda fase son realizados desde la plataforma del aerogenerador y sin la ayuda de barcos o buzos; ver Ilustración 4-3, Ilustración 4-2 e Ilustración 4-4.

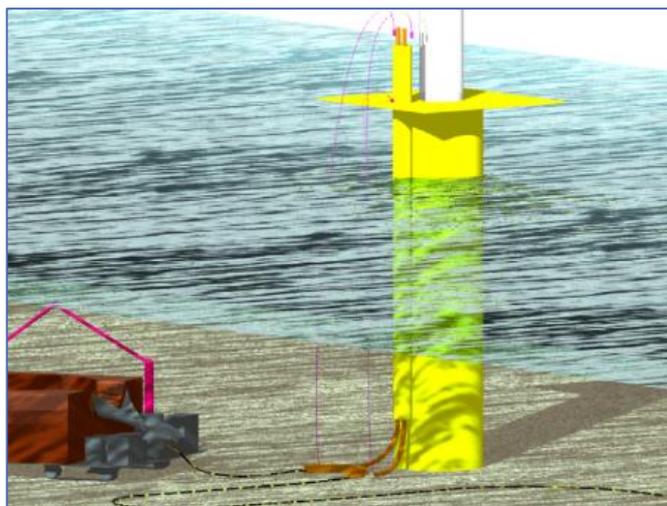


Ilustración 4-3: SCARGO II coloca el cable en el dispositivo recogedor

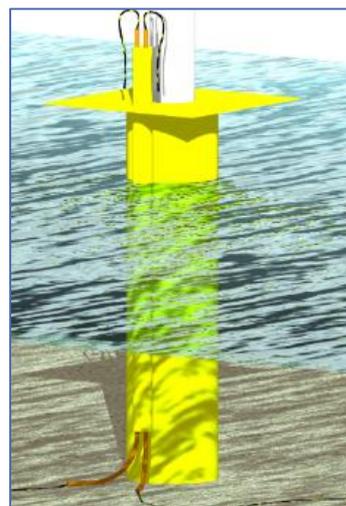


Ilustración 4-2: El cable de potencia subido al aerogenerador

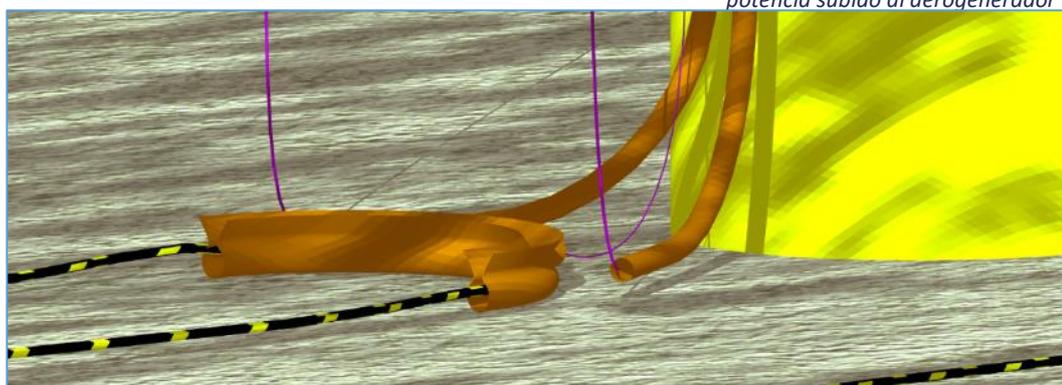


Ilustración 4-4: Detalle del dispositivo recogedor (media rueda) con su cable de recuperación y los J-tubes preparados con sus cables messenger

4.2.2.2 Variante 2: Subida del cable al aerogenerador con J-tubes abatibles

Este variante también se divide en dos fases parecidas a las ya explicadas en la variante 1. La característica fundamental de esta variante es que los J-tubes se han dividido en dos partes. Una parte del J-tube es abatible con una apertura, a modo de canalización, que abarca toda su longitud y que facilita la colocación del cable de potencia en su interior. La otra parte del J-tube sirve como tapadera y está fijada en la parte exterior del aerogenerador, ver Ilustración 4-6. Los dos partes anteriormente descritas están unidas por medio de bisagras. Adicionalmente la parte abatible puede ser desplegada y plegada desde el aerogenerador.

Durante la primera fase de la instalación la parte abatible del dispositivo ya se encuentra desplegada en posición horizontal sobre el fondo del mar.

El vehículo SCARGO II deja de enterrar el cable unos metros antes de la cimentación del aerogenerador y coloca el cable en la parte abatible del J-tube, como muestra la Ilustración 4-6 y la Ilustración 4-8.

El posicionamiento en el fondo del mar de la parte abatible del J-tube se puede realizar poco antes de que llegue el vehículo SCARGO al aerogenerador, por ejemplo con un control remoto. Así se evita la acumulación de arena o suciedad en la parte abatible del J-tube.

La segunda fase se lleva a cabo después de que el SCARGO haya depositado y enterrado el cable (en los tramos que así lo requieran) en toda la longitud correspondiente a un radial. La parte abatible del J-tube, que contiene el cable de potencia, se eleva hasta alcanzar una posición vertical, maniobra que se dirige desde la plataforma del aerogenerador, ver Ilustración 4-5 e Ilustración 4-7.

El cable de potencia colocado en la parte abatible se encuentra ahora en posición vertical sobre la plataforma del aerogenerador como se puede ver en la Ilustración 4-7. La parte fija está diseñada de tal manera que en posición vertical se cierra por completo la apertura de la parte abatible y así se forman dos conductos cerrados que cumplen la función de proteger el cable de potencia, como un J-tube tradicional.

Finalmente se corta el cable de potencia en la plataforma y se conectan los dos extremos resultantes a las celdas de media tensión del aerogenerador.

Todos los trabajos incluidos en esta segunda fase son realizados desde la plataforma del aerogenerador y sin la ayuda de barcos o buzos.

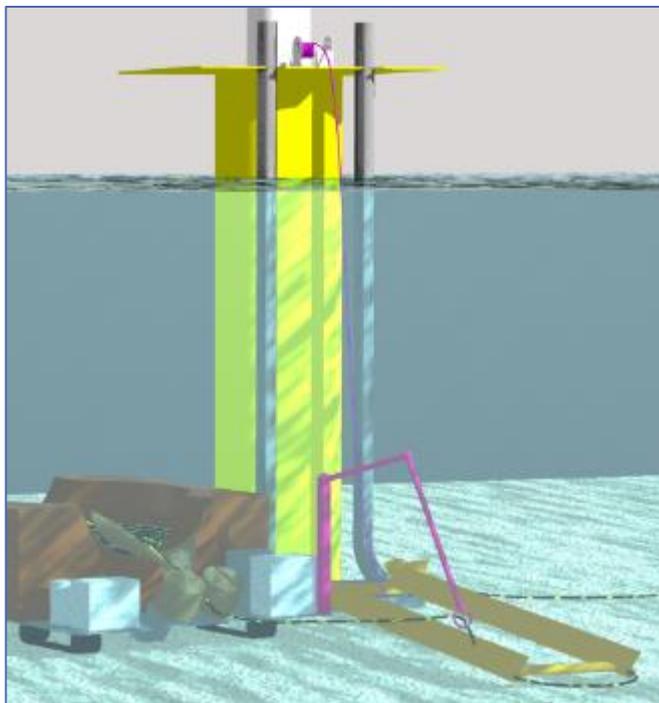


Ilustración 4-6: Dispositivo desplegado, colocación del cable

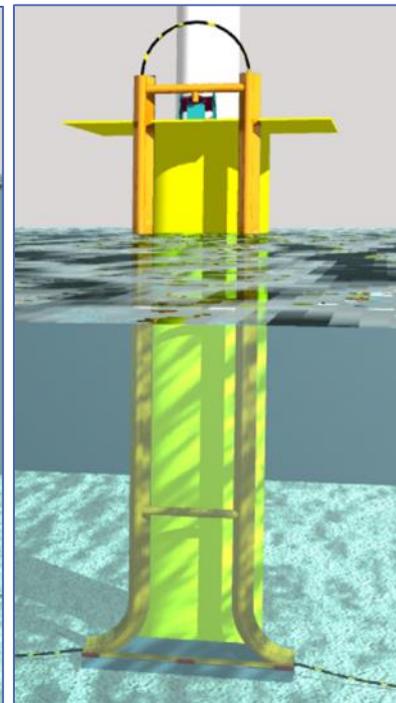


Ilustración 4-5: Dispositivo plegado hacia arriba

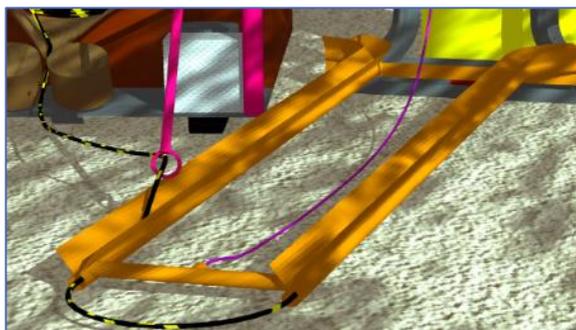


Ilustración 4-8: Detalle de la colocación del cable

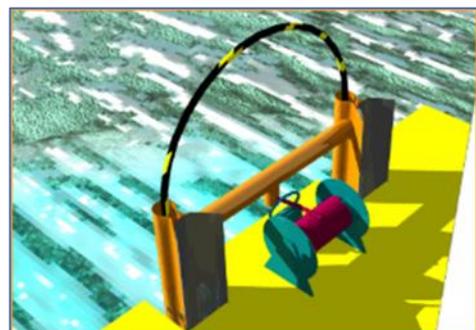


Ilustración 4-7: Detalle del dispositivo plegado con el cabestrante, el cable de potencia está sin cortar y conectar

4.2.3 Vuelta a la subestación

Después de haber colocado el cable de potencia en el último aerogenerador del radial, SCARGO II cambia al modo de alimentación mediante las baterías Li-Ion y activa su control remoto inalámbrico. A continuación se desconecta del conector húmedo, que hasta ese momento le proporcionaba alimentación, y coloca el extremo del cable que tiene la terminación con conector fuera del vehículo, ver Ilustración 4-9. Finalmente vuelve a la subestación alimentado por su batería interna de Li-Ion y controlado por el sistema de comunicación inalámbrico (baliza y antena).

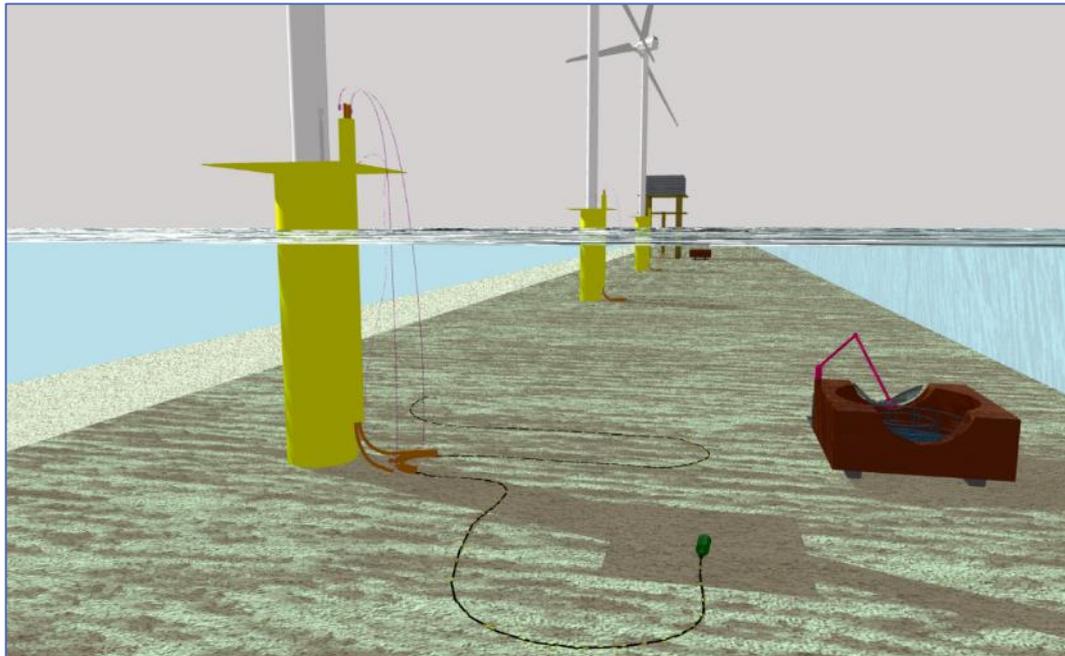
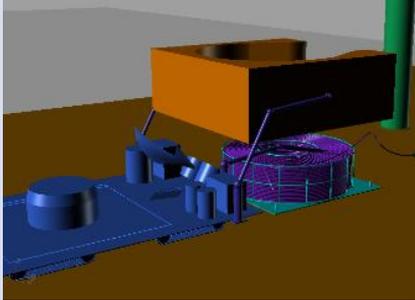
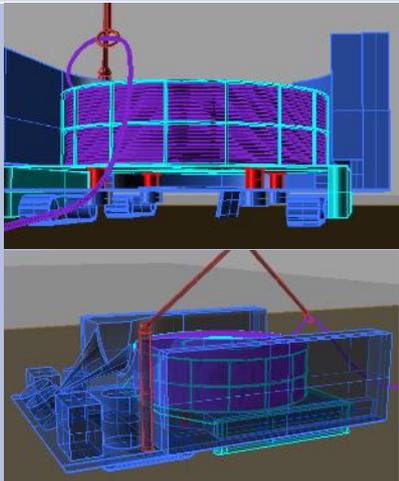
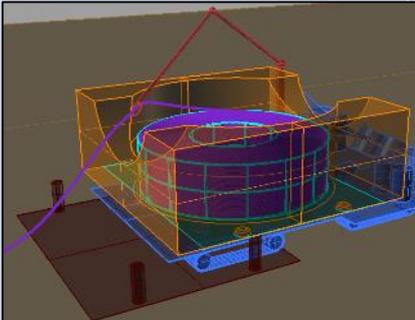


Ilustración 4-9: SCARGO II desconecta el cable de potencia y vuelve a la subestación offshore en modo batería

4.2.4 Operación de carga del cable en el vehículo

Una vez el SCARGO II ha llegado a la subestación offshore, funcionando con la energía de sus baterías Li-ion, se acerca a otra bobina de cable para cargarla y comenzar con el proceso de instalación de otro radial del parque.

El proceso de carga de la bobina al vehículo SCARGO es complejo y difícil de realizar, dado el peso elevado de la bobina, el funcionamiento mediante control remoto y las condiciones hostiles del ambiente (poca visibilidad bajo el agua, corrientes y oleaje). Se han desarrollado y analizado varias posibles variantes de esta fase del proceso que se muestran en la Tabla 4-II.

Variantes de la carga de la bobina al vehículo SCARGO		
Nº	Visualización	Descripción
1		<p>Carga de la bobina al SCARGO mediante dos brazos de manipulación</p> <ul style="list-style-type: none"> • SCARGO tiene un casco de suspensión desmontable <ol style="list-style-type: none"> 1) El vehículo SCARGO se acerca a la bobina. 2) Se levanta el casco de suspensión desmontable del SCARGO con dos brazos de manipulación para colocarlo por encima de la bobina. 3) El casco de suspensión está fijado a la base del tambor de la bobina y el volumen de flotación del casco de suspensión se ajusta para compensar el peso de la bobina. 4) El casco de suspensión con la bobina es su interior se carga al vehículo SCARGO mediante los dos brazos de manipulación. <p><u>Transporte al parque eólico:</u> Las bobinas son transportadas con un barco y bajadas al agua mediante una grúa</p>
2a		<p>Carga de la bobina al SCARGO mediante un chasis con cilindros tipo carretilla</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cada bobina está equipada con un soporte desmontable. • SCARGO tiene un casco de suspensión fijo. <ol style="list-style-type: none"> 1) SCARGO se acerca con la parte trasera y se posiciona por debajo de la bobina. El soporte ayuda en su posicionamiento en las ranuras del SCARGO. 2) SCARGO activa unos cilindros hidráulicos (en rojo) que suben la bobina con el casco de suspensión para liberarla del soporte. 3) Con la bobina suspendida por encima de su soporte el SCARGO retrocede y una vez ha salido por completo del soporte baja los cilindros y así la bobina se encuentra por encima del SCARGO 4) SCARGO gira 180° y con un brazo manipulador pasa el cable de la parte trasera a la parte delantera para posicionarlo en las guías del tensor. <p><u>Transporte al parque eólico:</u> Las bobinas son transportadas con un barco y bajadas al agua mediante una grúa</p>
2b		<p>Carga de la bobina al SCARGO mediante un chasis con cilindros tipo carretilla</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cada bobina está equipada con un soporte desmontable y un casco de suspensión (unidad a remolcar) • SCARGO tiene un casco de suspensión fijo. <ol style="list-style-type: none"> 1) SCARGO se acerca con la parte trasera y se posiciona por debajo de la unidad a remolcar. 2) SCARGO activa unos cilindros hidráulicos (en rojo) que suben la unidad con el casco de suspensión para liberarla del soporte. 3) Con la bobina y su casco de suspensión por encima de su soporte el SCARGO retrocede y una vez ha

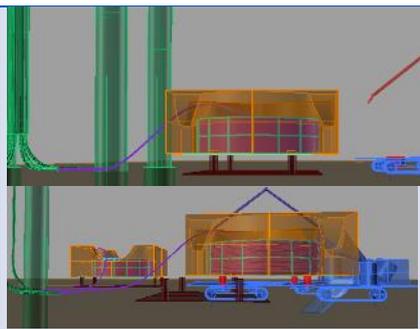
		<p>salido por completo del soporte baja los cilindros y así la bobina con su casco se encuentran por encima del SCARGO.</p> <p>4) SCARGO gira 180° y con un brazo manipulador pasa el cable de la parte trasera a la parte delantera para posicionarlo en las guías del tensor.</p> <p><u>Transporte al parque eólico:</u> Las bobinas dentro de la unidad a remolcar y el SCARGO son remolcados con un barco remolcador y bajados al fondo del mar (sin ayuda de barcos grandes y grúas)</p>
3		<p>Proceso de bobinado del cable en el fondo del mar desde una bobina carrusel al tambor del SCARGO</p> <ul style="list-style-type: none"> • La bobina está equipada con un carrusel capaz de girar bajo el agua. • La bobina con el carrusel es bajada al fondo del mar, cerca de la subestación. <p>1) El vehículo SCARGO se acerca al carrusel y conecta un extremo del cable del carrusel con la ayuda del brazo de manipulación.</p> <p>2) SCARGO carga el cable desde la bobina del carrusel bobinando y con la ayuda de su brazo de manipulación.</p> <p>3) El cable se corta desde el carrusel y existen varios tramos de cable bobinados en el carrusel</p>
4		<p>Carga de la bobina al SCARGO arrastrándola con un cabestrante (tipo contenedor de escombros)</p> <p>Esta variante se descartó ya que requiere la aplicación de mucha fuerza en las partes móviles del sistema teniendo en cuenta el elevado peso de la bobina.</p>

Tabla 4-II: Diferentes variantes de la carga de la bobina al vehículo SCARGO

Se ha realizado una evaluación de viabilidad técnica / económica de las cinco variantes analizadas que se incluye en la Tabla 4-III.

Se ha tomado la variante 2b que realiza la carga con un sistema tipo carretilla por ser la de mayor viabilidad técnica. Además el equipamiento con cascos de suspensión individuales para cada bobina, creando unidades a remolcar, permite que dichas unidades pueden ser remolcadas al emplazamiento deseado con un barco de bajo coste. Esto supone un ahorro importante en los costes operativos y de inversión de instalación, dado que no requiere la presencia de barcos cableros o de carga durante todo el proceso.

Evaluación de las variantes de la carga de la bobina al vehículo SCARGO							
Nº	Variante de la carga de la bobina	Inversión	Tiempo	viabilidad	Corrientes / olas	Ventajas	Desventajas
1	Con dos brazos de manipulación y casco de suspensión desmontable	0	+	-	--	Un casco de suspensión	No viable con olas o corrientes
2a	Con cilindros hidráulicos tipo carretilla (Bobina sin casco de suspensión)	-	+	+	+	Un casco de suspensión	– Giro del cable complicado – Necesidad de barco y grúa
2b	Con cilindros hidráulicos tipo carretilla (Bobina con casco de suspensión individual)	-	+	+	+	Bobinas pueden ser remolcadas	– Giro del cable complicado – Varias unidades a remolcar
3	Bobinando al tambor del SCARGO desde un carrusel en el fondo del mar	++	-	-	++	Sin necesidad de cargar la bobina al SCARGO	– Funcionamiento del carrusel bajo el agua – Conexión del cable
4	Arrastrando la bobina con un cabestrante desde el SCARGO	-	+	-	+	Tecnología robusta	Viabilidad del sistema con el peso necesario

Tabla 4-III: Variantes para el cargo de la bobina con el SCARGO

El tambor de la bobina está colocado encima de un soporte que lo eleva del suelo hasta una altura que permite al SCARGO II desplazarse por debajo. El SCARGO II tiene un sistema de cilindros hidráulicos que al estar posicionado por encima de la plataforma de carga le permite elevar el tambor lo suficientemente para desacoplar el tambor del soporte.

Después el SCARGO II retrocede solo con el tambor y la bobina y al bajar los cilindros, ambos se posicionan por encima de la plataforma de carga del vehículo. Al mismo tiempo el brazo de manipulación del SCARGO gira el extremo del cable que está conectado a la subestación y lo coloca en las guías del tensor.

Finalmente se realiza la conexión del conector húmedo de la bobina al vehículo SCARGO II. El proceso de carga de la bobina al SCARGO II ha dejado alineado el otro extremo del cable que tiene el conector instalado, de tal forma que este puede enchufarse al SCARGO II para alimentarlo.

Una vez conectado el vehículo SCARGO II al cable que va a instalar, puede cambiar el modo de alimentación (de batería a alimentación por cable) y también el control remoto haciendo uso de las fibras ópticas que contiene el cable.

A partir de este momento el vehículo SCARGO II está preparado para comenzar el enterramiento del cable con la nueva bobina que ha cargado.

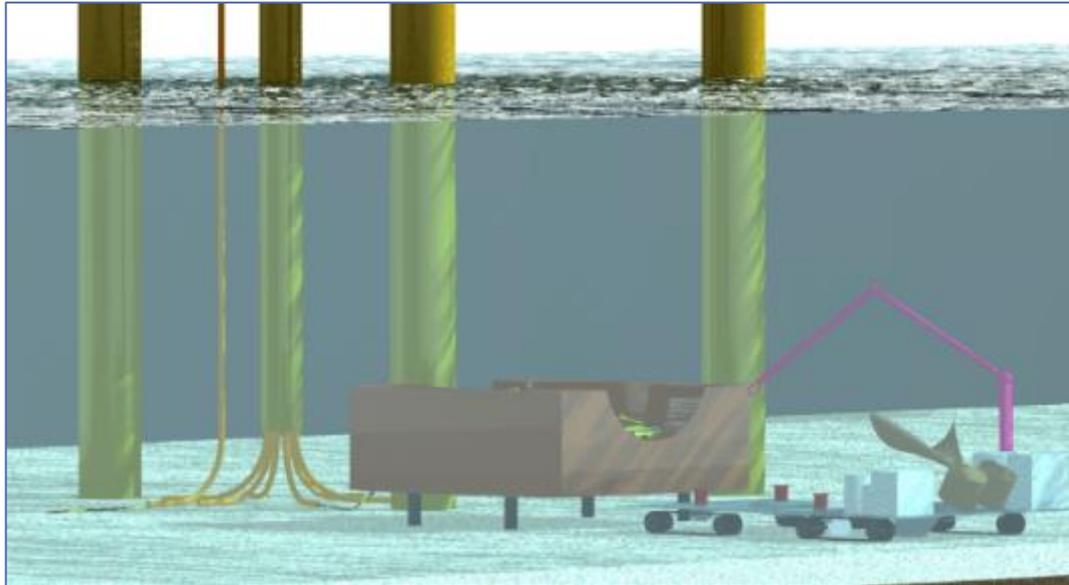


Ilustración 4-10: Proceso de carga de la bobina al vehículo SCARGO

5 Parametrización y dimensionamiento del vehículo SCARGO y su equipamiento

El vehículo SCARGO es un vehículo de operación remota mediante las órdenes transmitidas a través de las fibras ópticas contenidas en el propio cable de potencia a enterrar.

Para el dimensionamiento del vehículo SCARGO hay que tener en cuenta por un lado su aplicación, es decir, el tipo y la longitud de cable a enterrar y por otro lado se debe desarrollar un proceso de instalación específico aplicado a las necesidades del uso de dicho vehículo. Además es necesario dimensionar los sistemas de propulsión, eléctricos, de enterramiento de cable, de control remoto y de navegación.

En los siguientes apartados se explica el razonamiento utilizado para el dimensionamiento del vehículo.

5.1 Elección de los cables y dimensionamiento de la bobina del vehículo

El factor más importante para el dimensionamiento del vehículo de enterramiento es la elección del tipo del cable y su longitud. Estos factores definen el peso y las dimensiones de la bobina de cable a transportar y finalmente las características del vehículo SCARGO.

Para un parque eólico offshore existen principalmente dos diferentes tipos de cables: los cables que conectan los aerogeneradores entre si y a su vez con la subestación offshore, llamados cables inter-array, así como los cables que van desde la subestación offshore a la costa, llamados cables de evacuación.

5.1.1 Dimensionamiento de la bobina para el transporte de cable inter array con el vehículo SCARGO

Para el dimensionamiento básico de la bobina del vehículo SCARGO que aloja los cables inter-array, se ha hecho una selección de varios cables de características típicas en el sector eólico offshore. En base a las propiedades mecánicas de dichos cables se ha

realizado un cálculo básico de posibles dimensiones y pesos de bobinas, lo que sirve como primera aproximación para establecer opciones de diseño del vehículo SCARGO II.

La Tabla 5-I muestra posibles dimensiones de bobinas según el tipo de cables y sus longitudes.

	Variante del cable Variante vehículo	Unidad	Inter array cable				
			sin fibra óptica		con fibra óptica		
					SCARGO I	SCARGO II	
Propiedades eléctricas	Potencia del cable (línea)	MW	17	32	34	34	41
	Tensión línea	kV	33	33	33	33	33
	AC/DC		AC	AC	AC	AC	AC
	Número de fases en el cable		3	3	3	3	3
	Sección (Cu)	mm ²	95	300	400	400	630
	Corriente máxima	A	305	554	600	600	721
Propiedades mecánicas	Diámetro exterior del cable	m	0,098	0,119	0,131	0,131	0,147
	Peso específico	ton/Km	12,8	21,6	26,6	26,6	37,2
	Densidad cable	ton/m ³	1,70	1,94	1,97	1,97	2,19
	Radio de curvatura mínima	m	1,76	2,14	2,36	2,36	2,65
Dimensionamiento de la bobina	Longitud del cable [m]	m	10000	10000	3000	10000	10000
	Bobina diámetro interior	m	3,53	4,28	4,72	4,72	5,29
	Bobina diámetro exterior	m	9	9	8	10	11
	Altura del Bobina	m	1,58	2,55	1,39	2,49	2,63
	Peso del tambor sin cable (10%)	ton	12,8	21,6	8,0	26,6	37,2
	Peso del cable	ton	128	216	79,8	266	372
	peso total (tambor+ cable)	ton	141	238	88	293	409

Tabla 5-I: Propiedades de una selección de cables Inter array y de las dimensiones de sus bobinas

En los siguientes apartados se explican los cálculos realizados en la Tabla 5-I.

5.1.1.1 Propiedades eléctricas del cable

Un cable submarino se define en primer lugar por la corriente que es capaz de transmitir. El segundo parámetro más importante es la tensión máxima del cable.

Para el dimensionamiento de un cable inter array típico se han analizado varios parques eólicos offshore de reciente construcción para determinar cuál es el estándar de cable inter-array instalado.

La Tabla 5-II muestra una lista de parques eólicos en Europa con las propiedades de cables inter array instalados.

Los cables inter array analizados son trifásicos de corriente alterna (AC), de media tensión en 33kV y que evacúan una potencia entre 18 y 40MW.

Basándose en los parques eólicos estudiados y para reducir la posibilidad de variantes de dimensionamiento se ha optado por un cable inter array típico para una potencia de evacuación de 34MW y una tensión nominal de 33kV, trifásico, y que incluye cables de fibra óptica.

Los valores eléctricos de los cables listados en la Tabla 5-I han sido tomados del catálogo del fabricante de cables Nexans [14].

Tipos de cable inter array usados en parques eólicos offshore en la UE						
Nombre del parque	País	Capacidad eléctrica instalada	Diámetro conductor [mm ²]	Diámetro exterior [mm]	Tensión [kV]	Fabricante
Alpha Ventus	Germany	60 MW	3 x 240	125	30	NSW
Baltic 2	Germany	288 MW			36	NSW
Bard Offshore 1	Germany	400 MW			33	Parker Scanrope
Belwind 1	Belgium	165 MW			33	NSW
Borkum West 2	Germany	400 MW			33	NSW
DanTysk	Germany	288 MW	3 x 400		33	Parker Scanrope
Global Tech 1	Germany	400 MW			33	NSW
Horns Rev 2	Denmark	209.3 MW			34	JDR Cables
Meerwind Süd/Ost	Germany	288 MW			33	
Nordsee Ost	Germany	295.2 MW	3 x 400	160	33	
Northwind	Belgium	216 MW			36	
Riffgat	Germany	108 MW	3 x 500/185		33	
Arklow Bank 1	Ireland	25.2 MW	3 x 300	125	35	
Baltic 1	Germany	48.3 MW	3 x 240		30	
Barrow	United Kingdom	90 MW	3 x 300		33	Prysmian 33 kV XLPE
Burbo Bank 1	United Kingdom	90 MW			33	ABB 36 kV XLPE
Egmond aan Zee	Netherlands	108 MW			34	
Greater Gabbard	United Kingdom	504 MW	3 x 240			
Gunfleet Sands	United Kingdom	172.8 MW			33	
Gwynt y Môr	United Kingdom	576 MW	3 x 500		33	
Horns Rev 1	Denmark	160 MW				

Tabla 5-II: Lista de las propiedades de cables inter array en diferentes parques eólicos en Europa, LORC [6]

5.1.1.2 Propiedades mecánicas del cable inter array

De cada tipo de cable inter array elegido en el apartado anterior se pueden determinar sus propiedades mecánicas, que son: su diámetro exterior, su peso específico y su radio de curvatura. Las propiedades mecánicas están definidas en los catálogos de los fabricantes de cables, en este caso Nexans [14].

Para el radio de curvatura mínimo se ha definido un valor que corresponde a 18 veces el diámetro exterior, según recomienda Nexans [14], ver Tabla 5-III.

Recommended Minimum Bending Radii			
Cable Type (choose the highest value of all relevant construction features)		During Installation (F)	Set (F)
All Cable Types	Nylon Covered	30	20
	HDPE Sheath	25	15
	Helical Copper or Brass taped	18	12
	Steel Wire Armoured	18	12
	Solid Aluminium Conductors	12	8
	Compacted or Shaped Stranded Conductors	12	8
MV XLPE Cables	Single Core and Multicore Cables	18	12
LV (0.6/1 kV) Cables	PVC/XLPE Insulation	9	6

Minimum Bending Radius
 $R = F \cdot D$ where, R = Bending Radius (mm), D = Cable Diameter (mm), and F = Factor from above table.

Tabla 5-III: Radios de curvatura mínimos para diferentes tipos de cables submarinos [14]

5.1.1.3 Dimensionamiento de la bobina

Longitud del cable a enterrar

Se han definido dos variantes de longitudes de cable para la instalación de cables inter array.

En la primera variante del vehículo, llamado SCARGO I, el vehículo carga cables de una longitud máxima de 3 Km, que se corresponde con la distancia más larga que pueden tener los tramos de cable inter-array a enterrar en un parque eólico (entre un aerogenerador y la subestación).

En la segunda variante, SCARGO II, el vehículo está cargado con un cable de una longitud de aproximadamente 10 Km para poder enterrar un cable inter-array a lo largo de un radial (línea de aerogeneradores conectados) en un parque eólico.

Diámetro interior de la bobina del cable

El diámetro interior de la bobina es dos veces el radio de curvatura mínimo del cable. Esto es el diámetro más pequeño que se puede aplicar.

Diámetro exterior de la bobina del cable

Una vez determinada la longitud, el diámetro exterior del cable y el diámetro interior de la bobina, se determina el diámetro exterior de la bobina en función de su altura. El objetivo es conseguir una altura mínima manteniendo una buena maniobrabilidad.

Para mantener una cierta maniobrabilidad del vehículo SCARGO se fija el diámetro exterior en 8 metros para el uso de cables de longitudes de hasta 3 Km (SCARGO I) y en 10 metros para longitudes de cable inter-array de 10 Km (SCARGO II), ver Tabla 5-I.

Altura de la bobina del cable

Determinados todos los valores anteriores se puede calcular la altura de la bobina. El cálculo se realiza con una ecuación simplificada (5-3) que asume que el volumen del cable que ocupa el espacio del cilindro es igual al volumen que está ocupado entre el cilindro exterior e interior. Para conseguir mejor precisión del resultado se multiplica la altura calculada con un factor de corrección (5-4)

$$Volumen_{cable} = Volumen_{cilindro\ exterior} - Volumen_{cilindro\ interior} \quad (5-1)$$

$$l_{cable} * \frac{\pi}{4} D_{cable}^2 = a * \left(\frac{\pi}{4} D_{ext}^2 - \frac{\pi}{4} D_{int}^2 \right) \quad (5-2)$$

$$a = \frac{D_{ext}^2 - D_{int}^2}{l_{cable} * D_{cable}^2} \quad (5-3)$$

$$a_{corr} = \frac{D_{ext}^2 - D_{int}^2}{l_{cable} * D_{cable}^2} * \frac{1}{k} \quad (5-4)$$

D_{cable} es el diámetro del cable de potencia, D_{int} es el diámetro interior de la bobina, D_{ext} es el diámetro exterior de la bobina, a es la altura de la bobina y a_{corr} es la altura corregida por el factor k de apilamiento.

El factor k de apilamiento se obtiene de la comprobación con la ecuación exacta de la longitud de la espiral de Arquímedes. La ecuación exacta no tiene una solución algebraica y por eso es difícil de implementar en la tabla de la parametrización.

Se ha calculado la solución numérica de la integral para dos tipos específicos de cables y definido un factor de corrección $k=0,85$. La comparativa entre los resultados de la altura de la ecuación simplificada (5-4) con la formula exacta produce una desviación por debajo de 3% lo que es suficientemente precisa para el dimensionamiento.

Peso del cable y tambor

El peso del cable se calcula multiplicando su peso específico por su longitud.

El peso del tambor se ha estimado en un 10% del peso del cable, lo que se considera de suficiente precisión para el dimensionamiento básico.

5.1.1.4 *Resumen del dimensionamiento básico para la instalación de cables inter array*

En la Tabla 5-I están resumidas diferentes opciones del dimensionamiento de bobinas variando el tipo de cable inter-array y las longitudes a utilizar.

Para los siguientes cálculos de dimensionamiento del vehículo se han restringido a dos variantes. Se ha elegido un cable de 34 megavatios de potencia y de 33kV de tensión alterna trifásica utilizándolo en dos longitudes. Los cables utilizados para el dimensionamiento de los vehículos SCARGO tienen incorporados un cable de fibra óptica. Según el estado del arte de cables utilizados en el sector eólico, esto es así ya que facilita las comunicaciones entre los aerogeneradores y el centro de control del parque, además de ser un requerimiento básico para el proceso innovador con el vehículo SCARGO.

La bobina de la variante 1 que se usa para dimensionar el vehículo SCARGO I tiene una longitud de tres kilómetros. Sus dimensiones y su peso son relativamente pequeños y por eso se espera una buena maniobrabilidad del vehículo.

La longitud de la bobina de la variante 2 para el vehículo SCARGO II es de 10 Km, lo que origina unas dimensiones algo más grandes que las del SCARGO I, pero todavía aceptables para la función que el vehículo tiene que cumplir. Su peso de 266 toneladas ya es relativamente alto pero equipado con un casco de suspensión que permite un adecuado manejo.

En general se puede decir que aunque el diseño del vehículo se basa en un cable inter array específico, ver Tabla 5-I, el uso de otro tipo de cables es posible. Para respetar el espacio del tambor diseñado para el vehículo SCARGO se necesita variar la longitud del cable.

5.1.2 Dimensionamiento de la bobina para el transporte de cable de transmisión a costa (cable export) con el vehículo SCARGO

5.1.2.1 Elección del cable para el dimensionamiento del vehículo SCARGO

Para diseñar un dispositivo para la instalación del cable de transmisión a costa se ha hecho un estudio de los cables usados en los parques eólicos en Europa del Norte (mar de Norte y mar Báltico).

En la Tabla 5-IV están listados los parques eólicos offshore más importantes de Europa con algunas de sus características más importantes como la potencia instalada, la distancia a la costa y la profundidad del agua promedio en el lugar de su instalación.

La Gráfica 5-1 muestra que a lo largo de los últimos años la potencia y la distancia a la costa de los parques eólicos ha ido aumentando de forma progresiva. Los parques eólicos que se van a construir en el futuro van a seguir esa tendencia.

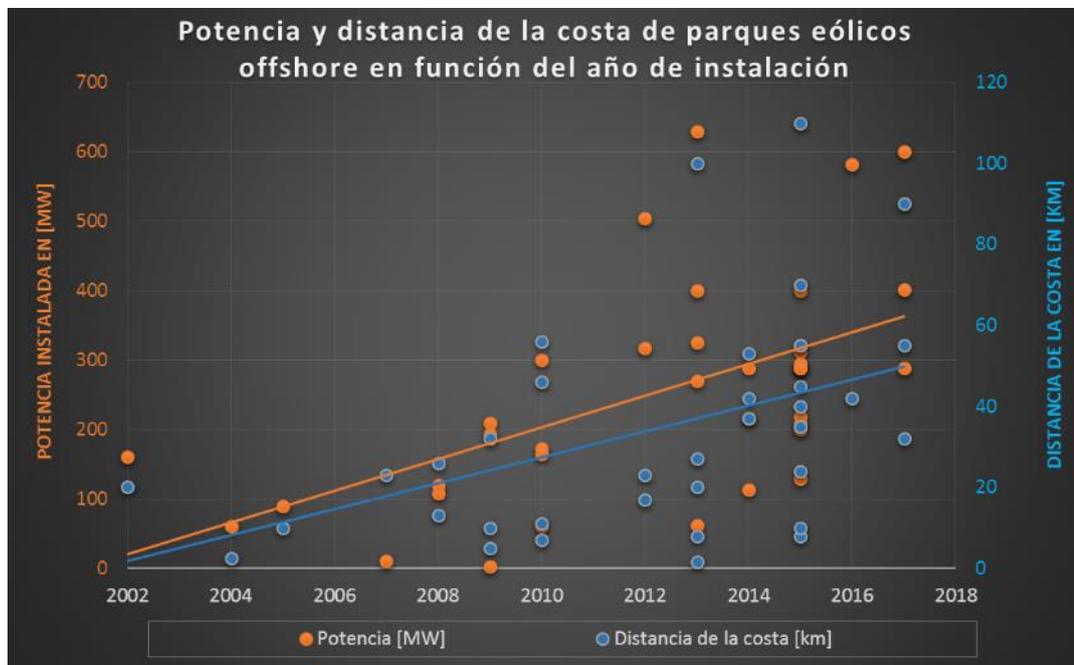
Cada vez habrá menos espacio para emplazamientos cerca de las zonas costeras y además más países tendrán legislaciones medioambientales y sociales que prohíban su construcción a una distancia visible desde la costa.

El incremento de la potencia se debe por un lado al aumento de la demanda de energía renovable y por otro a la tendencia de emplear aerogeneradores más grandes y de esa manera incrementar la potencia del parque y así reducir los costes operativos y de inversión por kWh, consiguiendo un coste de generación cada vez más competitivo.

Parque eólico	Nº	Año finalización	Potencia [MW]	Porcentaje de la capacidad total	Profundidad máxima [metros]	Distancia de la costa [Km]
Teesside	1	2013	62	1%	15	1,5
Blyth Offshore	2	2000	4	0%	11	1,6
Scroby Sands	3	2004	60	1%	8	2,5
Lynn and Inner Dowsing	4	2009	194	2%	11	5
Gunfleet Sands 1 & 2	5	2010	172	2%	15	7
Lincs	6	2013	270	3%	15	8
Westermost Rough	7	2015	210	2%	25	8
Humber Gateway	8	2015	219	2%	18	10
Hywind	9	2009	2	0%	220	10
Kentish Flats	10	2005	90	1%	5	10
Thanet	11	2010	300	3%	25	11
Egmond aan Zee (OWEZ)	12	2008	108	1%	18	13
Sheringham Shoal	13	2012	317	3%	24	17
Horns Rev I	14	2002	160	2%	20	20
London Array	15	2013	630	7%	25	20
Beatrice	16	2007	10	0%	45	23
Greater Gabbard	17	2012	504	5%	32	23
Eneco Luchterduinen	18	2015	129	1%	24	24
Princess Amalia	19	2008	120	1%	24	26
Thorntonbank	20	2013	325	4%	19	27

Horns Rev II	21	2009	209	2%	17	32
Dudgeon	22	2017	402	4%		32
Butendiek	23	2015	288	3%		35
Northwind	24	2014	216	2%	29	37
Amrumbank West	25	2015	288	3%		40
Riffgat	26	2014	113	1%	24	42
Gode Wind 1 & 2	27	2016	582	6%	30	42
Trianel Windpark Borkum (phase 1)	28	2015	200	2%	33	45
Belwind	29	2010	165	2%		46
Meerwind Süd/Ost	30	2014	288	3%	26	53
Nordsee Ost	31	2015	295	3%		55
Borkum Riffgrund I	32	2015	312	3%	29	55
Gemini	33	2017	600	6%		55
Alpha Ventus	34	2010	60	1%	28	56
DanTysk	35	2015	288	3%	31	70
Sandbank	36	2017	288	3%	34	90
BARD Offshore 1	37	2013	400	4%	40	100
Global Tech I	38	2015	400	4%		110
Total de potencia instalada [MW]:			9281		15%	La potencia instalada en parques alejados de la costa más de 70 Km

Tabla 5-IV: Distancia de la costa de los parques offshore de Europa del norte [15]



Gráfica 5-1: Evolución de la potencia instalada y de la distancia de la costa de parques eólicos offshore en Europa entre 2000 y 2017 [15]

La energía generada en los parques eólicos se suele transformar a alta tensión en una subestación offshore y es transportada a la costa vía cables submarinos.

El aumento de la potencia del parque y la mayor distancia a la costa originan cada vez más pérdidas en los cables de tecnología de corriente alterna. Para minimizar las pérdidas del transporte de energía empieza a ser más común usar corriente continua, la cual tiene muchas menos pérdidas en los cables eléctricos dado que prácticamente no hay pérdidas capacitivas. Para poder transportar cada vez más potencia del parque a la costa se puede optar por elevar la tensión o instalar varios cables en paralelo. Emplear varios cables export en paralelo tiene el inconveniente de incrementar considerablemente el coste de la instalación.

La tecnología del transporte de energía con corriente continua presenta el inconveniente de su necesaria transformación con electrónica de potencia en las subestaciones offshore y terrestre, lo que también encarece el coste de la instalación considerablemente. Hoy en día el coste “break even” (o punto de cambio) se alcanza con una distancia de parque de 70 a 100 Km de la costa. Hay que destacar que en los últimos años se han hecho grandes avances en la electrónica de potencia en relación a la viabilidad y a la eficiencia de la conversión, que favorecen la aplicación de la tecnología de corriente continua para las instalaciones offshore en el futuro.

El proceso de la instalación de los cables export actualmente se realiza con barcos cableros que llevan un solo cable que se coloca y entierra en el fondo del mar. Por el elevado peso y tamaño del cable, la longitud máxima que se ha conseguido instalar hasta ahora es de 70 Km. En el caso de ser necesario cubrir distancias mayores a 70 Km hay que realizar varios tramos de esta longitud y conectarlos vía un empalme en alta mar.

5.1.2.2 Cálculos del dimensionamiento de la bobina

En la Tabla 5-V se muestran las características eléctricas y mecánicas del cable elegido, así como las dimensiones básicas y el peso de la bobina calculada.

	Propiedad / Característica	Unidad	Export cable SCARGO III
Propiedades eléctricas	Potencia del cable (línea)	MW	314
	Tensión línea	kV	220
	AC/DC		AC
	Número de fases en el cable		1
	Sección (Cu)	mm ²	1000
	Corriente máxima	A	825
Propiedades mecánicas	Diámetro exterior del cable	m	0,241
	Peso específico	ton/Km	104
	Densidad cable	ton/m ³	2,28
	Radio de curvatura mínimo	m	4,34
Dimensionamiento de la bobina	Longitud del cable [m]	m	70000
	Bobina diámetro interior	m	8,68
	Bobina diámetro exterior	m	30
	Altura del Bobina	m	5,72
	Peso del tambor sin cable (10%)	ton	728
	Peso del cable	ton	7280
	Peso total (tambor + cable)	ton	8008

Tabla 5-V: Características eléctricas y mecánicas del cable export y dimensiones y peso resultantes de la bobina

Se ha empleado la misma metodología de cálculo que para el cable inter array, que ya se describió en el apartado anterior.

Características eléctricas y mecánicas del cable

Se ha elegido un cable de alta tensión de corriente alterna de 220kV y de 341MW de potencia nominal que actualmente se utiliza en muchos parques eólicos. Sus características eléctricas y mecánicas se han escogido del catálogo de ABB [4].

Longitud de la bobina del cable

Para el dimensionamiento básico del vehículo SCARGO III se ha utilizado la máxima longitud de 70 Km que actualmente se instala con barcos cableros. Para distancias superiores a 70 Km se tendría que utilizar el mismo proceso que existe actualmente y que consiste en subir a bordo de un barco o una plataforma los dos extremos de los dos cables a conectar y realizar el empalme de los mismos en seco. Actualmente no existe ninguna tecnología de conexión húmeda (conexión bajo el agua) que sea capaz de conectar cables con tensión mayor de 24kV, ver apartado 5.2.10.

Diámetro interior de la bobina del cable

El radio diámetro interior de la bobina es dos veces el radio de curvatura mínimo.

Diámetro exterior de la bobina del cable

Una vez determinada la longitud, el diámetro exterior del cable y el diámetro interior de la bobina, se determina el diámetro exterior de la bobina. El objetivo es la optimización entre altura y buena maniobrabilidad. En el caso del cable export, debido a su gran longitud es imposible lograr una buena solución.

Se ha optado por un diámetro exterior de la bobina de 30 metros para conseguir una altura lo más reducida posible, dado que un objetivo de la instalación es acercarse con el vehículo SCARGO lo máximo posible a la orilla.

Altura de la bobina del cable

La altura de la bobina se calcula con la ecuación (5-1) a base de los valores de la longitud, el diámetro exterior del cable, el diámetro exterior e interior de la bobina.

5.1.2.3 *Resumen del dimensionamiento básico para la instalación de cables export*

Como ya se desprende de las dimensiones de la bobina, con un diámetro de 30 metros, una altura de 5,72 metros y un peso de aproximadamente 8000 toneladas, la construcción de un vehículo que pueda manejar una bobina de estas dimensiones es muy difícil. Adicionalmente las dimensiones del vehículo lo hacen muy poco ágil y con poca capacidad de maniobra en el proceso del enterramiento del cable. El hecho de tener una altura total muy elevada lo hace más susceptible a la fuerza de oleaje y corrientes en aguas de poca profundidad, sobre todo trabajando cerca de la orilla.

5.2 Dimensionamiento de los sistemas mecánicos y eléctricos del vehículo

Es necesario definir las funcionalidades que debe reunir el vehículo. Una vez establecidas dichas funciones se han diseñado y dimensionado los componentes de las diferentes variantes del vehículo SCARGO y con más detalle del vehículo SCARGO II.

Este proceso ha sido iterativo, lo que conlleva la necesidad de realimentar algunos parámetros y repetir los cálculos hasta conseguir un diseño óptimo. La parametrización del dimensionamiento permite la adaptación y reconfiguración del vehículo y sus

componentes de forma rápida en función de diferentes aplicaciones y necesidades que puedan surgir en el futuro.

Los componentes principales del vehículo SCARGO se muestran en la Tabla 5-VI.

Nº	Componente	Función
1	Sistema de propulsión por cadenas	Permite el desplazamiento del vehículo SCARGO.
2	Arado y/o “espada” con agua a presión	Sirve para el enterramiento de cables, diseño de sistemas intercambiables para diferentes tipos de suelos.
3	Tambor de cable	Almacena una bobina de cable de potencia.
4	Casco de suspensión (parte de la unidad a remolcar)	Permite reducir la fuerza de gravedad resultante del vehículo o del cable, hace posible la flotabilidad del vehículo o del cable durante el transporte.
5	Tensor de cable	Garantiza una tensión adecuada del cable de potencia durante el proceso de enterramiento.
6	Brazo de manipulación	Permite guiar el cable durante el proceso de enterramiento y en la fase de conexión o desconexión del cable con el vehículo SCARGO
7	Transformador	Transforma la energía eléctrica del cable a baja tensión para su uso en el vehículo.
8	Baterías Li-Ion	Permiten el funcionamiento del vehículo cuando no está conectado al cable de potencia
9	Cámaras y sistemas de comunicación inalámbrica	Mantienen la comunicación cuando el vehículo no está conectado al cable de potencia y de comunicación
10	Conector húmedo	Permite conectar y desconectar los cables de potencia bajo el agua (necesario para realizar las operaciones de carga de cable)

Tabla 5-VI: Equipamiento del vehículo SCARGO

En los siguientes apartados se describe con más detalle la elección de los componentes del vehículo, así como su dimensionamiento.

5.2.1 Sistema de propulsión

Se ha elegido la propulsión por cadenas ya que es el sistema más adecuado y versátil para los diferentes tipos de suelos que se pueden encontrar en el fondo del mar.

Las cadenas pueden ser dimensionadas para obtener una gran superficie de contacto con el suelo lo que reduce la fuerza específica sobre el suelo y permite transportar elevadas cargas. Por eso se considera el sistema más apto para suelos blandos, que son los más habituales en el mar del Norte.

Las cadenas permiten subir pendientes sin perder la tracción con el suelo y seguir una ruta con la precisión necesaria, adicionalmente posibilitan giros casi sin radio mediante el accionamiento contrario de las mismas. Esto facilita las maniobras complicadas cerca de la subestación o la colocación del cable en los dispositivos de los aerogeneradores.

De cara al impacto medioambiental merece la pena mencionar que el uso de cadenas dimensionadas adecuadamente no deja apenas huellas en el fondo del mar y es menos invasivo para la flora y fauna marina que otros sistemas.

El dimensionamiento básico del accionamiento depende en gran parte del peso de cable a transportar, que a su vez se basa en la información del apartado 5.1.

La parametrización del sistema de tracción se sustenta en los cálculos de dimensionamiento de sistemas de tracción de vehículos especiales [16].

En la Tabla 5-VII están recogidos los valores del dimensionamiento de diferentes escenarios para el vehículo SCARGO.

Denominación	Denominación de la variable	Cable inter array	Cable inter array	Cable export	Unidad
		SCARGO I	SCARGO II	SCARGO III	
Peso efectivo del vehículo (considerando la suspensión)	m	50	100	500	ton
Fuerza de presión específica del suelo	F_especif_suelo	15	15	15	kN/m ²
Distancia entre ejes	a	10	10	30	m
Distancia entre las cadenas (máxima)	e	10	10	30	m
Ancho de la cadena	b	1,6	3,3	5,5	m
Fuerza del peso	F_peso	490,5	981	4905	kN
Fuerza de presión al suelo	F_suelo	15	15	15	kN
Coefficiente de resistencia interna en movimiento	f	0,09	0,09	0,09	
Fuerza de tracción (sin inclinación)	F_t	44,1	88,3	441,5	kN
Ángulo de pendiente máximo	alpha	15	15	15	°
Fuerza de subida de pendiente	F_s	127,0	253,9	1269,5	kN
Coefficiente de resistencia entre cadena y suelo	my	0,9	0,9	0,9	
Fuerza de giro	F_g	110,4	220,7	1103,6	kN
Ancho SCARGO	a	14	14	30	m
Altura SCARGO	h	6,80	6,80	12,80	m
Área del vehículo en (lado del vector de la velocidad)	A_veh	95,2	95,2	384	m ²
Coefficiente de resistencia	c_forma	1,05	1,05	1,05	
Densidad del agua	Ro_agua	1020	1020	1020	kg/m ³
Velocidad de la corriente	v_corr	1	1	1	m/s
Velocidad resultante	v_total	1,5	1,5	1,5	m/s
Fuerza resultante de resistencia por el agua	F_res_agua	114,7	114,7	462,7	kN
Fuerza total de movimiento (tracción + pendiente + giro + resistencia por el agua)	F_tot	396,2	677,6	3277,3	kN
Coefficiente de suciedad	f_suc	0,8	0,8	0,8	

Diámetro del piñón de la cadena	D_cad	1,00	1,00	1,00	m
Par de tracción a las cadenas	T_cad	247,6	423,5	2048,3	kNm
Velocidad del SCARGO	v	0,5	0,5	0,5	km/h
Revoluciones del piñón de la cadena	n_cad	2,65	2,65	2,65	rpm
Revoluciones máximas del motor	n_mot	1800	1800	1800	rpm
Factor de reducción máxima de la caja de cambio	i	679	679	679	
Rendimiento mecánico hidráulico (motor hidráulico)	eta_hidr	0,98	0,98	0,98	
Par del motor hidráulico	T_mot	372,3	636,8	3080,1	Nm
Rendimiento volumétrico del motor	eta_vol	0,96	0,96	0,96	
Potencia mecánica	P_mot	75	128	617	kW

Tabla 5-VII: Parametrización del dimensionamiento de la tracción del vehículo SCARGO, valores para diferentes escenarios del SCARGO

En los siguientes apartados se explican en detalle los cálculos y resultados reflejados en la Tabla 5-VII.

5.2.1.1 Cálculo del peso resultante del vehículo

El dimensionado del accionamiento por tracción de cadenas para el vehículo SCARGO se ha basado en los cálculos de vehículos especiales [16]. Dichos cálculos están hechos para vehículos en tierra. En el caso del SCARGO se trata de un vehículo que opera bajo el agua. Por ello cuenta con la ventaja de poder suspender gran parte de su peso con la ayuda de un casco de suspensión.

Se ha definido un peso resultante del vehículo bajo el agua para tener suficiente contacto y fricción con el suelo, de acuerdo con la ecuación (5-7).

$$F_{grav,veh.} = m_{veh.} * 9,81 \frac{m}{s^2} \quad (5-5)$$

$$F_{res,veh} = F_{grav,veh.} - F_{susp.} = (m_{veh.} - V_{veh} * \rho_{agua}) * 9,81 \frac{m}{s^2} \quad (5-6)$$

$$m_{veh,agua} = m_{veh.} - V_{veh} * \rho_{agua} \quad (5-7)$$

Donde $F_{grav,veh}$ es la fuerza de gravedad del vehículo fuera del agua, m_{veh} es el peso del vehículo fuera del agua, $F_{res,veh}$ es la fuerza resultante del vehículo al suelo cuando está bajo el agua, F_{susp} es la fuerza de suspensión de todo el vehículo, V_{veh} es el volumen del vehículo SCARGO incluido el cable y el casco de suspensión en $[m^3]$, ρ_{agua} es la densidad del agua en $[ton/m^3]$, $m_{veh,agua}$ es el peso equivalente del vehículo SCARGO bajo el agua.

Esto permite realizar maniobras con las cadenas y al mismo tiempo transportar una carga de cable de un peso elevado.

Para los diferentes tipos de vehículo SCARGO se han definido pesos equivalentes bajo el agua en función del peso total del vehículo con el cable a transportar. El peso equivalente bajo el agua del SCARGO I se ha definido en 50 toneladas, el del SCARGO II en 100 toneladas y el de SCARGO III en 500 toneladas que corresponden aproximadamente al 10% de sus pesos fuera del agua.

Estos pesos son equivalentes a sus fuerzas resultantes bajo el agua según ecuación (5-6). Los siguientes cálculos para el vehículo SCARGO están basados en vehículos operados fuera del agua [16]. Se puede tomar esa analogía dado que se ha calculado la fuerza resultante al suelo del vehículo SCARGO (que corresponde a un peso equivalente).

5.2.1.2 Dimensionamiento de la cadena

Las dimensiones básicas de las cadenas son la distancia entre los ejes a de la cadena, la distancia entre las dos cadenas e , el ancho de las cadenas b y el diámetro del piñón de la cadena, D_{cad} , ver Ilustración 5-1.

Para obtener una buena maniobrabilidad se suele elegir la misma distancia entre ejes y entre las cadenas. De ese modo se puede conseguir un radio de giro en movimiento pequeño y obtener una buena estabilidad del vehículo.

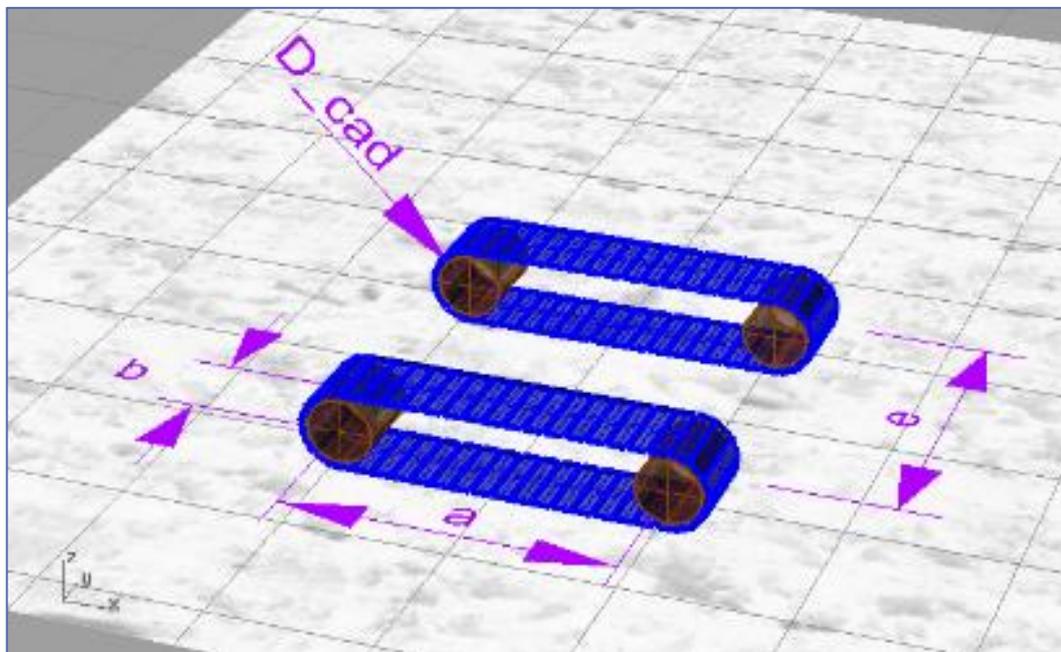


Ilustración 5-1: Cotas básicas de las cadenas de tracción

En el caso de los vehículos SCARGO I y SCARGO II para el cable inter array se ha elegido una distancia entre cadenas y ejes de diez metros y en el caso del vehículo SCARGO III para el cable export una distancia de treinta metros.

Conociendo la distancia entre los ejes se puede calcular el ancho de las cadenas b_{cad} según la ecuación (5-8) que depende de la fuerza resultante del vehículo $F_{grav,res}$, de la fuerza específica de presión del suelo F_{suelo} y de la distancia entre los ejes a_{cad} .

$$b_{cad} = F_{grav,veh.} / (F_{suelo} * 2 * a_{cad}.) \quad (5-8)$$

5.2.1.3 Cálculo de la fuerza total de movimiento

En los vehículos de cadenas de tracción existen principalmente tres diferentes fuerzas de tracción, que el vehículo tiene que superar para ponerse en movimiento. Son la fuerza de tracción en movimiento sobre terreno horizontal $F_{trac,horiz}$, fuerza de tracción para subir pendientes $F_{trac,sub}$, la fuerza de tracción en giro F_{giro} y la fuerza de resistencia al agua

$F_{res,agua}$. En función de las anteriores se calcula la fuerza resultante de movimiento $F_{trac,mov}$ según la ecuación (5-9).

Este cálculo es muy conservador y sobredimensiona la fuerza dado que en la realidad nunca se ejercen las tres fuerzas a la vez.

$$F_{trac,mov} = F_{trac,horiz.} + F_{trac,sub} + F_{giro} + F_{res,agua} \quad (5-9)$$

Fuerza de tracción sobre terreno horizontal

La fuerza de tracción de la máquina en horizontal se calcula utilizando el factor f de la resistencia y la fricción interna de la máquina en movimiento, que suele oscilar entre 0,08 y 0,1. Para el dimensionamiento del vehículo se ha utilizado un factor de $f=0,9$.

$$F_{trac,horiz} = f * F_{grav,res} \quad (5-10)$$

Fuerza de tracción sobre terreno inclinado

La componente del movimiento del vehículo sobre terreno inclinado se calcula con la ecuación (5-11), un valor de tracción subiendo una pendiente. Para el caso del vehículo SCARGO se ha fijado un ángulo máximo de pendiente de $\alpha = 15$ grados lo que corresponde a una subida de 26,8%.

$$F_{trac,incl.} = F_{grav,res} * \sin(\alpha) \quad (5-11)$$

Fuerza de realización de giros

En el caso de realizar giros con un vehículo de cadenas se tiene que superar la fuerza F_{giro} entre el suelo y las placas de las cadenas, que a su vez depende de la distancia entre las cadenas y del coeficiente de fricción μ_{placas} entre el suelo y las placas, como se puede ver en la ecuación (5-12).

$$F_{giro} = F_{grav,res} * \mu_{placas} * \frac{a}{4e} \quad (5-12)$$

El coeficiente de fricción entre las placas y el suelo se define con $\mu_{placas}=0,9$ basándose en la experiencia [16]

Fuerza de la resistencia al agua

La fuerza de la resistencia al agua $F_{res,agua}$ es pequeña comparada con las otras fuerzas de fricción. Se la ha incluido en el cálculo para evaluar y considerar el grado de la influencia de las corrientes en el resultado.

La fuerza de resistencia al agua será prácticamente despreciable, dado que la velocidad de enterramiento es muy pequeña. Se añade dicha fuerza ya que para el caso de superposición de corrientes en el agua puede ejercer influencia sobre la fuerza total.

$$F_{res,agua} = \frac{1}{2} * c_{forma} * \rho_{agua} * A_{veh} * v_{total}^2 \quad (5-13)$$

$$v_{total} = v_{veh} + v_{corriente} \quad (5-14)$$

Donde c_{forma} es el coeficiente de forma, ρ_{agua} =la densidad de agua en $[kg/m^3]$, A_{veh} el área del vehículo en dirección al vector de la velocidad en $[m^2]$ y v_{total} la velocidad total aparente entre el vehículo y el agua en $[m/s]$, v_{veh} la velocidad del vehículo SCARGO en $[m/s]$, $v_{corriente}$ la velocidad de la corriente que tiene el mismo vector que el movimiento del vehículo en $[m/s]$.

La fuerza de la resistencia al agua depende del coeficiente de forma c_{forma} que pone el cuerpo perpendicular al vector de la velocidad resultante. En el caso del vehículo SCARGO se calcula con un coeficiente de $c_{forma}=1,05$ que corresponde a un cuerpo de cara rectangular frente a la dirección de movimiento y de la corriente.

La fuerza de resistencia también depende de la densidad del medio; el cálculo está hecho con la densidad de agua siendo $\rho_{agua}=1020\text{kg/m}^3$.

El área del vehículo en la dirección al movimiento A_{veh} se ha calculado multiplicando el ancho y la altura total del vehículo.

La velocidad total que se utiliza en la ecuación (5-13) es la suma de la velocidad del vehículo en el modo de enterramiento más una velocidad de corriente con componente opuesto a la velocidad de movimiento del SCARGO. La velocidad del SCARGO en el modo de enterramiento es de 0,5 m/s máximo y la velocidad de corriente empleada es de 1 m/s.

En el cálculo de la fuerza de resistencia al agua de la ecuación (5-13) se puede apreciar que la velocidad tiene una influencia de forma cuadrática. Para las velocidades muy pequeñas del SCARGO alrededor de 0,5 m/s, la fuerza de resistencia al agua tiene una contribución de aproximadamente 2% a la fuerza de la tracción total. Si se añade la velocidad de 1,5 m/s equivalente a una corriente fuerte en dirección opuesta, la fuerza de la resistencia al agua contribuye con un 20% a la fuerza de tracción total.

5.2.1.4 Cálculo del par y la potencia del motor necesario

Para calcular el par de la tracción de las cadenas se define el diámetro del piñón de la cadena y el coeficiente de suciedad como se puede apreciar en la ecuación (5-15).

$$T_{cad} = F_{trac,mov} * D_{cad} / (2 * f_{suciedad}) \quad (5-15)$$

Donde T_{cad} es el par transmitido al piñón de la cadena en [kNm], D_{cad} el diámetro del piñón de la cadena en [m] y $f_{suciedad}$ el factor de suciedad.

El factor de suciedad $f_{suciedad}$ considera diferentes condiciones de suelo (por ejemplo, barro o arena) que producen suciedad entre la cadena y el piñón, lo que tiene una influencia al par transmitido a la cadena. El diámetro de la cadena se estima en $D_{cad}=1$ metro con el objetivo de conseguir una altura lo más reducida posible de la tracción de cadenas.

Calculo de las revoluciones del piñón de la cadena de tracción

Las revoluciones del piñón de la cadena se calculan a base del diámetro del piñón de la cadena D_{cad} y la velocidad de trabajo definida para el vehículo, como muestra la ecuación (5-16).

$$n_{cad} = v_{veh} * D_{cad} * \pi \quad (5-16)$$

Donde n_{cad} son las revoluciones de la cadena en [rpm].

Calculo del factor de reducción entre el motor y las cadenas

El valor de reducción de la caja de cambio i_{reduc} es el ratio entre las revoluciones del motor n_{motor} y las revoluciones de la cadena n_{cad} como se ve en (5-17). En el caso del vehículo SCARGO al tener una velocidad muy pequeña se necesita una reducción grande que es posible conseguir usando un motor hidráulico.

$$i_{reduc} = \frac{n_{motor}}{n_{cad}} \quad (5-17)$$

Calculo del par del motor hidráulico

El par del motor necesario se calcula usando la ecuación (5-18) con el valor de la reducción obtenido en la ecuación (5-17) y aplicando un rendimiento de la conversión hidráulica.

$$T_{motor} = \frac{T_{cad}}{(i_{reduc} * \eta_{hidr})} \quad (5-18)$$

Donde T_{motor} es el par necesario del motor hidráulico en [kNm], η_{hidr} el rendimiento de la conversión hidráulico - mecánico del motor hidráulico. El rendimiento hidráulico mecánico se estima un valor de $\eta_{hidr} = 0,98$.

Calculo de la potencia mecánica del sistema de tracción

La potencia del motor se calcula según la ecuación (5-19) con los valores obtenidos de las ecuaciones anteriores y divididos entre el rendimiento hidráulico η_{hidr} y volumétrico η_{vol} .

$$P_{motor} = T_{motor} * \frac{2\pi}{60} * \frac{n_{motor}}{(\eta_{hidr} * \eta_{vol})} \quad (5-19)$$

Donde P_{motor} es la potencia del motor hidráulico en [kW], η_{vol} es el rendimiento en los caudales volumétricos del motor hidráulico.

Con respecto al rendimiento volumétrico se estima un valor de $\eta_{vol} = 0,96$

5.2.1.5 *Resumen del dimensionamiento del sistema de tracción*

Los cálculos de la potencia necesaria para las diferentes variantes de vehículos SCARGO muestran que dicha potencia es relativamente pequeña, considerado el peso que puede transportar el vehículo. En muchas aplicaciones submarinas se usan cadenas de tracción en vehículos de similar tamaño, como por ejemplo en el CBT 1100 de SMD [10].

En el caso de que el vehículo se encuentre con fuertes oleajes o corrientes que pueden desestabilizarle, existe la opción de adaptar la fuerza del peso resultante de vehículo quitando parte de la suspensión y consecuentemente aumentar la tracción por el suelo.

Para mejorar la maniobrabilidad del vehículo se pueden usar cuatro cadenas de tracción, cada una equipada con una propulsión y dirección como se ha diseñado en el vehículo HI-TRAQ de IHC [17], ver Figura 5-1.



Figura 5-1: Vehículo Hi-TRAQ con cuatro cadenas para enterramientos de cable submarinos [17]

5.2.2 Dimensionamiento del tambor para el cable de potencia

En este apartado se explica el dimensionamiento del tambor del cable de potencia para su uso en el vehículo SCARGO. Las dimensiones de la bobina necesaria para las diferentes versiones del SCARGO han sido calculadas en el apartado 5.1, en la Tabla 5-I y Tabla 5-V respectivamente.

Se ha optado por un tambor no giratorio dado que el cable del tambor tiene que estar conectado eléctricamente al vehículo SCARGO durante el proceso del enterramiento. En el momento de la redacción no se conoce ningún sistema capaz de transmitir una potencia eléctrica elevada (1MW) sobre un eje giratorio en un ambiente húmedo (en agua salada).

En muchas instalaciones de cables submarinos se utilizan carruseles que giran durante el proceso de enrollar y desenrollar el cable y así facilitan su manejo.

Al usar un tambor fijo se suele aplicar la misma torsión definida en el proceso de enrollar la bobina en el tambor. De esta manera se compensa el estrés de torsión en el cable en el proceso inverso y así se evita que se formen nudos después de desenrollarlo. Los tambores no giratorios se suelen utilizar para cables hasta un cierto grado de rigidez y diámetro. Para la instalación de los cables inter array el uso de tambores no giratorios se aplica actualmente de la misma forma que el proceso que incorpora carruseles.

El tambor está compuesto de una placa base y una estructura de tubos de acero para recoger el cable bobinado.

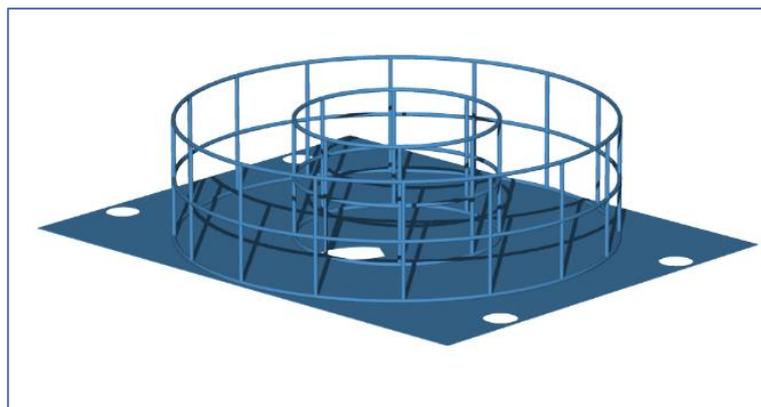


Figura 5-2: Dibujo del tambor del SCARGO II (para un cable Inter array de 10km)

El peso se ha estimado en un 10% del peso del cable en el proceso de dimensionamiento básico.

Para el vehículo SCARGO II (cable inter array con longitud de 10km) se ha realizado un diseño conceptual y calculado su peso en base al diseño realizado con un programa de CAD 3D. Según este cálculo el tambor pesa 25 toneladas, lo que corresponde a un 9,5% del peso de la bobina.

5.2.3 Casco de suspensión

El casco de suspensión es necesario para poder compensar la fuerza de gravedad resultante del vehículo SCARGO y de la bobina del cable de potencia. El casco de flotación permite que el vehículo SCARGO y el cable a enterrar puedan flotar y de esta manera ser remolcados para su transporte. El SCARGO, utilizando un casco de suspensión, ejerce mucha menos fuerza de fricción con el suelo y además los sistemas de tracción y propulsión pueden tener un diseño más ligero y pequeño. Además reduce el consumo de energía del vehículo considerablemente, dado que la fricción con el suelo es mínima.

En el caso del SCARGO I y II se ha dimensionado la compensación de tal manera que la fuerza de gravedad resultante bajo el agua es de aproximadamente un 10% de la fuerza de gravedad fuera del agua, ver la ecuación (5-6).

En un primer lugar se ha calculado o estimado el peso y el volumen de cada componente del vehículo para obtener las densidades respectivas y una densidad media, así como un volumen y un peso total de todo el vehículo. Con estos valores y la condición de la fuerza de gravedad resultante se pueden calcular el peso a desplazar y el volumen del casco de suspensión necesario.

En la Tabla 5-VIII están listados los pesos, densidades y volúmenes respectivos de los diferentes componentes del SCARGO.

	Componente / Característica	Cable inter array		Cable export	Unidad
		SCARGO I	SCARGO II	SCARGO III	
Propiedades cable	Potencia de la línea	34	34	314	MW
	Tensión de línea	33	33	220	kV
	Sección (Cu)	400	400	1000	mm ²
	Corriente	600	600	825	A
	Longitud del cable	3000	10000	70000	m
	Diámetro del cable	0,131	0,131	0,241	m
Pesos	Peso del tambor sin cable	7,98	26,6	728	ton
	Peso del cable [t]	79,8	266	7280	ton
	Peso de la oruga	26,33	58,52	1201,20	ton
	Peso de la unidad de enterramiento	36	36	50	ton
	Peso de la unidad hidráulica (HPU)	2	2	10	ton
	Peso del transformador	23	23	23	ton
	Peso del brazo de manipulación del cable	5	5	10	ton
	Peso del casco de suspensión	15	40	232	ton
	Peso de la batería de Li-Ion	31	31	17	ton
	Peso total del vehículo	194,9	487,8	9551,2	ton
Densidades	Densidad del cable	1,97	1,97	2,28	ton/m ³
	Densidad del tambor	7,8	7,8	7,8	ton/m ³
	Densidad de la oruga	7,8	7,8	7,8	ton/m ³
	Densidad de la unidad de enterramiento	7,8	7,8	7,8	ton/m ³
	Densidad de la unidad hidráulica (HPU)	2,5	2,5	2,5	ton/m ³
	Densidad del transformador	1,7	1,7	1,7	ton/m ³
	Densidad del casco de suspensión	7,8	7,8	7,8	ton/m ³
	Densidad del brazo de manipulación	5	5	5	ton/m ³
	Densidad de la batería de Li-Ion	0,65	0,65	0,67	ton/m ³
	Densidad media del vehículo SCARGO	2,91	2,24	2,74	ton/m³
Volúmenes	Volumen del cable	40,4	134,8	3193,2	m ³
	Volumen del tambor	1,0	3,4	93,3	m ³
	Volumen de la oruga	3,4	7,5	154,0	m ³
	Volumen de la unidad de enterramiento	4,6	4,6	5,0	m ³
	Volumen de la unidad hidráulica (HPU)	0,8	0,8	1,0	m ³
	Volumen del transformador	13,8	13,8	13,8	m ³
	Volumen del casco de suspensión (área de superficie x espesor)	1,9	5,2	29,8	m ³
	Volumen del brazo de manipulación	1,0	1,0	2,0	m ³
	Volumen de la batería Li-Ion	46,7	46,7	24,9	m ³
	Volumen total del vehículo SCARGO	67,0	217,7	3492,1	m³
	Peso a desplazar	195	488	9551	t
	Volumen a desplazar (suspensión)	124	261	5872	m³

Tabla 5-VIII: Cálculo del casco de suspensión necesario para la flotabilidad de los vehículos SCARGO

Los volúmenes y pesos del cable y de las baterías de Li-Ion están calculados; para el resto de los componentes se ha estimado su peso y volumen en base a información de vehículos y componentes similares que existen actualmente en el mercado. Los detalles de las estimaciones están explicados en el apartado 5.2.

Con el peso y el volumen total del vehículo SCARGO, recopilados en la Tabla 5-VIII, se puede calcular el volumen a desplazar según la ecuación (5-20). Para eso se utiliza el peso deseado bajo el agua que se ha definido en el apartado 5.2.1.1.

$$V_{desplazar} = peso_{SCARGO,total} * \rho_{agua} - V_{SCARGO,total} \quad (5-20)$$

Donde $V_{desplazar}$ es el volumen que tiene que desplazar el casco de suspensión para conseguir la flotabilidad deseada, ρ_{agua} es la densidad de agua, $peso_{SCARGO,total}$ y $V_{SCARGO,total}$

son el peso y el volumen total del vehículo SCARGO con todos sus componentes incluido el cable a enterrar.

La forma y sobre todo la posición del casco de suspensión son elementos fundamentales para la estabilidad del vehículo y para la maniobrabilidad durante el proceso de inmersión del vehículo hasta el fondo del mar. Para conseguir una mejor estabilidad bajo el agua es importante posicionar el casco de suspensión lo más alto posible en el vehículo. Por otro lado es importante mantener la altura total del vehículo lo más reducida posible, así puede moverse en aguas menos profundas y ser menos influenciado por las fuerzas de las olas. Esto último permite su funcionamiento con más oleaje y de esa manera estar operativo durante más días al año.

En la fase de parametrización se han valorado y analizado cuatro opciones de diseño para crear el volumen de suspensión necesario calculado en la Tabla 5-VIII. Las dimensiones de las estructuras de suspensión de las cuatro opciones definidas se muestran en la Tabla 5-IX para los tres variantes del SCARGO.

Parametrización	Cable Inter array		Cable export	Unidad
	SCARGO I	SCARGO II	SCARGO III	
Opción 1: Casco de desplazamiento circular				
Tambor diámetro exterior [m]	8	10	30	m
Diámetro exterior del casco/SCARGO	11,3	14,3	45,8	m
Altura casco = altura tambor	1,39	2,49	5,72	m
Altura total sobre las cadenas	1,39	2,49	5,72	m
Opción 2: Casco de desplazamiento sobre carrusel				
Tambor diámetro exterior [m]	8	10	30	m
Diámetro exterior del casco/SCARGO	8	10	30	m
Altura casco	1,08	2,05	5,99	m
Altura total sobre las cadenas	2,47	4,55	11,70	m
Opción 3: Desplazamiento con 5 cilindros				
Tambor diámetro interior [m]- 0,2m	4,52	4,52	8,48	m
Tambor diámetro exterior [m]	8,00	10,00	30,00	m
Diámetro de los 4 cilindros de suspensión	3,00	3,00	8,00	m
Diámetro exterior del casco/SCARGO	11,00	13,00	38,00	m
Altura cilindros	1,55	4,63	20,92	m
Altura total sobre las cadenas	1,55	4,63	20,92	m
Opción 4: Desplazamiento con casco encima y un cilindro				
Tambor diámetro interior [m]- 0,2m	4,52	4,52	8,48	m
Tambor diámetro exterior [m]	8,00	10,00	30,00	m
Diámetro exterior del casco/SCARGO	8,00	10,00	30,00	m
Altura casco	0,23	1,33	5,50	m
Altura cilindro (= altura tambor+2m)	3,39	4,49	7,72	m
Altura total sobre las cadenas	3,62	5,83	13,22	m

Tabla 5-IX: Dimensiones de los cascos/cilindros de suspensión para las cuatro opciones definidas y los tres tipos de vehículo SCARGO

En la Figura 5-3, Figura 5-4 y Figura 5-5 se puede apreciar en los dibujos la posición de los cascos de suspensión / flotación respecto al SCARGO y la bobina del cable de potencia.

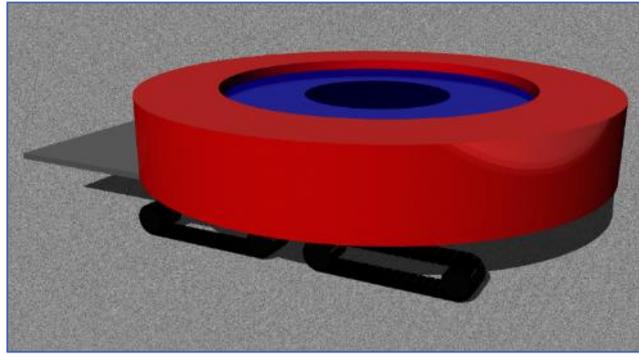


Figura 5-3: Casco de suspensión circular alrededor de la bobina (Opción 1)

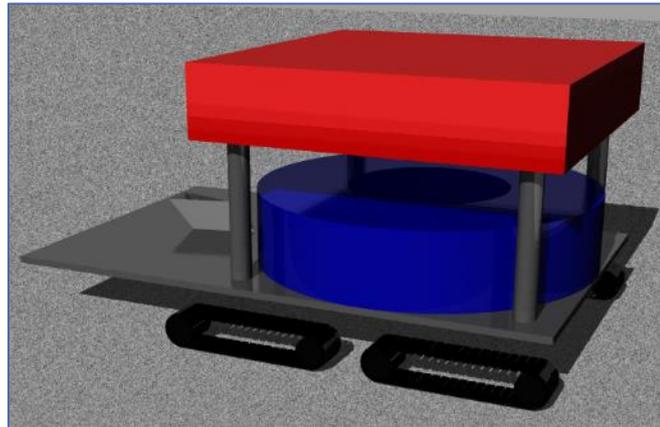


Figura 5-4: Casco de suspensión encima de la bobina (Opción 2)

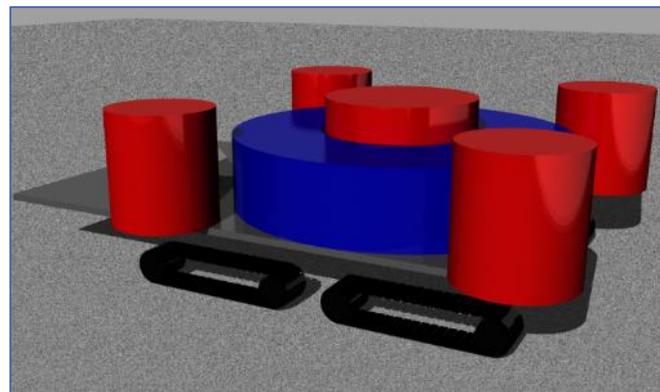


Figura 5-5: Cinco cilindros de suspensión alrededor de la bobina (Opción 3)

En la primera opción se coloca el casco de suspensión alrededor de la bobina, lo que asegura una altura mínima y un buen comportamiento al realizar la inmersión de la estructura. La desventaja es que la anchura del vehículo aumenta considerablemente, lo que perjudica su maniobrabilidad.

En la segunda opción se coloca el casco de suspensión encima de la bobina para conseguir una mejor estabilidad del vehículo bajo el agua. Su desventaja es la elevada altura del vehículo que resulta en menor control en la fase de inmersión y sobre todo dificulta el acceso al cable durante el proceso de carga de la bobina y durante la instalación y enterrado del cable (difícil acceso con el brazo manipulador).

La tercera opción trata de un reparto del volumen de suspensión por medio de cinco cilindros, ver Figura 5-5. Las ventajas son parecidas a las de la variante uno, con la ventaja

adicional de su bajo coste de fabricación. El principal inconveniente que presenta es su elevada altura.

La cuarta opción es una variante de la opción dos, con un cilindro adicional en el centro de la bobina que disminuye algo su altura total. Sus desventajas son similares a las de la opción dos debidas a la difícil gestión del cable.

5.2.3.1 *Resumen*

El diseño del escenario del SCARGO II se ha basado en la primera opción del posicionamiento del casco de flotación alrededor de la bobina, como se puede ver en la Ilustración 5-2.

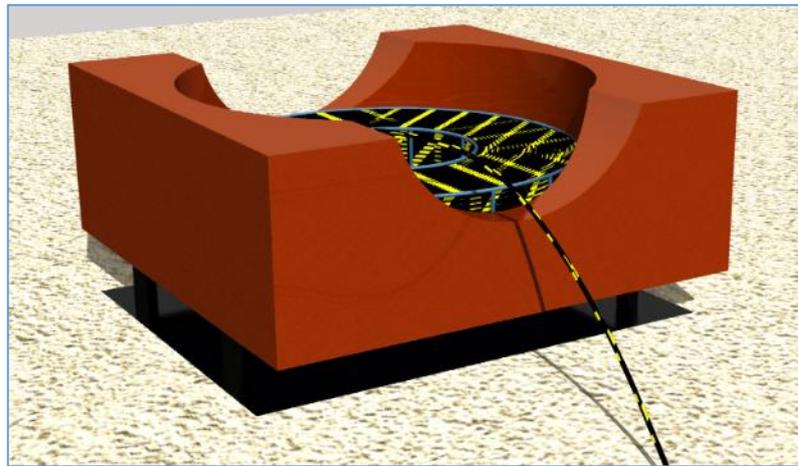


Ilustración 5-2: Casco de suspensión con la bobina del cable de potencia y el soporte

El casco de suspensión se adapta de forma rectangular alrededor de la bobina y deja espacio para la fase de desenrollado del cable. Con el centro de gravedad de la bobina a la misma altura del centro de la fuerza de suspensión del casco de flotación, se espera un mejor comportamiento de flotación para la fase de remolque y para el proceso de inmersión al fondo del mar.

Con este diseño se consigue la altura más reducida posible para todo el vehículo, lo que permite su funcionamiento en malas condiciones meteorológicas en el mar. Esto se debe a que toda la estructura y el centro de gravedad están más cerca del fondo del mar y así el vehículo se ve menos afectado por la fuerza del oleaje.

El diseño final requerirá el reparto del volumen de suspensión entre dos cascos, uno desmontable y modular para la bobina del cable y otro para permitir la total flotabilidad del SCARGO y del cable a instalar. Así la bobina y el vehículo SCARGO pueden ser remolcados y bajados al fondo del mar. La suspensión de los cascos debe ser regulable para permitir la compensación de flotabilidad durante el proceso del enterramiento y cuando el SCARGO realiza maniobras de carga o descarga de bobinas.

5.2.4 Equipo del enterramiento del cable

El vehículo tiene que estar equipado con un sistema para el enterramiento de cables submarinos con capacidad para realizar zanjas en el fondo del mar de hasta 1,5 metros de profundidad. Dependiendo de las condiciones del suelo se utilizan arados, cuchillas con agua a presión (jetting) o en el caso de fondos rocosos, sistemas con sierras de corte.

También se puede emplear un sistema combinado que contiene un arado que lleva incorporado unos eyectores de agua a alta presión, lo que minimiza las fuerzas de arrastre necesarias. Estos sistemas se emplean en suelos arenosos y fangosos, como por ejemplo los del mar del Norte.

El sistema del enterramiento de cables debe ser construido de forma modular para permitir equipar el SCARGO con los diferentes sistemas de enterramiento, según sean las condiciones del suelo para un emplazamiento concreto.

El dimensionamiento se ha basado en las potencias de sistemas parecidos, integrados en vehículos de enterramiento de grandes fabricantes que operan en este mercado actualmente, como por ejemplo [18] [19] o el utilizado en [20].



Ilustración 5-3: Vehículo autónomo ITAT 1000 de excavar zanjas de Pharos Offshore Group [18]



Ilustración 5-4: Fugro Q1400 excavadora de zanjas [19]



Figura 5-6: Ejemplos de unos vehículos para excavar zanjas para la colocación de cables submarinos [20]

Basándose en los datos de vehículos autónomos de excavación de zanjas submarinas para cables existentes actualmente en el mercado, que se muestran en [20], se ha estimado para el SCARGO una potencia mecánica de aproximadamente 485 caballos (364kW) para el proceso de enterramiento. Dicha potencia mecánica equivaldría a aproximadamente 550kW aplicando un factor de rendimiento total de 0,67 entre la conversión mecánica-eléctrica. Incorporando un sistema de espadas de agua a presión se pueden calcular unos 800kW de potencia total para el sistema de enterramiento de cable.

5.2.5 Sistema de tensionado del cable

Actualmente en los barcos cableros se emplea un sistema de pretensado para el enterramiento de cables submarinos con el objetivo de colocar el cable en el fondo del mar con una cierta tensión residual para minimizar el riesgo de formación de lazos o nudos en el momento de la colocación.

La Ilustración 5-5 muestra el proceso y los factores principales a tener en cuenta. Para conseguir la tensión residual deseada en el punto de llegada del cable al fondo TDP (Touch Down Point) se deben tener en cuenta entre otros factores la altura H entre el barco y el fondo, la velocidad del barco (v_s), la velocidad de corrientes en el agua (v_c), la velocidad del desenrollado del cable (v_p) y el peso específico del cable. Todos estos factores determinan la tensión a aplicar al cable a su salida del barco [21].

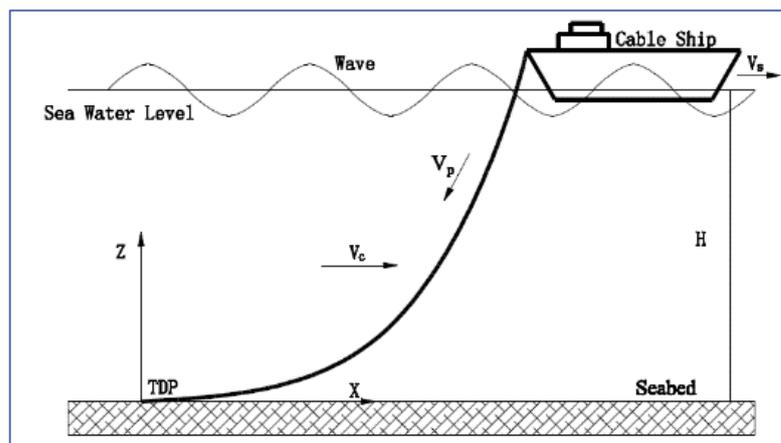


Ilustración 5-5: Factores que influyen en la fuerza de tensado del cable durante el proceso de colocación [21]

Si la tensión en el punto de llegada del cable al fondo (TDP) es demasiado pequeña o incluso cero, se incrementa el riesgo de crear nudos o lazos y de alcanzar un radio de curvatura por debajo de lo permitido en el cable (ver Figura 5-7 b)).

Para evitarlo y asegurar una tensión mínima residual en el TDP, la mayoría de los instaladores de cables submarinos sobredimensiona la fuerza del pre-tensionado por desconocer todos los factores que pueden influir durante el proceso de instalación. La desventaja de este método es el incremento en el riesgo de daños en el cable por exceso de tensión, lo que puede acortar su vida útil o causar la rotura del mismo, ver Figura 5-7 a).

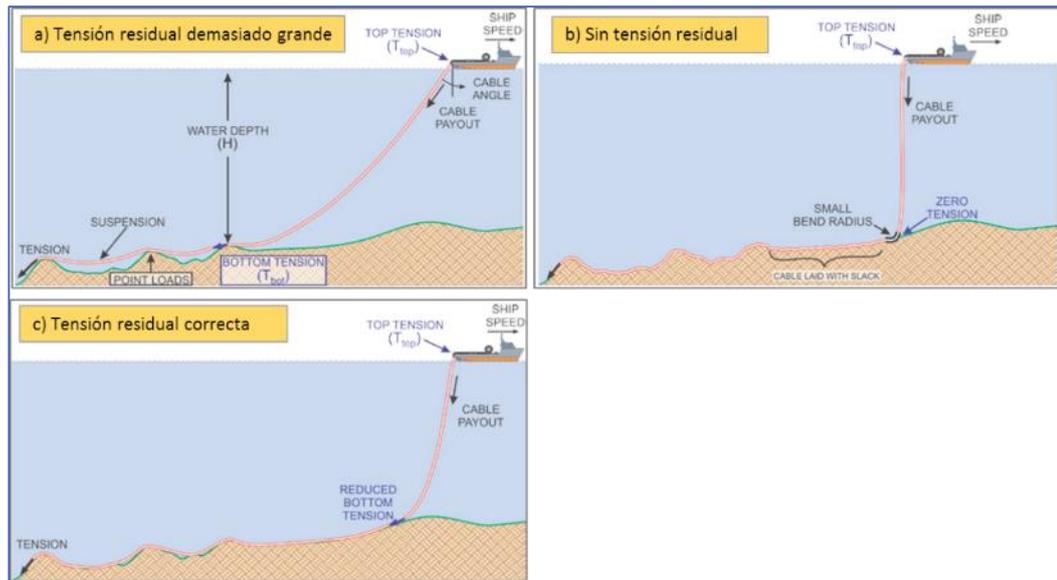


Figura 5-7: Efecto de la tensión residual en la calidad de la colocación del cable [22]

Una de las ventajas que presenta el vehículo SCARGO es la instalación del cable con la mínima fuerza de pretensado necesaria, lo que minimiza los riesgos anteriormente descritos. Dicha ventaja se debe a la mínima altura existente entre la salida del cable de la bobina y el fondo del mar y también a la baja influencia de corrientes y oleaje, dado que el vehículo se encuentra muy cerca del fondo marino donde dichos efectos se reducen al máximo.

Por las razones anteriormente descritas, es posible emplear en el dimensionamiento del SCARGO un tensor con una pretensión muy baja cercana a la tensión residual deseada en el punto de aterrizaje del cable (TDP).

En el dimensionamiento del SCARGO se ha tomado un sistema de pre-tensionado del fabricante Parkburn [23] que pesa alrededor de 5,5 toneladas. Otros fabricantes posibles son MakaiLay Power, Parkburn o Global Marine Systems.

 3.5 Tonne Tensioner (Typical) Specification	
Design Element	Design Criteria
Maximum Tension	3.5 Tonne (in either direction)
Performance	0 – 25 metres per minute @ up to 3.5 Tonne tension
Grip Force	275 kN/m adjustable from 10% to maximum
Track Orientation	2 track – top loading, 500mm max opening between tracks
Track Length	Approx 1.25 metres
Track Pad Type	V-grooved rubber bonded pads (bolted)
Motor Type	AC electric. The motors fitted will be totally enclosed, force fan cooled, foot and flange mounted complete with anti condensation heaters and Class F insulation.
Drive Type	Integrally mounted AC vector drive providing smooth stepless speed and / or torque controlled operations, in either direction from zero to 100% of the design performance and continuously be able to hold full torque at zero speed.
Gearbox Type	Flange mounted rotating case planetary type.
Brake System	Spring applied hydraulic released failsafe brake rated to min 40kN.
Squeeze Adjustment	Track squeeze shall be manually adjusted via a pressure valve located on the tensioner.
Integral HPU	An integrally mounted HPU shall be provided to provide track squeeze, track open and close and track brake functions to min IP56.
Tension Measurement	Load cell based closed loop system complete with pitch compensator.
Product Guidance	Via 2 x manually adjustable horizontally oriented roller or plate guides.
Controls	Via local pendant 10 metre Flying Lead
Instrumentation	Integral HMI complete with LCD screen
Supply Required	3 ph 380 / 480V - 50 / 60 Hz (dual supply capability)
Max Power Demand	20 kW
Weight	Approximately 5500 kilograms
Space Envelope	Approximately 4100 (L) x 2550 (H) x 2150 (W) millimetres
Speed and Distance	An optional & independent encoder based speed and distance assembly can be provided if required.

Figura 5-8: Especificación de un tensor de cables del fabricante Parkburn [23].

5.2.6 Brazo de manipulación del cable

Se requiere un brazo de manipulación del cable para ayudar en el desenrollado del cable de la bobina, durante las fases de cambio de bobinas y para la colocación del cable en los dispositivos de recogida de los aerogeneradores.

Para el SCARGO II se ha calculado un brazo de manipulación con un rango de operación de entre siete y ocho metros. Su peso se ha estimado en cinco toneladas.

Existen varios fabricantes de vehículos de operación remota que han comercializado brazos de manipulación para el uso en un ambiente acuático, aunque hay muy pocos con rangos de operación tan amplios como el necesario en el vehículo SCARGO. Un brazo de dimensiones similares y con una aplicación muy parecida es la grúa manipuladora utilizada en el vehículo remoto CBT 1100 de la empresa SMD [10], ver Figura 5-9.

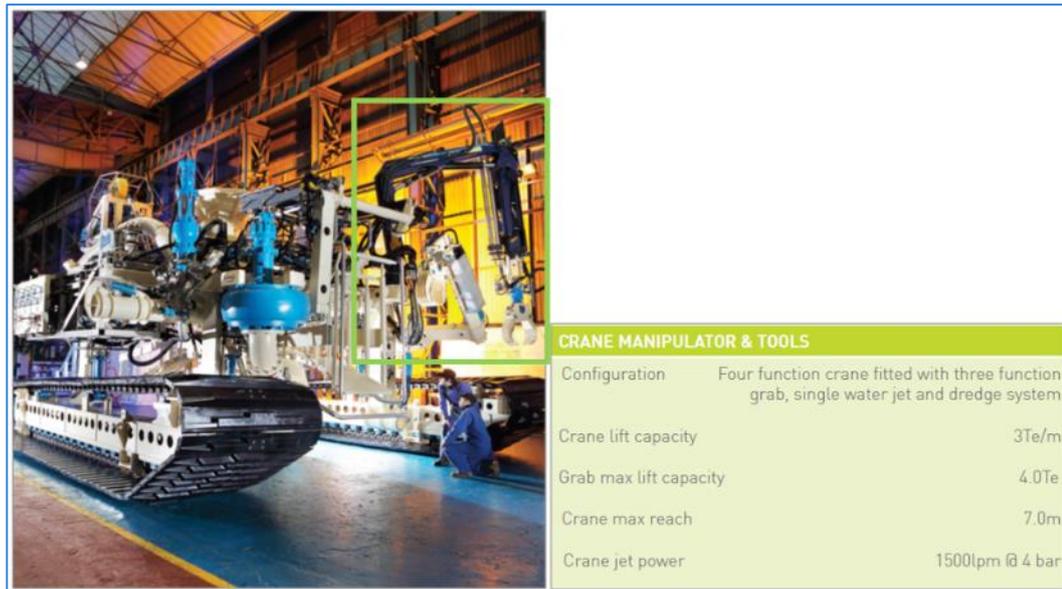


Figura 5-9: Grúa manipuladora para cables submarinos instalada en el CBT1100 de SMD [10]

5.2.7 Transformador

La energía eléctrica se transmite al vehículo SCARGO por medio del cable de potencia. Aunque los cable inter array y export tienen una resistencia eléctrica y reactancia pequeñas, las elevadas longitudes de entre 3 y 70 Km, unido a que la potencia a transmitir es de alrededor de 1 MW, provoca que se puedan producir pérdidas en el cable que no son despreciables.

Con el objetivo de minimizar las pérdidas en el cable de potencia y así evitar un calentamiento excesivo del mismo, se ha decidido utilizar un transformador de tensión que reduzca la corriente transportada por el cable.

Los motores eléctricos de la unidad eléctrica-hidráulica suelen trabajar con una tensión de 3 kV. El cable de potencia inter array está dimensionado para una tensión de hasta 33kV nominales. Otro factor limitante es la tensión límite de los conectores húmedos disponibles en el mercado en el momento de la redacción de este trabajo. La tensión del conector trifásico de SpecTRON utilizado en el vehículo SCARGO está limitado a 8kV.

En la Tabla 5-X se muestran los cálculos de pérdidas de un cable inter array referidos a una longitud de 10 Km y cuatro tensiones diferentes.

Parámetro	Variantes inter array cable				Unidad
	1	2	3	4	
Tensión en el cable de potencia	3000	33000	8000	14467	V
Potencia de la tracción	191	191	191	191	kW
Potencia del sistema de enterramiento	800	800	800	800	kW
Potencia total necesaria	991	991	991	991	kW
Corriente por fase en el cable (trifásico)	191	17	72	40	A
Resistencia específica eléctrica (a 90°C)	0,063	0,063	0,063	0,063	Ω/km
Capacidad específica	0,30	0,30	0,30	0,30	μF/km
Reactancia específica	10610	10610	10610	10610	Ω/km
Corriente capacitiva específica	0,28	3,11	0,75	1,36	A/km
Pérdida capacitiva específica (tan delta = 0,005)	4,2	513,2	30,2	98,6	W/km
Frecuencia eléctrica	50,00	50,00	50,00	50,00	Hz
Longitud del cable	10	10	10	10	km
Caída de tensión	120,2	10,9	45,1	24,9	V
Pérdidas capacitivas	0,04	5,13	0,30	0,99	kW
Pérdidas eléctricas en el cable	22,9	0,2	3,2	1,0	kW
Pérdida total (toda la longitud del cable)	23,0	5,3	3,5	2,0	kW
Potencia de pérdida relativa en el cable	2,32%	0,54%	0,36%	0,20%	

Tabla 5-X: Cálculo de la corriente y de las pérdidas en el cable de potencia en función de la tensión

La variante 1 muestra las pérdidas sin ninguna transformación en el cable (motor de 3kV). Para la variante 2 se utiliza la tensión máxima que puede soportar el cable que es de 33kV. En la variante 3 se utiliza una tensión de 8kV lo que corresponde al límite de tensión del conector húmedo elegido para el vehículo SCARGO. La variante 4 indica la tensión óptima para conseguir pérdidas mínimas.

5.2.7.1 Resumen de las variantes analizadas

Los cálculos de la Tabla 5-X muestran que hay pérdidas mínimas utilizando una tensión de transformación de 14,5kV correspondiente a la variante 4.

En las variantes 2 y 3 hay pérdidas de aproximadamente 0,5% o menos, en la variante 1 se producen las pérdidas más grandes estimadas en 2,3%, que además producen un calentamiento total de 23kW causado en gran parte por la resistencia eléctrica.

En los próximos párrafos se explican en detalle los cálculos realizados en la Tabla 5-X y los factores de influencia para las pérdidas [24], [25].

Los cálculos están basados en un cable de corriente alterna trifásica como los instalados en la mayor parte de los parques actualmente. Se utilizaron las características del mismo cable inter array que se ha elegido para el dimensionamiento del SCARGO I y SCARGO II de una tensión de 33kV y con un sección de cobre de 400 mm².

5.2.7.2 Pérdidas por el efecto Joule en el cable

Las pérdidas en la resistencia eléctrica son uno de los factores de mayor contribución a las pérdidas totales del cable. Como se ve en la ecuación (5-21) las pérdidas por el efecto Joule incrementan con el cuadrado de la corriente. Para reducir estas pérdidas, con una

resistencia eléctrica dada, la única opción es bajar la corriente. Esto se consigue al subir la tensión manteniendo constante la potencia a transmitir.

$$P_{R,perd} = I_{fase}^2 * R_{especif,ohmica} * l_{cable} \quad (5-21)$$

Donde:

- $P_{R,perd}$ es la potencia por pérdidas eléctricas (joule) de todo el cable en [W]
- I_{fase} es la corriente por fase del cable necesaria para la alimentación del vehículo en [A]
- $R_{especif,eléctrica}$ es la resistencia eléctrica específica del conductor del cable que se ha obtenido de la especificación técnica del fabricante del cable [14] en [Ω /km]
- l_{cable} es la longitud del cable en [km]

En el cálculo se ha utilizado el valor de la resistencia eléctrica específico para una temperatura del conductor de 90°C, que es el caso más desfavorable. La resistencia y consecuentemente la potencia de pérdidas serán considerablemente más pequeñas en condiciones reales.

La corriente por fase I_{fase} que circula por el cable trifásico se calcula según ecuación (5-22):

$$I_{fase} = P_{total,elect} / (U_{nominal} * \sqrt{3}) \quad (5-22)$$

Donde:

- $P_{total,elect}$ es la potencia total eléctrica necesaria para el vehículo en [W]
- $U_{nominal}$ es la tensión en el cable utilizado durante la alimentación del vehículo SCARGO en [V]

La potencia eléctrica necesaria está calculada en función de la suma de las potencias mecánicas del sistema de propulsión y del sistema de enterramiento obtenidas en los apartados 5.2.1 y 5.2.4.

$$P_{total,elect} = P_{motor,trac} / \eta_{conv} + P_{enterram,elect} \quad (5-23)$$

Donde:

- $P_{total,trac}$ es la potencia total de tracción mecánica necesaria para el vehículo en [W], calculado en 5.2.1
- η_{conv} es el rendimiento de la conversión de energía eléctrica en hidráulica, en este caso se ha aplicado un rendimiento de $\eta_{conv} = 0,67$
- $P_{enterram,elect}$ es la potencia eléctrica necesaria para el sistema de enterramiento del cable en [W], según se ve en el apartado 5.2.4.

La potencia eléctrica necesaria es de alrededor de un megavatio eléctrico en el caso del SCARGO II.

5.2.7.3 Pérdidas debido a la capacidad parasita del cable

El material dieléctrico hace que se forma una capacidad en el cable. Al aplicar una tensión alterna a un cable, se crea a través de la capacidad del cable un flujo de corriente a masa. Durante cada cambio de polaridad se pierde energía, lo que resulta en una pérdida capacitiva que se incrementa de forma proporcional con la longitud del cable y con la tensión aplicada.

Las pérdidas capacitivas (por el dieléctrico del cable) se calculan con la ecuación (5-24):

$$P_{C,perd,especif} = 2\pi f * C_{especif} * U_{nominal}^2 * \tan \delta \quad (5-24)$$

Donde

- $P_{C,perd,especif}$ es la energía capacitiva o dieléctrica perdida por kilómetro de cable en [W]
- $C_{especif}$ es la capacidad específica por kilómetro de cable en [F/km]
- $\tan \delta$ es el factor de pérdida por el aislamiento y se consigue de la especificación técnica del fabricante del cable [14], [4]
- f es la frecuencia de la tensión y corriente utilizada y dada en [Hz]

Los cálculos están basados en un cable con un dieléctrico sólido de XLPE, que tiene un factor de $\tan \delta = 0,005$ según el fabricante.

Una vez obtenida la capacidad específica se puede calcular la reactancia específica capacitiva $X_{C,especif}$ y la corriente capacitiva específica según la ecuación (5-26):

$$X_{C,especif} = 1/(2\pi f * C_{especif}) \quad (5-25)$$

$$I_{C,especif} = (U_{cable} / X_{C,especif}) \quad (5-26)$$

Donde:

- $X_{C,especif}$ es la reactancia capacitiva por kilómetro del cable en [Ω /km]
- $I_{C,especif}$ es la corriente de pérdidas capacitivas por kilómetro de cable en [A/km]

5.2.7.4 Otras pérdidas en el cable

En este apartado se mencionan otras posibles pérdidas que no se han incluido en los cálculos, dada su escasa relevancia frente a las ya descritas en 5.2.7.2 y 5.2.7.3.

Las pérdidas debidas a la inductancia del cable no son relevantes en los cables con una frecuencia de 50 o 60 Hz, dado que la reactancia resultante está dominada por el efecto capacitivo del cable.

El **efecto de proximidad** (Proximity effect) aparece en conductores muy próximos unos a otros que tienen la tendencia de inducirse corrientes entre sí (Eddy currents). Este efecto consiste en que parte de la corriente de un conductor se desvía por otro cercano, lo que causa una bajada de la cantidad de corriente que puede ser transportado por el cable. Las pérdidas generadas por ese efecto también se llaman pérdidas de Foucault. Este efecto es despreciable en el caso de la alimentación del vehículo SCARGO, porque la frecuencia de la tensión es baja y la corriente que pasa por el cable está muy por debajo de la corriente nominal del cable (72 A en un cable de dimensionado de transportar 600 A).

El **skin effect** o efecto pelicular es una concentración de la corriente en el área exterior de un conductor de corriente alterna que se incrementa con la frecuencia. El efecto pelicular produce una disminución del área efectiva del conductor, lo que incrementa su resistencia.

No se han considerado pérdidas causadas por este último efecto, ya que las corrientes que pasan por el conductor están muy por debajo de la corriente nominal y se producirá ninguna saturación porque la densidad de corriente en el cable es pequeña.

Pérdidas por el aislamiento y armadura metálica: son corrientes inducidas en las capas exteriores o en la armadura del conductor, que reducen el rendimiento de la transmisión y causan un calentamiento del cable. Dado que el efecto de estas corrientes en la aplicación realizada es relativamente pequeño no se han tenido en cuenta. [24]

5.2.7.5 Dimensionamiento del transformador

Para el dimensionamiento del transformador del SCARGO se ha optado por la variante 3 con una tensión de transmisión de 8kV en el cable. Esta tensión es la mayor posible para utilizar el conector húmedo SpectRON de Siemens, que en el momento de redacción del trabajo era el único conector húmedo trifásico disponible en el mercado con una construcción compacta y un precio razonable (aproximadamente de 100 mil euros).

Las pérdidas totales de 3,5 kW de la variante 3 elegida no representan ningún problema de calentamiento teniendo en cuenta que se distribuyen igualmente a lo largo de la bobina de 10 Km y de un peso total de 266 toneladas.

Para el vehículo SCARGO se ha utilizado un transformador submarino con una potencia aproximadamente un megavatio para una transformación de 8kV a 3kV.

Un transformador submarino es parecido a un transformador en tierra, con la única peculiaridad que su casco tiene que soportar la presión de la profundidad del agua para la cual está diseñado. Para transformadores con una potencia por debajo de 5MVA se suele emplear un envolvente que contiene dos cascos exteriores. Además debe incluir un sistema de refrigeración estanco y estar dotado de conexiones eléctricas estancas con el exterior. Su vida útil debe ser alta, sin necesidad de mantenimiento, dado su difícil acceso en la mayoría de los casos.

Actualmente hay pocos fabricantes de transformadores submarinos de potencia. Con el sector de las energías marinas en auge se están produciendo constantes avances en las tecnologías de redes submarinas y cada vez hay más competencia en este nuevo mercado. Los fabricantes más avanzados de transformadores submarinos son ABB y Siemens.

Para el SCARGO se han estimado las dimensiones y pesos tomando como ejemplo un transformador submarino de Siemens. Este transformador está integrado en una unidad de variador de velocidad (VSD vario speed drive) que sirve para la alimentación y el control directo de motores y bombas hidráulicas. Una ilustración y las características de un modelo se muestran en la Figura 5-10 y la Tabla 5-XI, [26].



Figura 5-10: Transformador submarino con variador de velocidad de Siemens

Características del transformador Siemens VSD	
Profundidad máxima bajo el agua	3050 m
Dimensiones (longitud x ancho x altura)	4,5 m x 2,4m x 2,8m
Peso en tierra y bajo el agua	23 ton; 9,6 ton
Tensión primaria	Entre 72 kV y 22 kV
Tensión secundaria	6,6 kV
Potencia	750kVA
Vida útil	30 años
Rango de temperatura de operación	-5°C hasta 40°C
Refrigeración	Circulación natural
Envolvente	Doble casco

Tabla 5-XI: Características del transformador submarino de Siemens [26]

Las necesidades de estanqueidad del transformador para el vehículo SCARGO van ser menos exigentes ya que su máxima profundidad de sumersión no supera los 100 metros. El transformador de Siemens es operativo hasta profundidades de 3000 metros. La estimación del peso y dimensiones del transformador requerido para el SCARGO se fundamenta en los datos del transformador de Siemens, aunque se puede esperar un diseño más ligero y compacto para su uso a menos profundidad (un solo casco exterior es suficiente).

5.2.8 Batería auxiliar para el desplazamiento

El vehículo SCARGO está alimentado con energía eléctrica, que es transportada a través del propio cable de potencia a enterrar. Durante el proceso de la instalación existen fases en las cuales el vehículo no está conectado al cable. Para permitir el funcionamiento del vehículo durante estas fases es necesario tener una fuente de energía auxiliar que son las baterías de Li-Ion.

Para el vehículo SCARGO II (instalación del cable Inter array) se ha previsto una autonomía de diez kilómetros de desplazamiento con el fin de poder volver a la subestación después de haber instalado el cable de potencia. Para el vehículo SCARGO III (instalación del cable export) se ha previsto una autonomía de un kilómetro.

En la Tabla 5-XII están recogidos los parámetros y resultados del cálculo que se hizo tomando la especificación de las baterías de la empresa Corvus Energy [27].

Características del vehículo	SCARGO II	SCARGO III	Unidad
Velocidad de vuelta	1,0	1,0	Km/h
Longitud	10,0	1,0	Km
Potencia mecánica	127,6	617,1	kW
Rendimiento mecánico/eléctrico:	0,8	0,8	
Potencia eléctrica	159,5	771,4	kW
Rendimiento de almacenamiento (Li-Ion)	0,8	0,8	
Capacidad de batería necesaria	1993,7	964,2	kWh
Batería de Corvus Energy			
Paquete (21 modules de 6,5kWh)			
Tensión	1050		V
Capacidad (1 pack)	137		kWh
Volumen (231x201x67cm)	3,11		m ³
Peso	1,57		ton
Cantidad de paquetes necesarios	15	8	
Volumen para SCARGO	46,7	24,9	m³
Peso de la batería para SCARGO	23,6	12,6	ton
Ancho	3,0	3,0	m
Altura	2,0	2,0	m
Largo	7,8	4,1	m
Volumen de la cobertura (espesor 0,01m)	0,9	0,5	m ³
Peso de la cobertura	7,0	4,2	ton
Peso total	30,6	16,7	ton
Densidad del módulo de la batería:	0,655	0,672	t/m ³

Tabla 5-XII: Dimensionamiento de la batería Li-Ion para diferentes tipos del vehículo SCARGO

Los cálculos de la capacidad de la batería se han hecho en función de la potencia requerida para el desplazamiento del vehículo sin el uso del equipamiento de enterramiento del cable.

Las baterías sirven también para el abastecimiento energético de los servicios auxiliares como son los sistemas de navegación y de comunicación.

En el mercado existen aplicaciones de baterías Li-ion para el uso submarino como por ejemplo las vendidas por el fabricante Corvus Energy [27]. Estas baterías están diseñadas para su uso en barcos o submarinos, que están equipados con sistemas de estanqueidad y refrigeración internos.

El peso de las baterías necesarias para los vehículos SCARGO I y II es de 31 toneladas y para el SCARGO III de 17 toneladas aproximadamente. Sus dimensiones se recogen en la Tabla 5-XII.

5.2.9 Sistemas de control, navegación y comunicación

5.2.9.1 *Sistemas de navegación*

Los sistemas de navegación y comunicación que incorpora el equipamiento del vehículo SCARGO se orientan en la tecnología del estado de arte de los vehículos operados de forma remota (ROV's), como por ejemplo los empleados por el fabricante SMD [10].

Para la navegación en el fondo del mar se requiere del siguiente equipamiento:

Cámaras y lámparas

El SCARGO está equipado con cámaras de alta resolución y sensibilidad que van colocadas a cada lado del vehículo. Esas cámaras se montan sobre sistemas de giro teledirigidos y lámparas de LED.

Sonar

El equipamiento del vehículo con varias unidades de sonar de barrido (multi beam) permite alcanzar una visibilidad adicional por medio de ultrasonidos que es necesaria cuando la visibilidad con las cámaras no es suficiente. Posibles fabricantes son Kongsberg o Blueview.

Sistema de navegación por inercia (IMU)

El sistema de navegación por inercia (IMU) está formado por unos giroscopios y sensores de aceleración que determinan el giro y cambios en la velocidad para cada una de las tres direcciones espaciales. A base del sistema IMU el vehículo puede calcular su posición actual a partir de una posición inicial. La posición actual se actualiza tomando puntos de referencia en un mapa del fondo marino mediante las cámaras o el sonar. Así se consigue un error mínimo de posicionamiento sin tener contacto con la superficie.

5.2.9.2 *Sistemas de control*

Los sistemas de control permiten conseguir información del estado y actuar sobre todos los sistemas hidráulicos y eléctricos con el objetivo de tener un control total del movimiento del vehículo y los subsistemas de manipulación del cable. Para el vehículo SCARGO se utilizan sistemas y sensores similares a los utilizados en los vehículos remotos y teledirigidos actuales.

5.2.9.3 *Sistemas de comunicación*

Una vez conectado el vehículo SCARGO con el cable de potencia, la comunicación entre el vehículo y el centro de control se realiza en tiempo real, mediante conexión por fibra óptica en el propio cable a enterrar. El cable de potencia normalmente contiene entre cuatro y ocho cables de fibra, lo que supone suficiente ancho de banda para la transmisión en tiempo real de los datos de alta resolución tomados por las cámaras y el sonar.

Para las fases operativas en las que el SCARGO no está conectado con el cable de potencia y no dispone de la comunicación por fibra óptica se utiliza un sistema de comunicación remota sin cables.

Este sistema contiene un cable con una antena fijada a una baliza o baliza; el cable se puede desenrollar o enrollar desde el vehículo mediante un cabestrante. Una vez la baliza está en la superficie se puede establecer una comunicación remota con la subestación offshore o con el centro de control terrestre, vía una conexión inalámbrica de banda ancha, similar a la usada actualmente por los teléfonos inalámbricos (G4 o G5).

5.2.10 Sistema de conexión entre el vehículo SCARGO y el cable de potencia

Un punto importante para el correcto funcionamiento del vehículo es la implementación de un sistema de conectores húmedos (wet mate) de media tensión que permite la carga y descarga de las bobinas bajo el agua.

Un conector húmedo es un sistema de conexión eléctrica o de fibra óptica que se puede realizar en un medio húmedo o líquido como por ejemplo en el agua.

Existen conectores húmedos desde hace más de 40 años, diseñados para su uso en el sector petrolero en la conexión de bombas y otros equipos eléctricos en el fondo del mar. Estos conectores estaban preparados para soportar unas condiciones muy hostiles, sobre todo una presión muy alta y además reunían unas prestaciones elevadas de seguridad. Su precio era muy elevado y podía alcanzar, para algunas aplicaciones, hasta un millón de euros por unidad.

Ha habido muchos avances en los últimos años en el desarrollo de conectores húmedos aplicados al sector de la energía eólica offshore. Estos conectores presentan prestaciones menos exigentes en lo que respecta a profundidad y seguridad, lo que ha permitido rebajar su precio y dimensiones de forma drástica. Con el crecimiento del mercado de la energía eólica offshore es previsible que sus precios sigan disminuyendo y su calidad aumentando.

Actualmente existe un amplio rango de sistemas de conectores húmedos en el mercado, provenientes de más de diez fabricantes, que se distinguen por sus aplicaciones y características. El factor limitante hoy en día es su tensión de funcionamiento, que en ningún sistema está por encima de 24kV. Otros puntos a considerar son su precio, su viabilidad y su grado de madurez. [28].

La Tabla 5-XIII muestra una comparativa entre los conectores húmedos (wet mate) y secos (dry mate).

CARACTERISTICA	CONECTOR HUMEDO (WET MATEABLE)	CONECTOR SECO (DRY MATEBLE)
Viabilidad para el SCARGO	Más rápido, automático, sin stress para el cable	Se necesita subir un umbilical del SCARGO y dos extremos de la bobina a la subestación; enlentece la maniobra.
Olas / corrientes / viento	Prácticamente no influyen	No se puede subir el cable con oleaje
Tensiones /Potencia	Mercado actual hasta 24kV; próximamente hasta 36kV	Alta tensión hasta 500kV
Coste	Alto coste, se espera una bajada significativa en los próximos años	Coste relativamente bajo
Disposición en el Mercado	Actualmente pocos fabricantes (alrededor de diez), entre ellos PowerSEA, Siemens, Prysmian	Tecnología madura, muchos fabricantes

Tabla 5-XIII: Comparativa entre las tecnologías de los conectores secos y húmedos

Para el diseño del vehículo SCARGO se ha utilizado un conector de SpecTRON Siemens porque este tipo de conectores ya se ha empleado en varias aplicaciones y su respuesta ha sido buena.

El conector que se emplea para el SCARGO es trifásico y trabaja con una tensión máxima de 8kV, ver la Ilustración 5-6. Además existe una variante del conector elegido que está diseñada para ser manipulado con robots, lo que es ideal para su aplicación en el vehículo SCARGO.



Ilustración 5-6: Componentes de un conector húmedo trifásico de 8kV de SpecTRON Siemens [29]

Su funcionamiento en un medio aislante líquido (normalmente se usa aceite) le permite expulsar el agua alrededor del conector y establecer la misma presión entre el interior del conector y el agua alrededor, ver Ilustración 5-7. De esa manera se consigue un diseño más ligero y compacto comparándolo con otros conectores húmedos del mercado.

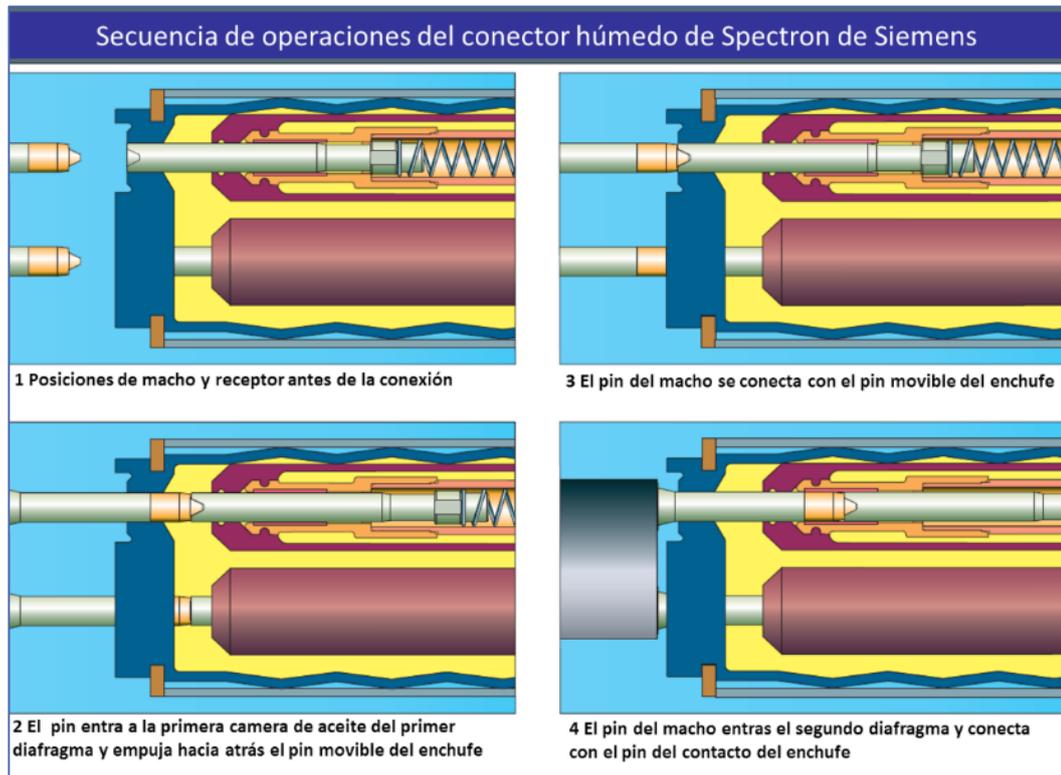


Ilustración 5-7: Esquema de funcionamiento del conector húmedo de SpectRON / Siemens [29]

Conexión de los cables de fibra óptica de comunicación

La conexión de los cables de comunicación de fibra óptica bajo el agua es una tecnología avanzada, actualmente existen muchos fabricantes en este sector que se pueden consultar en [28].

Para la conexión de los cables de fibra óptica (integrados en el cable de potencia) con el vehículo SCARGO se utiliza el conector FoE TRON desarrollado por Siemens, apto para la conexión en un ambiente húmedo [30]. Su especificación técnica se encuentra en la Figura 5-11 y la secuencia de operación en la Figura 5-12.

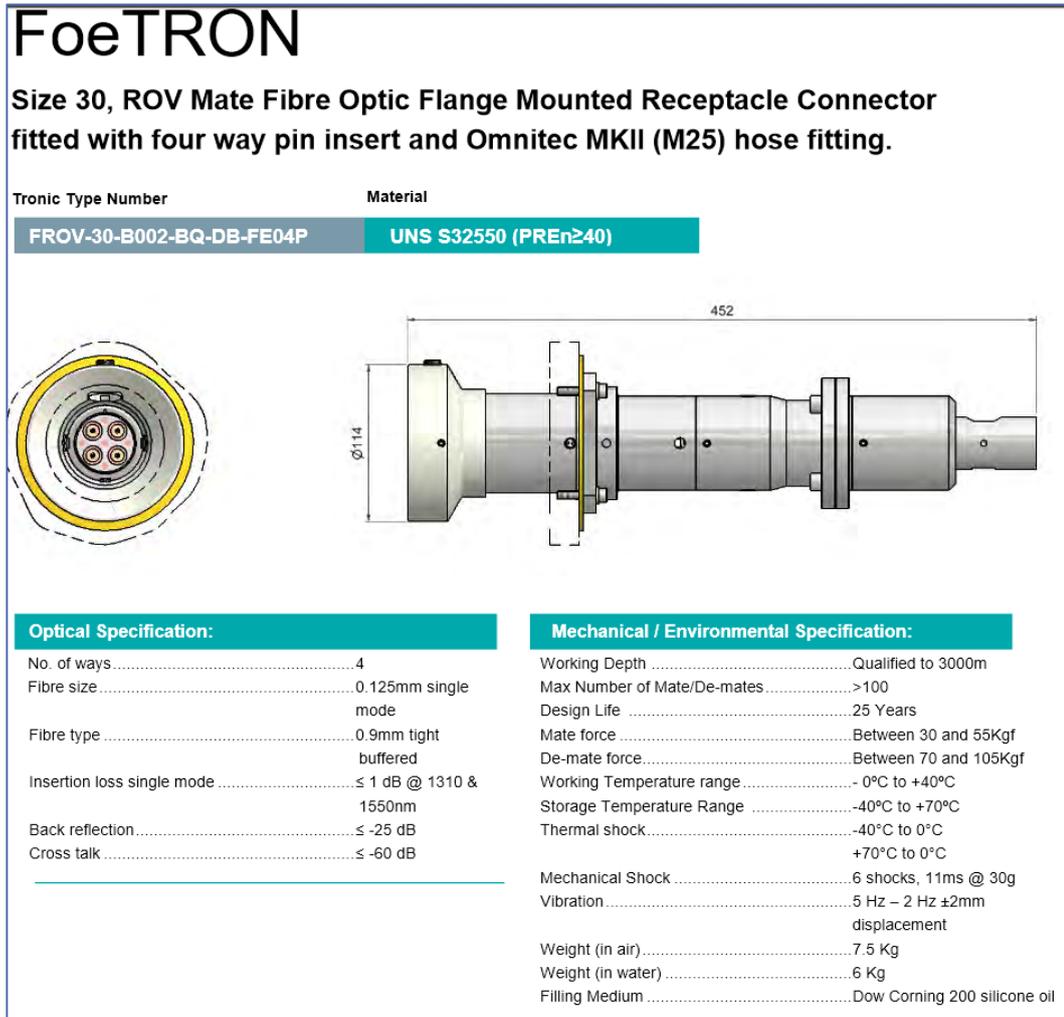


Figura 5-11: Especificación técnica de un conector húmedo FoeTRON de Siemens para la conexión de cuatro cables de fibra óptica [30]

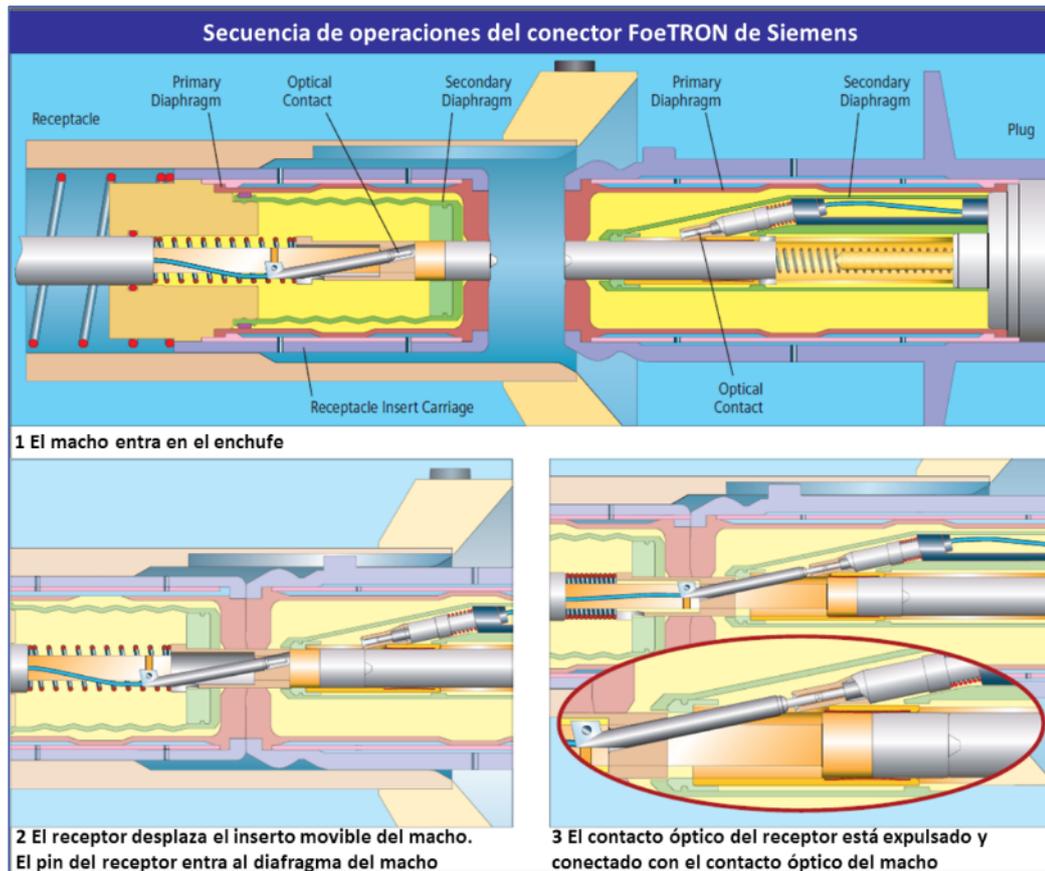


Figura 5-12: Secuencia de operación del conector fibra óptica húmedo FoeTRON de Siemens [31]

Alineación y conexión automática de los conectores

Para la conexión del cable de potencia y de los cables de comunicación con el vehículo SCARGO se utiliza un sistema de alineación que es apto para la conexión automática. El conector híbrido une los conectores húmedos del cable de potencia y de la fibra óptica en una placa, como se puede ver en la Ilustración 5-8. La parte del conector en el chasis del vehículo puede ser movida mediante cilindros de actuación. La alineación se realiza con la ayuda de guías colocadas en el chasis del SCARGO y en el tambor de la bobina.

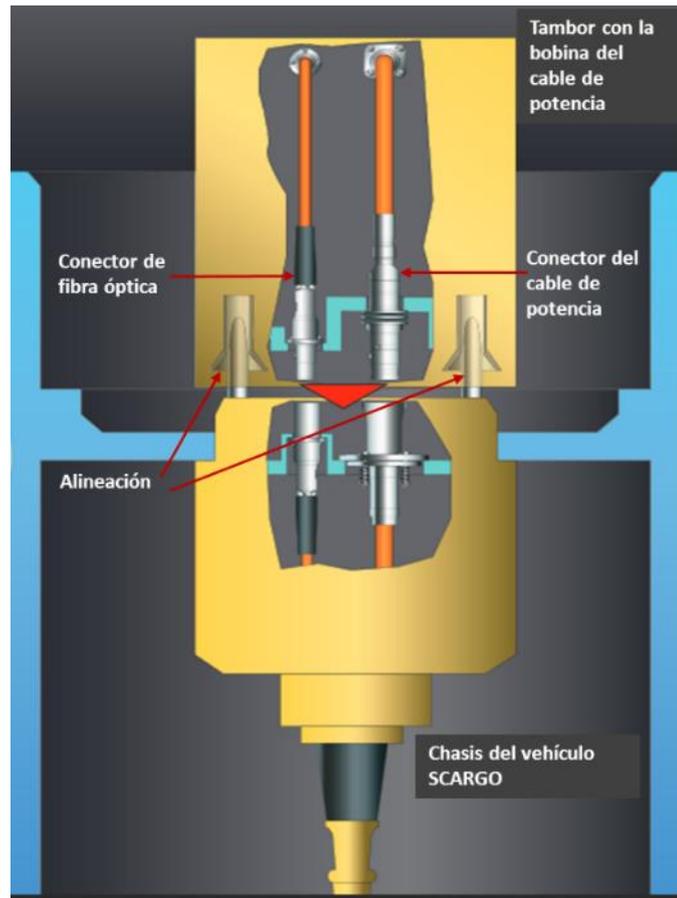


Ilustración 5-8: Sistema de alineación y conexión con conectores húmedos para el cable de potencia y de fibra óptica entre la bobina y el vehículo SCARGO [31]

6 Posibles riesgos causados por el cable energizado

6.1 Campo magnético creado por la bobina energizada

Una vez que la bobina del cable de potencia está conectada al vehículo SCARGO alimenta al mismo con corriente y a su vez la bobina puede generar en su interior un campo magnético.

En el caso de un consumo equilibrado de corriente por las tres fases del cable, el campo magnético generado es casi inexistente debido a la compensación de los campos magnéticos que se crean por cada fase, ver Figura 6-1 [32].

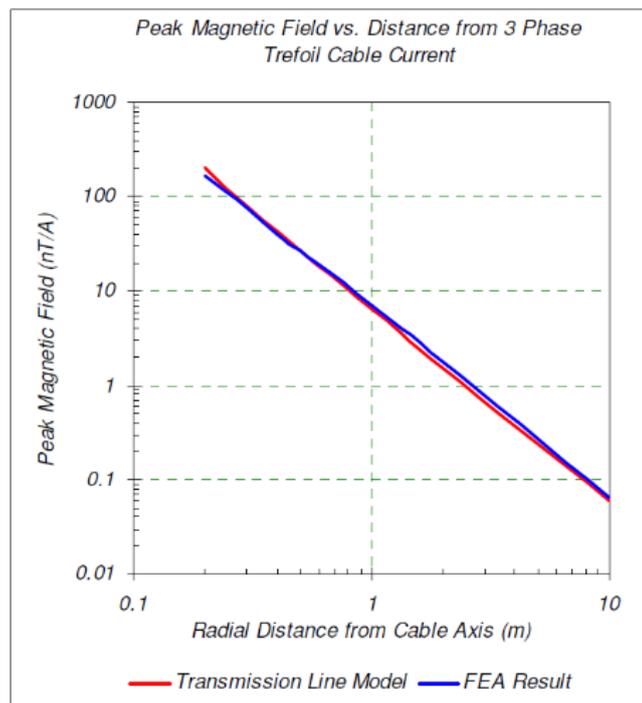


Figura 6-1: Decremento del campo magnético en función de la distancia radial del eje de un cable submarino trifásico [32]

Se ha hecho un cálculo del campo magnético creado para el caso hipotético y poco probable de que exista un desequilibrio entre las corrientes de las fases y que se cree un campo magnético en el exterior del cable.

El campo se crea en el interior de la bobina y solo puede generar un flujo magnético y una fuerza mecánica para equipos que se encuentran por encima de la bobina y muy cerca del tambor.

El cálculo está basado en el cierre del circuito magnético por el acercamiento del brazo manipulador. Un esquema del posible circuito se muestra en la Figura 6-2

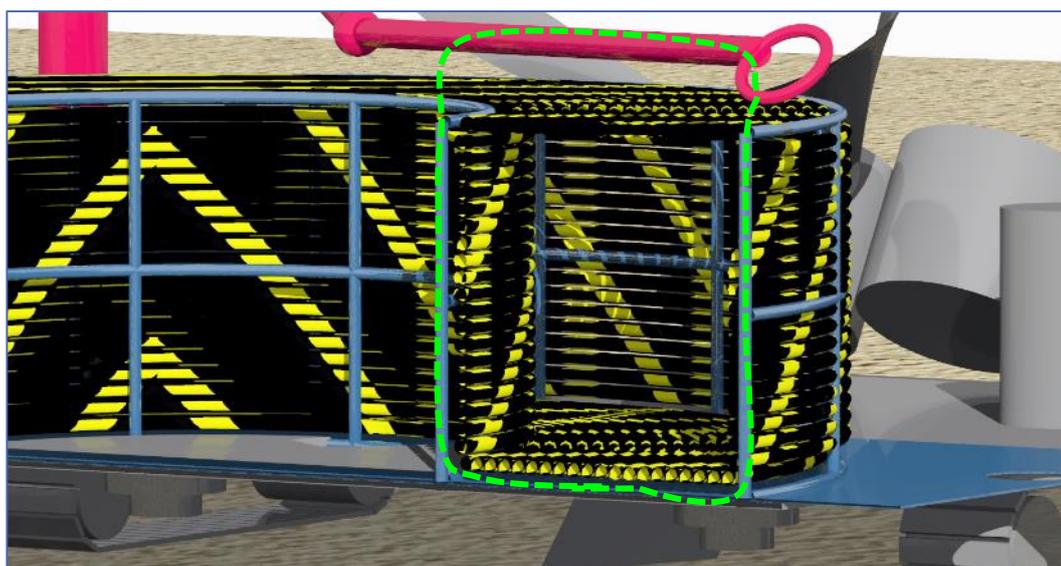


Figura 6-2: Circuito magnético entre bobina, tambor y brazo manipulador (línea verde) en el vehículo SCARGO creado por el campo de la bobina del cable de potencia

La Tabla 6-I muestra los valores elegidos y los resultados del cálculo.

Denominación		Valor	Unidad
Datos eléctricos bobina y cable			
Número de vueltas	N	420	
Corriente máxima por fase	I_f	72	A
Desequilibrio entre fases	k_{as}	30%	
Corriente resultante por el desequilibrio	I	22	A
Dimensiones tambor			
Diámetro interior	$D_{t,i}$	5	m
Diámetro exterior	$D_{t,e}$	10	m
Altura	a	2,8	m
Sección tubo tambor			
Tubo diámetro interior		0,18	m
Tubo diámetro exterior		0,2	m
Área de sección tubo tambor		0,005969	m ²
Sección brazo manipulador			
Brazo diámetro interior		0,35	m
Brazo diámetro exterior		0,4	m
Área de sección del brazo manipulador		0,029452	m ²
Longitud brazo en el circuito magnético		2,5	m
Longitud entrehierro	$l_{entrehierro}$	0,2	m
Área entrehierro	$A_{entrehierro}$	0,15708	m ²
Campo magnético creado en el interior de la bobina			
Campo magnético real (I aprox. r) aplicado	H_{real}	2417	A/m
Campo magnético en una bobina infinita ($I \gg r$)		9072	A/m
Reluctancias magnéticas			
Permeabilidad del hierro	μ_r	400	
Permeabilidad del aire	μ_0	1,26E-06	Vs/Am
Reluctancia magnética tubos interiores	$R_{tubo,int}$	116653	A/Wb
Reluctancia magnética tubos exteriores	$R_{tubo,ext}$	58326	A/Wb
Reluctancia magnética brazo de manipulación	R_{brazo}	10554	A/Wb
Reluctancia magnética del entrehierro	$R_{entrehierro}$	2026424	A/Wb
Reluctancia magnética total	R_{total}	2211957	A/Wb
Flujo magnético en el circuito considerado	Φ	0,0041	Wb
Densidad magnética en el entrehierro	$B_{entrehierro}$	0,0261	T
Densidad magnética en el brazo manipulador		0,1393	T
Densidad magnética en los tubos del tambor		0,0859	T
Fuerza mecánica en el entrehierro	F_m	43	N

Tabla 6-I: Cálculo del campo, flujo y la fuerza magnética generado por la bobina del cable energizado

En los siguientes párrafos se explican los cálculos de la tabla.

Cálculo del campo magnético en el interior de la bobina

El número de espiras se ha calculado en base a las dimensiones de la bobina y del cable.

La corriente por fase se calculaba en el apartado 5.2.7 para el escenario SCARGO II. Se estima un 30% de su valor por el efecto de un desequilibrio entre las fases.

El campo magnético en una bobina real se calcula según (6-1).

$$H_{bobina,real} = \frac{N \cdot I_f \cdot k_{as}}{\sqrt{\left(\frac{D_{t,i}^2}{4} + a^2\right)}} \quad (6-1)$$

Donde:

- N es el número de espiras de la bobina
- I_f es la corriente de fase del cable en [A]
- k_{as} es el factor de asimetría entre las corrientes de las fases
- $D_{t,i}$ es el diámetro interior de la bobina en [m]
- A es la altura de la bobina en [m]

Cálculo de las reluctancias magnéticas

Se calcula la reluctancia total del circuito que se ha repartido en cuatro reluctancias magnéticas de las diferentes secciones, según la ecuación (6-2).

$$\mathfrak{R}_{total} = \mathfrak{R}_{tubos,int} + \mathfrak{R}_{tubos,ext} + \mathfrak{R}_{brazo} + \mathfrak{R}_{entrehierro} \quad (6-2)$$

Donde:

- $\mathfrak{R}_{tubos,int}$ es la reluctancia formada por los 8 tubos interiores del tambor de la bobina en [A/Wb].
- $\mathfrak{R}_{tubos,ext}$ es la reluctancia formada por los 16 tubos exteriores del tambor de la bobina en [A/Wb].
- \mathfrak{R}_{brazo} es la reluctancia en el tubo el brazo manipulador que pasa entre el diámetro interior y exterior del tambor en [A/Wb].
- $\mathfrak{R}_{entrehierro}$ es la reluctancia de dos veces la distancia que el flujo pasa por el aire entre el brazo manipulador y la parte del tambor exterior e interior en [A/Wb].

Las reluctancias de cada parte se calcula según:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A} \quad (6-3)$$

Donde:

- R es la reluctancia al respecto en [A/Wb]
- l es la longitud del tramo parcial
- μ_r es la permeabilidad relativa, en el caso de la reluctancia es 1, en todo el resto 400 (acero)
- μ_0 es la permeabilidad absoluta en [Vs/Am]
- A es la sección del tramo para la cual se calcula la reluctancia

Las reluctancias se calculan con los siguientes valores:

- Reluctancia de los tubos interiores: longitud = altura bobina, Área= 8 x sección de un tubo del tambor
- Reluctancia de los tubos exteriores: longitud = altura bobina, Área= 16 x sección de un tubo del tambor
- Reluctancia del brazo manipulador: longitud = 2,5m = $\frac{1}{2} (* D_{t,ext} - D_{t,int})$,
Área = sección del brazo manipulador

- Reluctancia del entrehierro: de longitud se estima un acercamiento de hasta la distancia del entrehierro del brazo hacia los dos partes del tambor, ver Figura 6-2. Como sección se estima la superficie del brazo que se proyecta a la estructura de acero del tambor.

Cálculo del flujo magnético y densidad magnética en el circuito

Una vez obtenida la reluctancia total del circuito magnético se puede calcular el flujo magnético según la ecuación

$$\Phi = \frac{N \cdot I_{res}}{\mathfrak{R}_{total}} \quad (6-4)$$

Donde:

- Φ es el flujo magnético en el circuito elegido en [Wb]
- I_{res} es la corriente resultante de la asimetría en el cable

Conociendo Φ se puede calcular la densidad magnética B para cada tramo del circuito. Para poder realizar un cálculo de la fuerza mecánica al brazo se necesita saber la densidad B en la parte donde pasa el flujo por el aire (entrehierro).

$$B_{entrehierro} = \frac{\Phi}{A_{entrehierro}} \quad (6-5)$$

Donde:

- $B_{entrehierro}$ es la densidad magnética en el hueco entre el brazo manipulador y el tambor (entrehierro) en [Wb/m²]
- $A_{entrehierro}$ es la sección de la superficie del brazo que se proyecta a la estructura del tambor en [m²]

Cálculo de la fuerza mecánica

Se trata de calcular la fuerza mecánica que se genera en el hueco (entrehierro) entre el brazo manipulador y la estructura del tambor y que puede tener una influencia en el funcionamiento del brazo manipulador.

Con el valor de la densidad magnética en el entrehierro se puede calcular la fuerza mecánica que genera el campo magnético al brazo manipulador que se encuentra a la distancia del entrehierro al tambor. La fuerza se calcula como derivada de la energía, según la ecuación

$$F_m = \frac{\partial E_m}{\partial l} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{entrehierro}^2 \cdot A_{entrehierro} \quad (6-6)$$

Donde:

- F_m es la fuerza mecánica de atracción en la zona entre el brazo y el tambor en [N]
- E_m es la energía magnética en el entrehierro en [Ws]
- l es la longitud del entrehierro [m]
- $A_{entrehierro}$ es la sección, que es la proyección entre el brazo y la estructura del tambor

6.2 Resumen

Los cálculos muestran que aunque haya una asimetría grande entre las corrientes de las fases no se generan campos magnéticos muy grandes en la bobina. En el caso muy poco

probable de un acercamiento del brazo de manipulación a la parte interior y exterior del tambor, al mismo tiempo se puede producir una fuerza de atracción que puede afectar el funcionamiento.

Si hubiera problemas en el funcionamiento del vehículo a causa de estos campos magnéticos se puede controlar la simetría de las corrientes en el cable y activar una alarma si llegan a superar un determinado nivel de asimetría.

7 Comparativa de costes de la instalación entre el proceso innovador y convencional

7.1 Procedimiento

El estudio de coste se ha realizado con el proceso del vehículo SCARGO II, que se ha evaluado como la opción más viable y económicamente más rentable. El escenario SCARGO II consiste en el enterramiento de cables inter array de una longitud de hasta 10 kilómetros.

Para la realización de la comparativa se ha tomado como referencia la instalación del cable inter array en el parque eólico Horns Rev en el mar del Norte, de la cual existe una buena documentación del proceso de la instalación y de las embarcaciones utilizadas [13]. Además se han verificado los procesos de instalación con otros dos parques, el Triton Knoll y Lillground [33] [34].

No existe actualmente documentación disponible sobre el cálculo de los costes de instalación, razón por la cual se ha realizado una estimación de los mismos basada en la documentación de los procesos.

El estudio está dividido en los siguientes partes:

- Cálculo de los costes de inversión CAPEX (Capital expenditure) del vehículo SCARGO II y de los barcos involucrados en el proceso de referencia
- Cálculo de los costes operativos
- Cálculo de costes de la inversión y de los seguros
- Comparativa de los costes por metro de cable instalado
- Impacto económico del proceso innovador en el mercado de la industria eólica offshore

7.2 Cálculos de los costes del proceso innovador de instalación con el vehículo SCARGO

7.2.1 Cálculo de la inversión

Para el SCARGO se han hecho unas estimaciones basadas en el diseño conceptual y el cálculo de los componentes que se realizó en el apartado 5.2.

La Tabla 7-I muestra el desglose del CAPEX estimado de un vehículo SCARGO II. Los cálculos y estimaciones de cada componente se detallan a continuación.

SCARGO CAPEX ESTIMADO	13,8 M€
Coste de material de estructura	1,5 M€
Motores, sistemas de propulsión y sistemas eléctricos	5,8 M€
Sistemas de la manipulación del cable	3,4 M€
Sistemas de navegación, comunicación y control	3,1 M€

Tabla 7-I: Desglose de la estimación del CAPEX del SCARGO II

7.2.1.1 Coste estructural

Se han hecho cálculos y estimaciones del acero estructural utilizado en la construcción del vehículo, tal como se muestra en la Tabla 7-III, basándose en los parámetros básicos del vehículo SCARGO. Los resultados están recogidos en la Tabla 7-II. En los casos donde no había datos concretos del peso de la estructura del componente, se ha utilizado su peso total. Parte de los cálculos están basados en el diseño del vehículo realizado con el programa de construcción 3D Rhinoceros.

El coste estructural total toma una estimación del precio de fabricación por kilogramo de acero utilizado, un 20% por encima del precio en el sector en el momento de la realización del trabajo.

Parámetros básicos del vehículo SCARGO II	Valor	Unidad
Peso del cable	266	ton
Potencia eléctrica	1,00	MW
Peso del SCARGO (sin cable sin carrusel)	197	ton
Dimensiones (Altura x longitud x ancho)		
Altura	7	m
Longitud	18	m
Ancho	14	m

Tabla 7-II: Dimensiones y parámetros básicos del vehículo SCARGO II

Total coste material estructural	1.523.967 €
Componente	Valor en [ton]
Peso del tambor sin cable	23
Peso de la oruga	118
Peso de la unidad de enterramiento	36
HPU	2
Transformador	23
Brazo de manipulación cable	5
Casco de suspensión	40
Batería de Ion -Li	7
Peso estructural vehículo	254
Coste de fabricación por kg de acero	6 €/kg

Tabla 7-III: Estimación del peso y coste del material de estructura del SCARGO II

7.2.1.2 *Coste de los sistemas de propulsión, eléctricos y accionamiento*

Cálculo de los costes de propulsión

En el SCARGO hay dos componentes que consumen la mayor parte de la energía. Son por un lado los motores de propulsión para las cadenas y por otro los equipos del enterramiento del cable. Estos equipos funcionan con energía hidráulica que se genera en la unidad central de conversión (HPU-Hydraulic Power Unit). El cálculo de los costes de electricidad toma como referencia los valores de la potencia determinados en el capítulo 5.2, multiplicados por el coste del vatio utilizado en la industria naval, ver Tabla 7-IV.

Los consumos de los otros componentes del vehículo no se han tenido en cuenta debido a su bajo impacto en el coste total.

Coste de los sistemas eléctricos:

Los sistemas eléctricos más relevantes a nivel de coste son el transformador, la batería Li-Ion y el sistema de conexión húmedo.

No se han encontrado precios de transformadores de aplicaciones submarinas, por lo que se ha estimado el coste tomando como referencia un transformador de un megavatio multiplicado por un “factor de aplicación submarina” de valor cinco. Este factor considera el envolvente estanco, sistema de refrigeración y conexiones estancas.

Se ha optado por un conjunto de conectores húmedos trifásicos de 8kV de Siemens SpecTRON cuyo precio en el mercado está por debajo de 100.000€. En el vehículo SCARGO se utiliza una parte del conector, el mecanismo de alineación y un sistema de conexión automático cuyo coste se ha estimado en 400.000€.

Respecto al sistema de las baterías de Li-Ion se ha calculado una capacidad de 1.600 kWh y se opta por el sistema de Corvus Energy, ver apartado 5.2.8. Al no encontrar precios de este tipo de batería para su aplicación en el ambiente submarino se ha estimado su precio multiplicando el precio del mercado de las baterías Li-Ion, con un factor cinco para cubrir el aumento de coste por la aplicación submarina y su diseño especial.

Coste del sistema del accionamiento por cadena:

Para su estimación se ha utilizado un precio por kilovatio de sistemas de accionamiento en tierra y se ha multiplicado este coste por un factor que considera la complejidad y el ambiente submarino.

Total coste propulsión, accionamiento por cadenas y sistema eléctrico	5.752.000 €
Propulsión de desplazamiento	
Coste por vatio	2 €/W
Potencia necesaria	0,19 MW
Coste propulsión desplazamiento	384.000 €
Propulsión para enterramiento	
Coste por W	2 €/W
Potencia necesaria para el enterramiento	0,8 MW
Coste propulsión enterramiento	1.600.000 €
Sistema eléctrico	
Transformador de 1MW (8 kV/3 kV)	1.000.000 €
Sistema de conexión con un conector húmedo	400.000 €
Coste batería Li-Ion por kg	200 €/kg
Factor de aumento de coste por operación submarina	5
Energía de almacenamiento de la batería	1.600 kWh
Baterías Li-Ion 1,6MWh	1.600.000 €
Coste sistema eléctrico	3.000.000 €
Sistema de accionamiento de cadenas	
Coste del sistema de accionamiento por kW	200 €/kW
Aumento de coste por complejidad y operación submarina	20
Potencia eléctrica de accionamiento del SCARGO	192 kW
Coste sistema de accionamiento de cadenas	768.000 €

Tabla 7-IV: Coste de la propulsión, de los sistemas eléctricos y del accionamiento del vehículo SCARGO

7.2.1.3 Coste de los sistemas de manipulación del cable

El sistema de manipulación del cable se compone principalmente de los sistemas de tensionamiento y de enterramiento del cable, así como del brazo de manipulación. Los costes están desglosados en la Tabla 7-V.

Tensor

En el caso del SCARGO el sistema de tensionado va a ser mucho más ligero o quizás no necesario. Sin embargo se ha estimado un precio basado en un tensor de cable de cinco toneladas como el utilizado actualmente en barcos cableros.

Arado / sistema de Jetting:

En el vehículo SCARGO se pueden instalar diferentes sistemas del enterramiento que sean intercambiables según las propiedades del suelo. En la estimación de coste se ha considerado la suma de un arado y un sistema por presión de agua (jetting) por separado, aunque es probable que se aplique un sistema combinado o solo uno de los dos. Por eso el coste real será menor que el coste de la estimación.

Brazo de manipulación:

En el mercado existen brazos de manipulación de cables submarinos de hasta 7 metros de rango, como por ejemplo en el CBT 1100 [10]. En la estimación se ha decidido aplicar un coste elevado para cubrir cualquier dificultad que se puede encontrar en el desarrollo de un brazo con un rango de 7 metros para la aplicación del SCARGO.

Coste del sistema de manipulación del cable		3.400.000 €
Tensor	500.000 €	
Arado	900.000 €	
Sistema de chorros de agua con presión (jetting)	1.000.000 €	
Brazo de manipulación	1.000.000 €	

Tabla 7-V: Desglose del coste de los sistemas de manipulación del cable

7.2.1.4 Coste de los sistemas de navegación, comunicación y control

Este apartado suma todos los sistemas que el vehículo necesita tanto para su navegación, como para el control de los componentes automáticos y para la comunicación. Los precios que están desglosados en la Tabla 7-VI son estimaciones basadas en sistemas utilizados en vehículos de operación remota como por ejemplo el CBT 1100 de SMD [10].

Coste de los sistemas de navegación y control		3.100.000 €
Sistema de comunicación teledirigido	700.000 €	
Actuadores eléctricos e hidráulicos de control de los sistemas del vehículo	400.000 €	
Sensores (control de los sistemas hidráulicos, eléctricos)	400.000 €	
Cámaras HD y de alta sensibilidad estancas a 1000m (Kongsberg)	300.000 €	
Sistemas giratorios teledirigidos para cámaras	300.000 €	
Sistema de sonar de alta resolución (Kongsberg, Blueview)	500.000 €	
Ordenador de a bordo	500.000 €	

Tabla 7-VI: Desglose de los sistemas de navegación y control del vehículo de operación remota

7.2.2 Coste de operación

En este apartado se calcula el coste de operación del SCARGO teniendo en cuenta las diferentes situaciones operativas que se pueden producir.

1) En operación

- El SCARGO está realizando los trabajos del enterramiento del cable.
- **Personal:** Los técnicos de control remoto del SCARGO están trabajando en turnos en el puerto de operación o en la subestación.
- **Combustible:** El SCARGO se está desplazando entre los aerogeneradores, se han estimado 19 horas efectivas de consumo máximo de electricidad al día en un régimen de 24 horas de funcionamiento diario.

2) En espera por malas condiciones de tiempo

- El SCARGO está parado.
- **Personal:** Los técnicos de control remoto del SCARGO están esperando en el puerto, se ha estimado la mitad de coste de personal para estos días.
- **Combustible:** No hay consumo de electricidad por la inoperatividad del SCARGO.

3) En tránsito

- El SCARGO se desplaza desde su punto de partida original al puerto de operación o viceversa mediante un barco remolcador.
- **Personal:** La tripulación del remolcador está trabajando, no se necesita personal para el SCARGO en este periodo de tiempo.

- **Combustible:** está incluido en la tasa diaria del uso del barco remolcador, el SCARGO no consume energía durante este periodo.

4) Sin contrato: en espera o realizando mantenimiento

- El SCARGO está parado en puerto.
- **Personal:** Los técnicos de control remoto del SCARGO no trabajan en el control del SCARGO, se ha estimado la mitad de coste de personal para estos días.
- **Combustible:** El SCARGO no consume energía en este periodo.

La Tabla 7-VIII desglosa los costes de personal y de electricidad del SCARGO para las cuatro diferentes situaciones operativas. Los valores salariales diarios de los técnicos son estimaciones salariales del mercado real en el momento de la redacción del trabajo. Para el cálculo del consumo de combustible del SCARGO se ha supuesto un funcionamiento de 24 horas con un factor de utilización de 80% lo que resulta en aproximadamente 19 horas a máximo consumo de electricidad (un megavatio). El precio del kWh utilizado ha sido tomado del mercado real en el momento de la redacción.

Coste de una unidad a remolcar de bobinas de 10km de cable

El cable inter array está enrollado en varias bobinas de aproximadamente 10 kilómetros de longitud que van equipadas con un casco de suspensión y un soporte. Uno de los extremos finales del cable de la bobina va equipado con un conector húmedo.

El coste de cada unidad a remolcar está calculado en la Tabla 7-VII y se considera como parte del coste de la instalación. Se parte de la premisa inicial de que las unidades no son reutilizables y que su coste se añade al coste total de la instalación del cable.

Una posible reducción de coste se podría conseguir fabricando solo dos o tres unidades y reutilizándolos durante el proceso de instalación así como en instalaciones posteriores en otros parques. De esta forma se podría reducir este coste considerablemente.

Coste de una unidad a remolcar (bobina de 10 Km de cable)		479.695 € /10km
Tambor	136.890 €	
Casco de suspensión	241.488 €	
Soporte bobina	69.817 €	
Conector húmedo (Siemens SpecTRON 8kV)	31.500 €	
Total coste por metro de cable de una unidad a remolcar		48 € /m

Tabla 7-VII: Unidad de remolque de una bobina de cable de 10km

	Coste de operación diario		SCARGO II
En operación	Coste de personal		5.000 €
	Número estimado de técnicos para control remoto	personas	10
	Coste diario por persona	€/día	500 €
	Coste de la electricidad		3.809 €
	Consumo de electricidad enterramiento + propulsión	kW	992
	Factor de utilización diaria		80%
	Estimación de horas de operación diario	h	19,2
En espera con contrato (mal tiempo)	Coste de personal		2.500 €
	Número estimado de técnicos para control remoto	personas	10
	Coste diario por persona	€/día	250 €
	Coste de la electricidad		- €
	Consumo de electricidad enterramiento + propulsión	kW	992
	Factor de utilización diario		0%
	Estimación de horas de operación diario	h	0
En tránsito	Coste de personal		1.200 €
	Número estimado de tripulación del remolcador	personas	4
	Coste diario por persona	€/día	300 €
	Coste de operación del remolcador		6.000 €
En puerto sin contrato o mantenimiento	Coste de personal		2.500 €
	Número estimado de técnicos para control remoto	personas	5
	Coste diario por persona	€/día	500 €
	Coste de la electricidad		- €
	Consumo de electricidad enterramiento + propulsión	kW	992
	Factor de utilización diario		0%
	Estimación de horas de operación diarias	h	0
	coste electricidad kWh (2015)	€/kWh	0,20 €

Tabla 7-VIII: Coste de operación con el vehículo SCARGO para las cuatro diferentes condiciones de operación

7.2.3 Costes de financiación y de seguros

En este apartado se calculan los costes de la financiación de la inversión así como los costes de los seguros del SCARGO, del cable de potencia y de la instalación. Un desglose de los mismos se encuentra en la Tabla 7-IX.

Coste anual de la financiación de la inversión

En el sector naval para la financiación de inversiones similares a la del vehículo SCARGO se suele tomar un periodo de 20 años con un tipo de interés anual de 10%. Para su cálculo se ha utilizado el sistema francés con tipo de interés constante sobre el periodo de la financiación, ver ecuación (7-1).

$$Cap_{total} = CAPEX_0 * \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7-1)$$

Donde Cap_{total} es el capital total pagado durante el periodo de la financiación, $CAPEX_0$ es la inversión que se quiere financiar, i es el tipo de interés efectivo anual y n es el número de años del periodo a financiar.

Coste anual del seguro del vehículo SCARGO

En objetos similares en el sector naval se toma como referencia para calcular el seguro el valor del activo a la mitad de su vida útil que corresponde aproximadamente a la mitad de su valor total, ver ecuación (7-2).

$$S_{Cap} = \frac{CAPEX_0}{2} * k \quad (7-2)$$

Donde S_{cap} es la cuota anual del seguro y k el porcentaje del seguro. En el caso de barcos se suele utilizar un valor de $k=1,5\%$.

Coste anual del seguro del cable utilizado

Este seguro sirve para cubrir pérdidas económicas por daños causados en el cable de potencia a enterrar durante el transporte o el proceso de la instalación. El precio utilizado para el metro de cable inter array está basado en información de proveedores de Tecnalía en el momento de la redacción.

La cantidad de metros enterrados anuales se calcula como el producto del total de días operativos por la velocidad promedio de enterramiento. El número de días considerado depende del escenario de operación; en este caso se ha tomado el escenario REALISTA, como se ve en la Tabla 7-IX.

El porcentaje a asegurar, del 10% del coste del cable, es un valor alto y refleja un riesgo elevado de daños al tratarse de un proceso de instalación nuevo. Este porcentaje irá disminuyendo considerablemente una vez se reúna suficiente experiencia en la instalación con el vehículo SCARGO.

Coste anual del seguro de la instalación del cable

Este seguro sirve para cubrir pérdidas económicas por fallos en la ejecución de los trabajos de instalación del cable de potencia.

El coste anual a asegurar depende de la cantidad de días operativos y de la velocidad de enterramiento, que a su vez varía según el escenario de operación. Los cálculos de la Tabla 7-IX están basados en el escenario REALISTA, cuyas condiciones se pueden ver en la Tabla 7-XIII.

El porcentaje a asegurar se estima en un 10%. Este valor es relativamente alto y refleja el riesgo de daños por ser un proceso de instalación nuevo. Este porcentaje irá disminuyendo considerablemente una vez se reúna suficiente experiencia en la instalación con el vehículo SCARGO.

Costes fijos de financiación y seguros		SCARGO
Coste anual de la inversión del SCARGO (CAPEX)		1.618.120 €
Valor CAPEX	13.775.967 €	
Tiempo de amortización	20 años	
Tipo de interés efectivo (IRR)	10%	
Coste diario de la inversión	4.430 € /día	
Coste anual del seguro del SCARGO		103.320 €
Porcentaje asegurado del valor real activo	1,5%	
Valor real del activo	6.887.984 €	
Coste diario de la inversión	283 € /día	
Coste anual del seguro del material del cable*		1.140.676 €
Porcentaje asegurado del valor del cable	10%	
Coste por metro de cable inter array (400mm ² , 33kV)	347 €/m	
Metros anuales enterrados con el proceso SCARGO*	32.873 m	
Coste anual de material de cable instalado*	11.406.758 €	
Coste anual del seguro de la instalación del cable*		421.446 €
Porcentaje asegurado del coste de la instalación del cable	10%	
Metros anuales enterrados con el proceso SCARGO*	32.873 m	
Coste anual de la instalación del cable*	4.214.460 €	
*calculado con el escenario REALISTA		

Tabla 7-IX: Cálculo del coste de la financiación, del seguro del SCARGO y de los seguros del cable, escenario REALISTA

7.3 Cálculo de los costes del proceso convencional de instalación (con barcos)

Para calcular el coste de la instalación del cable inter array mediante el método convencional, se ha utilizado como referencia el parque eólico offshore de Lillgrund en el mar del Norte [34]. El parque es un caso típico por su tamaño y configuración y la documentación del proceso es muy completa.

Para la instalación de los cables inter array se utilizaron un barco cablero de tamaño medio, el C/S PLEIJEL y un barco auxiliar, el M/S MADSEN, éste último equipado para el trabajo con buzos; Figura 2-6: Proceso actual de la conexión del cable de potencia al aerogenerador o subestación vía J-tube, Figura 7-1. Las estimaciones del CAPEX, coste de operación y consumo de combustible se realizaron en base a sus especificaciones y la información disponible sobre sus equipamientos, ver Figura 7-2 y Figura 7-3.



Figura 7-1: Barcos cableros usados en el parque eólico Lillgrund [35]

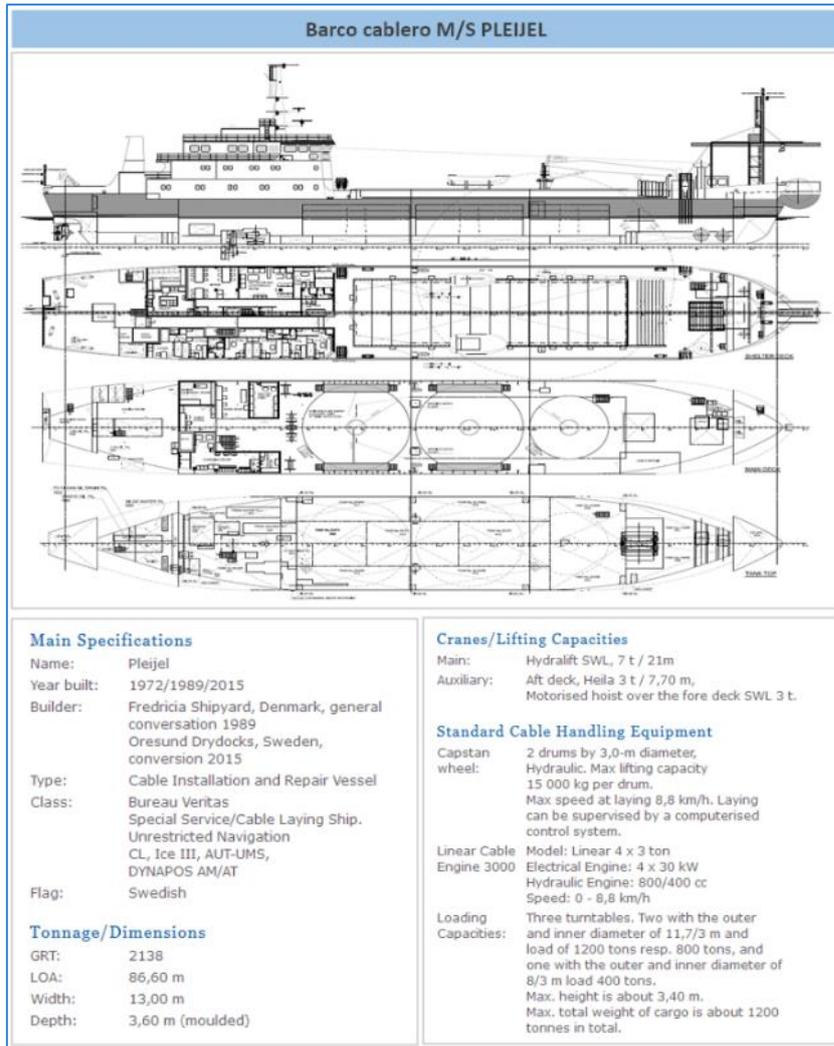


Figura 7-2: Especificación técnica y equipamiento del barco cablero PLEIJEL [35]

Especificaciones M/S MADSEN	
M/S "AASE MADSEN"	
Diving and Offshore Vessel	
Telephone	+45 20 26 65 16
E-mail	am@peter-madsen.dk
Radio Call Signal	OYTI2
IMO no.	7731751
National no.	H 725
MMSI no.	219 001 461
CVR no.	10332834:Peter Madsen Rederi A/S
Crew	4 persons
Crew in daytime	10
Safety equipment	10
Tonnage BRT/BT/NT	174,98/134/70
Classification	Danish Maritime Authority
Built	1977. Renovate 1986
Length	34,9 m
Breath	8,5 m
Draught	Unloaded 2, 1 m; Loaded 3, 1 m
Capacity	350 tonne or 200 m ³ (Load 9, 95 x 5, 80 x 3, 43 m)
Hatches	No
Engine	Scania DSI 14 40 A 21 S 342hp
Bow thruster	90 hp
Speed	Unloaded 8, 0 knots, Loaded 6, 5 knots
Lower speed	2 knots
Diving ladder	Yes
Working Equipment:	
Grab	Grab equipment for rock & stone handling and excavation
Underwater video	Pro Diver QX Video camera with PDS2000 positioning for underwater video
PDS 2000	x, y, z, Positioning +/-10 cm and by dredging +/-20 cm
Drop Hammer	Yes.
Anchor system	2 anchor spuds for depths up to 12 m
Trading Permit	4 point mooring, 2x6.5 tonne front and 2x1.2 tonne aft winches Area A1 and A2. Can get trading permit to England, Germany, Sweden, Norway etc.
Positioning equipment	Trimble D-GPS / RTK
RTK reference station virtual	Yes.
Dredging machine/crane	Sennebogen 640 R-HD 50 tonne crane Boom 16.0 m. Dredging depth 30.0 m in standard configuration - option 60 m
Lifting capacity	20 - 25 tonne
Weight system	PDS2000 Load and Draft system for accurate weighing of cargo
Bracket for the Survey Multi	Yes.
Beam equipment	

Figura 7-3: Especificación técnica y equipamiento del barco MADSEN [36]

7.3.1 Cálculo del coste de la inversión de los barcos PLEIJEL y MADSEN

Las estimaciones del CAPEX de cada barco están basadas mayormente en su peso y en la información sobre sus equipamientos (motores, grúas, sistemas de enterramiento, carruseles, etc.). Otros costes como los de los sistemas operativos generales (navegación, comunicación, alojamiento, etc.) se extrapolaron en base a su tamaño y peso. En la Tabla 7-X está detallada la inversión requerida para los dos barcos que participaron en el proceso de instalación del parque eólico de referencia. El CAPEX estimado es de 81,3 millones de euros aproximadamente.

BARCOS CABLEROS CAPEX ESTIMADO			81,3 M€
	C/S PLEIJEL	M/S MADSEN	
Coste de material de estructura	19,2	2,6	M€
Motores, sistemas de propulsión y sistemas eléctricos	16,3	2,1	M€
Sistemas de manipulación del cable	15,9	3,0	M€
Sistemas generales de operación (alojamiento, navegación, etc.)	18,0	4,1	M€
TOTAL CAPEX	69,5	11,8	M€

Tabla 7-X: Estimación del CAPEX de los barcos cableros PLEIJEL y MADSEN

7.3.2 Coste de operación del proceso de la instalación convencional

En este apartado se calcula el coste de la operación de los barcos cableros para las diferentes condiciones y fases en que se pueden encontrar los barcos y el personal. En general se puede distinguir cuatro diferentes tipos de operación:

1) En operación para la instalación de cables:

- a. Los barcos están realizando los trabajos de enterramiento del cable.
- b. Personal: Las tripulaciones, los equipos de técnicos y buzos están trabajando bajo contrato.
- c. Combustible: Los barcos se están desplazando entre los aerogeneradores o entre el puerto de operación y el parque eólico; se han calculado diez horas de consumo de combustible diario.

2) En espera por malas condiciones de tiempo

- Los barcos están parados en el puerto de operación.
- Personal: Las tripulaciones, los equipos de técnicos y buzos están esperando en el puerto bajo contrato.
- Combustible: Se ha estimado dos horas de consumo de combustible al día para generar la energía necesaria para la estancia de los barcos en el puerto.

3) En tránsito

- Los barcos están desplazándose desde su punto de partida original al puerto de la operación o viceversa.
- Personal: Las tripulaciones de los barcos están trabajando bajo contrato.
- Combustible: Se han calculado veinte horas de consumo de combustible diario, debido a la actividad continua de los barcos durante este tiempo.

4) Sin contrato: en espera o realizando mantenimiento

- Los barcos están parados en un puerto.
- Personal: Se ha estimado que la mitad de las tripulaciones están bajo contrato durante este periodo de tiempo.
- Combustible: Se han estimado dos horas de consumo de combustible diario para generar la energía necesaria para la estancia de los barcos en el puerto.

La Tabla 7-XI desglosa los costes de personal y combustible de los barcos para los cuatro escenarios de operación. Las tasas diarias salariales del personal de tripulación y de los técnicos o buzos se basan en los salarios del mercado en el momento de la redacción del trabajo. Los consumos del combustible se han calculado en función de la motorización y de la cantidad de generadores de gasoil de los barcos, el precio del gasoil por tonelada es el valor del mercado en el momento de la redacción.

	Coste de operación diario	C/S PLEIJEL	M/S MADSEN	SUMA BARCOS
En operación	Coste de personal	12.600 €	3.200 €	15.800 €
	Número estimado de tripulación personas	22	4	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	300 €	300 €	
	Número estimado de técnicos / buzos personas	12	4 buzos	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	500 €	500 €	
	Coste de combustible	7.069 €	1.588 €	8.657 €
	Consumo de combustible por hora ton/h	0,49	0,11	
Estimación de horas de operación diarias h	10	10		
En espera con contrato (mal tiempo)	Coste de personal	12.600 €	3.200 €	15.800 €
	Número estimado de tripulación personas	22	4	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	300 €	300 €	
	Número estimado de técnicos personas	12	4	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	500 €	500 €	
	Coste de combustible	1.414 €	318 €	1.731 €
	Consumo de combustible por hora ton/h	0,49	0,11	
Estimación de horas de operación diario h	2	2		
En tránsito	Coste de personal diario en tránsito (solo tripulación)	6.600 €	1.200 €	7.800 €
	Número estimado de tripulación personas	22	4	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	300 €	300 €	
	Número estimado de técnicos personas	0	0	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	250 €	250 €	
	Coste de combustible	14.137 €	3.177 €	17.314 €
	Consumo de combustible por hora ton/h	0,49	0,11	
Estimación de horas de operación diario h	20	20		
En puerto sin contrato o en mantenimiento	Coste de personal diario en puerto sin contrato o en mantenimiento	3.300 €	600 €	3.900 €
	Número estimado de tripulación personas	22	4	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	150 €	150 €	
	Número estimado de técnicos personas	0	0	
	Coste diario por persona de tripulación €/día	500 €	500 €	
	Coste de combustible	1.414 €	318 €	1.731 €
	Consumo de combustible por hora ton/h	0,49	0,11	
Estimación de horas de operación diario h	2	2		
	coste combustible por tonelada €/ton	1.442 €		

Tabla 7-XI: Coste de personal y combustible diarios de los barcos PLEIJEL y MADSEN para las cuatro diferentes condiciones de operación

7.3.3 Coste de financiación y de seguros

En este apartado se calculan los costes de la financiación de la inversión así como los costes de los seguros de los barcos cableros, del cable de potencia y de la instalación. Un desglose de los mismos se encuentra en la Tabla 7-XII. Los cálculos se realizan de forma similar al proceso ya explicado en el apartado 7.2.3.

Coste anual de la financiación de la inversión

Para su cálculo se ha utilizado la misma ecuación (7-1) y la tasa de interés de 10% y una duración de 20 años, ver apartado 7.2.3.

El cálculo del valor del CAPEX₀ de los dos barcos cableros se encuentra en la Tabla 7-X.

Coste anual del seguro de la inversión, del cable utilizado y de su instalación

Los cálculos se realizan de forma idéntica a los descritos en el apartado 7.2.3.

Coste fijos de financiación y seguros		BARCOS PLEIJEL +MADSEN
Coste anual de la inversión de los barcos (CAPEX)		9.548.998 €
Valor CAPEX PLEIJEL + MADSEN	81.296.000 €	
Tiempo de amortización	20 años	
Tipo de interés efectivo (IRR)	10%	
Coste diario de la inversión	26.144 € /día	
Coste anual del seguro del PLEIJEL y del MADSEN		609.720 €
Porcentaje asegurado del valor real activo	1,5%	
Valor real del activo	40.648.000 €	
Coste diario de la inversión	1.669 € /día	
Coste anual del seguro del material del cable*		798.473 €
Porcentaje asegurado del valor del cable	5%	
Coste por metro de cable inter array (400mm ² , 33kV)	347 €/m	
Metros anuales enterrado con el proceso convencional*	46.022 m	
Coste anual de material de cable instalado*	15.969.461 €	
Coste anual del seguro del coste de la instalación del cable*		379.358 €
Porcentaje asegurado del coste de la instalación del cable	5%	
Metros anuales enterrado con el proceso convencional*	46.022 m	
Coste anual de la instalación del cable*	7.587.164 €	

*calculado con el escenario REALISTA

Tabla 7-XII: Cálculo del coste de financiación, de los seguros de los barcos PLEIJEL y MADSEN y los seguros del cable basado en el escenario REALISTA

7.4 Comparativa de costes entre los procesos de instalación convencional e innovador

Para explicar cómo se ha realizado la comparativa entre los dos diferentes procesos de instalación, el convencional con barcos cableros y el innovador con el vehículo SCARGO, se incluye a continuación la Tabla 7-XIII que muestra el detalle de todos los costes se han tenido en cuenta para elaborar un escenario REALISTA.

Más adelante en el apartado 7.5 se hace un análisis comparativo de los dos procesos de instalación, convencional e innovador, para los tres escenarios que se han definido como REALISTA, OPTIMISTA y CONSERVADOR.

Escenario REALISTA	Barcos PLEIJEL + MADSEN		SCARGO	
Reparto anual del tiempo de operación	Días	%	Días	%
Días operativos (enterramiento de cable)	128	35%	201	55%
Días en tránsito	85	23%	134	37%
Días inoperativos por el tiempo	122	33%	24	7%
Días sin contrato, mantenimiento	30	8%	6	2%
Condiciones del enterramiento del cable				
Velocidad media de enterramiento del cable	0,25	metros/minuto	0,13	metros/minuto
Horas de operación diario	24	horas/día	24	horas/día
Metros de cable instalado por día	360	metros/día	180	metros/día
Metros de cable instalado anual	46.022	metros/año	36.160	metros/año
Coste fijo anual de la inversión	10.158.718 €		1.707.944 €	
CAPEX pago anual	9.548.998 €		1.605.434 €	
Seguro anual de la embarcación	609.720 €		102.510 €	
Costes operativos	7.572.676 €		4.544.594 €	
Coste anual en operación del enterramiento de cable	3.126.506 €		1.769.674 €	
Coste tripulación por día	15.800 €		5.000 €	
Coste combustible por día	8.657 €		3.809 €	
Coste diario en operación	24.457 €		8.809 €	
Días anuales en operación (enterramiento)	128		201	
Coste tiempo anual en tránsito	2.140.320 €		964.260 €	
Coste tripulación por día	7.800 €		1.200 €	
Coste combustible por día	17.314 €		6.000 €	
Coste diario en tránsito	25.114 €		7.200 €	
Días anuales en tránsito	85		134	
Coste de tiempo anual sin contrato (mantenimiento)	171.405 €		15.219 €	
Coste tripulación por día	3.900 €		2.500 €	
Coste combustible por día	1.731 €		- €	
Coste diario sin contrato	5.631 €		2.500 €	
Días anuales sin contrato	30		6	
Coste de espera en el puerto por mal tiempo	2.134.445 €		60.875 €	
Coste tripulación por día	15.800 €		2.500 €	
Coste combustible por día	1.731 €		- €	
Coste diario en el puerto por mal tiempo	17.531 €		- €	
Días anuales en el puerto por mal tiempo	122		24	
Coste del uso varios cascos de flotación (solo SCARGO)			1.734.566 €	
Inversión: bobinas (10km), conectores, casco de flotación	- €		479.695	
Coste de seguros de la instalación y del cable	1.177.107 €		1.709.203 €	
Coste seguro instalación del cable (% sobre el coste de instalac.)	5%	378.634	10%	454.459
Coste material del metro de cable inter array (400mm ² /33kV)		347 €		347 €
Coste seguro del material del cable	5%	798.473	10%	1.254.743
Coste total anual todos los conceptos	18.908.500 €		7.961.741 €	
Coste de instalación por metro de cable (€/m)	411 €		220 €	

Tabla 7-XIII: Comparativa de los costes anuales entre el proceso convencional con barcos cableros y el proceso con el vehículo SCARGO, Escenario REALISTA

A continuación se explica cómo se ha realizado el cálculo de los diferentes componentes de la tabla.

7.4.1 Reparto anual del tiempo de operación

Para hacer un cálculo económico anual de la utilización de los barcos cableros o el vehículo SCARGO es necesario definir el reparto de los días entre operativos, en tránsito, sin contrato y en espera por malas condiciones de tiempo. El resumen se muestra en la Tabla 7-XIII.

Días operativos (enterramiento de cable):

- **Proceso con barcos cableros:** 35% (escenario REALISTA)
 Se ha elegido un valor de 35% que se encuentra algo por encima del promedio real de los días de trabajo anuales de los barcos cableros.
- **Proceso con SCARGO:** 50% (escenario REALISTA)
 Una de las ventajas del SCARGO va a ser su alta disponibilidad en condiciones de tiempo menos favorables (oleaje, viento), dado que se desplaza por el fondo del mar y no requiere ni tripulación ni buzos. Por ello se ha estimado un 50% de días operativos anuales en el escenario REALISTA.

Días en tránsito:

Los días en tránsito son los días en el año que la embarcación se está desplazando entre los puertos de operación. La experiencia en proyectos actuales ha demostrado que los días en tránsito representan un porcentaje alto del tiempo total anual. En este caso tanto para los barcos cableros como para el SCARGO el cálculo se ha realizado según la ecuación (7-3):

$$Días_{transito} = \frac{2}{3} * Días_{operativos} \quad (7-3)$$

Días sin contrato o de mantenimiento:

Los días sin contrato o de mantenimiento se han estimado tanto para los barcos cableros como para el SCARGO en un 8% anual que corresponde a unos 30 días anuales.

Días en espera por malas condiciones de tiempo:

Los días inoperativos por el tiempo son aquellos para los cuales los barcos no pueden trabajar por malas condiciones del tiempo como son la fuerza del oleaje, el viento, las corrientes y la niebla. En el proceso de la instalación con barcos cableros los límites operacionales por malas condiciones de tiempo son [33]:

- Viento: max. 7 metros/segundo
- Oleaje: max. 0,6 metros
- Corrientes: max. 0,5 metros/segundo
- Visibilidad: min. 300 metros

Las condiciones para realizar trabajos con buzos son aún más estrictas.

El cálculo de los días de espera se ha realizado según la ecuación (7-4) para ambos procesos. Con el SCARGO los días de espera son considerablemente menos que con el proceso convencional.

$$Días_{espera} = 365 - Días_{operativos} - Días_{transito} - Días_{sin\ contrato} \quad (7-4)$$

7.4.2 Condiciones de enterramiento de cable

Aquí se definen los factores básicos del enterramiento del cable que tienen mucha influencia sobre el coste, como la velocidad media del enterramiento, las horas de operación diaria y como resultante los metros de cable instalado al año.

Velocidad media de instalación del cable

La velocidad promedio de enterramiento del cable con barcos cableros se estima alrededor de 0,25 metros por minuto.

Esta cifra de promedio real corresponde a una décima parte de la velocidad nominal que puede manejar el equipo de enterramiento. Esto se debe a las numerosas variables que pueden ralentizar el proceso como el hecho de usar un barco que desenrolla el cable desde la superficie y que debe ser sumergido vigilando con precisión su tensión; además hay muchos tiempos de parada debido a los trabajos a realizar en las conexiones de los aerogeneradores y el uso de buzos.

Para el proceso de enterramiento con el SCARGO se ha definido una velocidad de 0,125 metros por segundo, que es la mitad de la establecida en el proceso con barcos cableros. Este valor es muy conservador debido a la falta de experiencia con el vehículo SCARGO en

condiciones reales. Probablemente se puede alcanzar una velocidad de enterramiento significativamente más alta dado que el proceso de instalación no requiere tantas interrupciones ni el uso de buzos; además la tensión del cable es menor cuando se coloca desde una altura de pocos metros sobre el fondo del mar.

Horas de operación diaria

Se ha supuesto para ambos procesos que se trabajan 24 horas al día. En el proceso con barcos cableros el tiempo de trabajo diario puede quedar restringido por el uso de buzos. Las horas de operación en el vehículo SCARGO se han calculado con un equipo de operación remota que tiene una disponibilidad de 24 horas al día. Su equipamiento con sensores sonares, luz artificial y cámaras no pone limitaciones a un funcionamiento continuo.

Metros de cable instalado anual:

Una vez definida la velocidad de enterramiento y las horas de operación diaria se puede calcular la cantidad de cable enterrado anual según muestra la ecuación (7-5)

$$L_{anual} = v_{ent} * 60 * h_{día} * Días_{operativos} \quad (7-5)$$

Donde L_{anual} es la cantidad de cable enterrado al año en [metros], v_{ent} la velocidad promedio de enterramiento en [metros/min] y $h_{día}$ las horas operativas al día.

7.4.3 Coste fijo anual de la inversión

Los costes de la financiación de la inversión y de los seguros de los barcos cableros y del SCARGO se calcularon en los apartados 7.2.3 y 7.3.3 respectivamente.

7.4.4 Costes operativos

Los costes operativos correspondientes a las diferentes condiciones de operación (días operativos, en tránsito, sin contrato o en espera) son el producto de los costes operativos diarios calculados en 7.2.2 y 7.3.2 multiplicados por el número de días anuales totales resultantes de las diferentes condiciones de operación.

Para el proceso de la instalación con SCARGO se ha añadido el coste de fabricación de las unidades a remolcar que son necesarias para el transporte de las bobinas de 10 Km. Este coste ya se había calculado en el apartado 7.2.2 de forma unitaria. En la Tabla 7-XIII se ha estimado el coste total teniendo en cuenta el número de metros a instalar anualmente, ver ecuación (7-6).

$$C_{anual,flot} = \frac{C_{flot} * L_{anual}}{10.000m} \quad (7-6)$$

Donde $C_{anual,flot}$ es el coste anual de la fabricación de todas las unidades a remolcar en [€], C_{flot} el coste de una unidad a remolcar en [€] y L_{anual} la cantidad de metros de cable enterrado al año por el SCARGO en [m], ver ecuación (7-5).

7.4.5 Costes de los seguros del cable

Los costes de los seguros del material y de la instalación del cable se calcularon en los apartados 7.2.3 para el SCARGO y 7.3.3 para el proceso de instalación con barcos.

7.4.6 Coste total anual de la instalación y coste por metro de cable

El coste total de la instalación es la suma de todos los conceptos anteriormente explicados, ver Tabla 7-XIII.

El coste por metro de cable se calcula dividiendo el coste anual total de la instalación por los metros de cable instalado anualmente. Este valor es un buen indicador que se utiliza mucho en el sector eólico offshore para la comparación de costes y análisis de rentabilidad.

7.5 Estudio comparativo de los diferentes escenarios

Se han elaborado tres escenarios de comparativa entre el proceso de instalación de cable convencional con barcos cableros y el proceso innovador con el vehículo SCARGO, que son denominados CONSERVADOR, REALISTA, y OPTIMISTA.

Los tres escenarios se distinguen básicamente por la cantidad de días operativos anuales y diferentes velocidades de enterramiento que generan mejores o peores resultados, de ahí los nombres dados a los escenarios. Los resultados están resumidos en la Tabla 7-XIV para un escenario REALISTA, en la Tabla 7-XV para un escenario CONSERVADOR y en la Tabla 7-XVI para un escenario OPTIMISTA.

Escenario REALISTA	PROCESO CONVENCIONAL PLEIJEL + MADSEN		PROCESO INNOVADOR SCARGO		DIFERENCIA INNOVADOR - CONVENCIONAL	
	Días	%	Días	%	Días	%
Reparto anual del tiempo de operación						
Días operativos (enterramiento de cable)	128	35%	183	50%	55	15%
Días en tránsito	85	23%	122	33%	37	10%
Días inoperativos por el tiempo	123	34%	32	9%	-91	-25%
Días sin contrato, mantenimiento	29	8%	29	8%	0	0%
Condiciones del enterramiento del cable						
Velocidad media de enterramiento del cable	0,25 metros/min		0,13 metros/min		-0,13 metros/min	
Horas de operación diario	24 horas/día		24 horas/día		0 horas/día	
Metros de cable instalado por día	360 metros/día		180 metros/día		-180 metros/día	
Metros de cable instalado anual	46.022 metros/año		32.873 metros/año		-13.149 metros/año	
CAPEX	M€		M€		M€	%
Coste de estructura [M€]	21,9		1,4		-20	-25%
Propulsión, motores, equipos eléctricos [M€]	18,4		5,8		-13	-16%
Equipos para la instalación del cable	18,9		3,4		-16	-19%
Sistemas de navegación y control	22,1		3,1		-19	-23%
Total CAPEX M€	81,3		13,7		-67,6	-83%
CAPEX ponderado (por metros cable anual) M€	81,3		19,1		-62,2	-76%
Coste de instalación por metro de cable	[€]		[€]		[€]	%
CAPEX pago	207		49		-159	-76%
Combustible / electricidad en operación y puerto	30		21		-9	-29%
Tripulación en operación y en el puerto	89		32		-56	-63%
Coste transito (Movilización/Desmovilización)	47		27		-20	-43%
Coste de varios casco de suspensión (solo SCARGO)	0		48		48	
Seguro para el barco e instalación del cable	39		51		12	30%
Total coste de instalación de cable [€/metro]	411		228		-184	-45%

Tabla 7-XIV: Escenario REALISTA de la comparativa de los costes de instalación de cables entre el proceso convencional y el proceso innovador con el SCARGO

Escenario CONSERVADOR	PROCESO CONVENCIONAL PLEIJEL + MADSEN		PROCESO INNOVADOR SCARGO		DIFERENCIA INNOVADOR - CONVENCIONAL	
	Días	%	Días	%	Días	%
Reparto anual del tiempo de operación						
Días operativos (enterramiento de cable)	128	35%	128	35%	0	0%
Días en tránsito	85	23%	85	23%	0	0%
Días inoperativos por el tiempo	123	34%	123	34%	0	0%
Días sin contrato, mantenimiento	29	8%	29	8%	0	0%
Condiciones del enterramiento del cable						
Velocidad media de enterramiento del cable	0,25 metros/min		0,13 metros/min		-0,13 metros/min	
Horas de operación diario	24 horas/día		24 horas/día		0 horas/día	
Metros de cable instalado por día	360 metros/día		180 metros/día		-180 metros/día	
Metros de cable instalado anual	46.022 metros/año		23.011 metros/año		-23.011 metros/año	
CAPEX	M€		M€		M€	%
Coste de estructura [M€]	21,9		1,4		-20	-25%
Propulsión, motores, equipos eléctricos [M€]	18,4		5,8		-13	-16%
Equipos para la instalación del cable	18,9		3,4		-16	-19%
Sistemas de navegación y control	22,1		3,1		-19	-23%
Total CAPEX M€	81,3		13,7		-67,6	-83%
CAPEX ponderado (por metros cable anual) M€	81,3		27,3		-54,0	-66%
Coste de instalación por metro de cable	[€]		[€]		[€]	%
CAPEX pago	207		70		-138	-66%
Combustible / electricidad en operación y puerto	30		21		-9	-29%
Tripulación en operación y en el puerto	89		44		-44	-50%
Coste transito (Movilización/Desmovilización)	47		27		-20	-43%
Coste de varios casco de suspensión (solo SCARGO)	0		48		48	
Seguro para el barco e instalación del cable	39		53		14	37%
Total coste de instalación de cable [€/metro]	411		263		-148	-36%

Tabla 7-XV: Escenario CONSERVADOR de la comparativa de los costes de instalación de cables entre el proceso convencional y el proceso innovador con el SCARGO

Escenario OPTIMISTA	PROCESO CONVENCIONAL PLEIJEL + MADSEN		PROCESO INNOVADOR SCARGO		DIFERENCIA INNOVADOR - CONVENCIONAL	
	Días	%	Días	%	Días	%
Reparto anual del tiempo de operación						
Días operativos (enterramiento de cable)	128	35%	183	50%	55	15%
Días en tránsito	85	23%	122	33%	37	10%
Días inoperativos por el tiempo	123	34%	32	9%	-91	-25%
Días sin contrato, mantenimiento	29	8%	29	8%	0	0%
Condiciones del enterramiento del cable						
Velocidad media de enterramiento del cable	0,25 metros/min		0,25 metros/min		0,00 metros/min	
Horas de operación diario	24 horas/día		24 horas/día		0 horas/día	
Metros de cable instalado por día	360 metros/día		360 metros/día		0 metros/día	
Metros de cable instalado anual	46.022 metros/año		65.745 metros/año		19.724 metros/año	
CAPEX	M€		M€		M€	%
Coste de estructura [M€]	21,9		1,4		-20	-25%
Propulsión, motores, equipos eléctricos [M€]	18,4		5,8		-13	-16%
Equipos para la instalación del cable	18,9		3,4		-16	-19%
Sistemas de navegación y control	22,1		3,1		-19	-23%
Total CAPEX M€	81,3		13,7		-67,6	-83%
CAPEX ponderado (por metros cable anual) M€	81,3		9,6		-71,7	-88%
Coste de instalación por metro de cable	[€]		[€]		[€]	%
CAPEX pago	207		24		-183	-88%
Combustible / electricidad en operación y puerto	30		11		-19	-64%
Tripulación en operación y en el puerto	89		16		-72	-82%
Coste transito (Movilización/Desmovilización)	47		13		-33	-71%
Coste de varios casco de suspensión (solo SCARGO)	0		48		48	
Seguro para el barco e instalación del cable	39		45		6	16%
Total coste de instalación de cable [€/metro]	411		158		-254	-62%

Tabla 7-XVI: Escenario OPTIMISTA de la comparativa de los costes de instalación de cables entre el proceso convencional y el proceso innovador con el SCARGO

A continuación se explican los valores escogidos para cada uno de los escenarios anteriores.

7.5.1 Distribución de tiempo operativo-inoperativo

Se supone que el diseño del proceso y el funcionamiento del vehículo SCARGO sin ayuda de barcos en superficie ni necesidad de buzos, le permite estar operativo más días al año que en el proceso convencional con barcos cableros.

En el escenario REALISTA con el vehículo SCARGO se consigue una operatividad del 50% de días al año frente a un 35% con el proceso convencional. El reparto de los días en tránsito, en espera y sin contrato se calcula según las ecuaciones incluidas en el apartado 7.4.

En el escenario CONSERVADOR se parte de la suposición que el vehículo SCARGO no es lo suficientemente robusto en caso de mal tiempo, por lo que se ha definido el mismo reparto de días operativos e inoperativos que con barcos cableros.

En el escenario OPTIMISTA se ha tomado para el vehículo SCARGO un total de 50% de días anuales operativos frente a un 35% en el proceso convencional.

7.5.2 Velocidad de enterramiento

Se prevé que en los primeros trabajos realizados con vehículos SCARGO puede haber problemas de funcionamiento ya que se carece de experiencia previa.

Por ello en el escenario REALISTA se ha considerado la mitad de la velocidad de enterramiento con el vehículo SCARGO que en el proceso convencional.

En el escenario CONSERVADOR se ha considerado la mitad de la velocidad de enterramiento con el vehículo SCARGO que en el proceso convencional. El razonamiento es el ya descrito en el escenario REALISTA.

En el escenario OPTIMISTA se ha considerado la misma velocidad de enterramiento con el vehículo SCARGO que con el proceso convencional.

Se espera que después de superar las dificultades del arranque con el proceso innovador la velocidad de enterramiento pueda igualar o hasta superar la del proceso convencional.

7.5.3 Coste de inversión (CAPEX)

La inversión de un vehículo SCARGO se estima en aproximadamente 14 millones de euros según los cálculos realizados en el apartado 7.2.1 y recogidos en la Tabla 7-I.

La inversión del proceso convencional con dos barcos cableros se calcula en 81 millones de euros aproximadamente, ver apartado 7.3.1 y Tabla 7-X.

Según el escenario considerado, la cantidad de metros de cable instalado con el vehículo SCARGO cambia y en ningún caso es igual al proceso convencional con barcos cableros. Para poder comparar la inversión entre el proceso innovador con el vehículo SCARGO y el proceso convencional con barcos cableros se ha realizado una ponderación del coste de inversión del proceso con el vehículo SCARGO ($CAPEX_{ponderado}$) como se puede ver en la ecuación (7-7):

$$C_{SCARGO,ponderado} = C_{SCARGO} \frac{L_{anual,BARCO}}{L_{anual,SCARGO}} \quad (7-7)$$

Siendo $C_{SCARGO,ponderado}$ el CAPEX ponderado del SCARGO en [M€], C_{SCARGO} es el CAPEX del SCARGO en [M€], $L_{anual,SCARGO}$ la capacidad de enterramiento de cable anual del SCARGO

en [metros], $L_{\text{anual, BARCO}}$ la capacidad de enterramiento de cable anual en [metros] del proceso convencional con barcos.

Según estos cálculos se obtienen los siguientes porcentajes de ahorro de CAPEX con el proceso innovador frente al convencional, ver Tabla 7-XVII.

Escenario	Ahorro de la inversión con el proceso SCARGO (CAPEX ponderado)
CONSERVADOR	-66%
REALISTA	-76%
OPTIMISTA	-88%

Tabla 7-XVII: Ahorro en inversión (CAPEX ponderado) con el proceso SCARGO comparado con el proceso convencional

Como se ve en la tabla en todos los escenarios hay un ahorro muy grande en la inversión entre el proceso actual y el nuevo proceso propuesto con el vehículo SCARGO, siendo el ahorro conseguido entre el 66% y el 88%, por lo que desde el punto de vista económico la inversión en el proceso innovador con el vehículo SCARGO es mucho más recomendable que la inversión en barcos cableros.

7.5.4 Coste de la instalación por metro de cable

Como ya explicado anteriormente el coste de instalación por metro de cable es un buen indicador de comparación de costes y rentabilidad entre los diferentes procesos de instalación.

En la comparativa se han desglosado los valores anuales referidos al pago de inversión, combustible, tripulación, etc. ya calculados en el apartado 7.4 y recogidos en la Tabla 7-XIII y se han ponderado por los metros de cable enterrados en cada proceso, ver Tabla 7-XIV, Tabla 7-XV y Tabla 7-XVI.

La Tabla 7-XVIII recoge la comparativa del ahorro estimado para el coste de instalación por metro de cable entre el proceso innovador y el método convencional. Se puede observar que en el escenario REALISTA el coste de la instalación innovadora se sitúa en torno al 45% por debajo del coste actual. Aún en el escenario CONSERVADOR se obtiene un ahorro del 36%, lo que equivale a 148 euros menos de coste por cada metro de cable enterrado.

Escenario	Ahorro en el coste de la instalación con el proceso SCARGO (por metro de cable instalado)	
	[%]	[€/ metro cable]
CONSERVADOR	-36%	-148
REALISTA	-45%	-184
OPTIMISTA	-62%	-254

Tabla 7-XVIII: Resumen del ahorro en la instalación con el proceso SCARGO (por metro de cable instalado)

7.6 Impacto económico del proceso innovador en el mercado de la industria eólica offshore

En este apartado se analiza el posible impacto en el mercado derivado de la utilización del método innovador de la instalación de cables inter array con vehículos SCARGO en la industria eólica offshore. El análisis se basa en la previsión actual de construcción de nuevos parques eólicos offshore en los países de la Unión Europea hasta 2030 [37], [38], ver Tabla 7-XIX.

Mercado de instalación de cable inter array en la industria eólica offshore hasta 2030	
<i>Pronóstico de la potencia instalada entre 2016 y 2030 en la UE</i>	46 GW
<i>Equivalente a número de aerogeneradores instalados (5MW)</i>	9.200
<i>Equivalente a la cantidad de cable inter array</i>	6.900 km
<i>Volumen del mercado de la instalación de cables Inter array (de 2015 hasta 2030 solo en la UE)</i>	2.837 M€

Tabla 7-XIX: Estimación del volumen del mercado de instalación de cable inter array hasta el año 2030 [38]

El cálculo de la cantidad total de aerogeneradores está basado en la instalación de aerogeneradores de una potencia promedio de 5MW. Este volumen de aerogeneradores incluye proyectos ya en construcción con turbinas de potencia de 3MW y prevé la instalación de turbinas de hasta 8MW.

La cantidad total de cable inter array se calcula tomando una distancia de 0,75 Km entre los aerogeneradores, que es la distancia que normalmente se utiliza como promedio en instalaciones de aerogeneradores de potencia equivalente a 5MW.

Para estimar el volumen de ventas en millones de euros hasta 2030 se multiplica la cantidad de cable (6.900 Km) a instalar, por el coste de la instalación de cable inter array (411 euros / metro cable), que se estimó en el apartado 7.4.

Según la fuente [38] se estima una falta de 26 barcos cableros para los trabajos pendientes en la instalación de cables de parque eólicos en Europa hasta 2030. Esta demanda tan alta puede resultar en una subida del precio de venta, lo que supone una ventaja económica adicional para el proceso innovador con el vehículo SCARGO.

Finalmente se ha calculado la posible ganancia que se genera con la inversión en un vehículo SCARGO tomando los horizontes temporales de uno, dos, diez y veinte años respectivamente.

Ganancia utilizando un vehículo SCARGO					
<i>Años de funcionamiento</i>		1	2	10	20
<i>Coste de la instalación del cable con SCARGO</i>	[M€]	7	15	75	150
<i>Ingresos con el proceso SCARGO</i>	[M€]	14	27	135	270
<i>Ganancia</i>	[M€]	6	12	60	120

Tabla 7-XX: Estimación de la ganancia económica con el proceso innovador utilizando un vehículo SCARGO

El coste de la instalación es el producto del coste de la instalación del metro de cable con el proceso SCARGO en el escenario REALISTA, multiplicado por la cantidad de cable a instalar con el SCARGO por el periodo de años respectivamente.

Los ingresos se estimaron utilizando el coste de la instalación con el proceso convencional (euros/metro), multiplicado por la cantidad de cable a instalar con el SCARGO por el periodo de años respectivamente.

La ganancia resulta de la diferencia entre los ingresos y los costes.

Como se puede observar en la tabla es posible obtener una ganancia de 6 millones de euros en el primer año utilizando un vehículo SCARGO. Los costes anuales de la financiación de la inversión sobre un periodo de veinte años están considerados dentro del capítulo de costes.

La tabla muestra que en menos de tres años se podría tener amortizada la inversión de 14 millones de euros que requiere la construcción de un vehículo SCARGO. Esta cifra de retorno de inversión tan corta es un indicador de la alta rentabilidad del proyecto, lo que puede ser muy atractivo para empresas del sector de la industria eólica.

8 Conclusiones y perspectivas

Se ha desarrollado un proceso innovador (mediante un vehículo llamado SCARGO de operación remota) para el enterramiento de cables submarinos. Este proceso simplifica el enterramiento de los cables y además genera un ahorro económico significativo frente al proceso convencional utilizando barcos cableros.

Los resultados del estudio técnico realizado muestran la factibilidad para la instalación de los cables inter array y la no viabilidad para la instalación de los cables export.

El proceso innovador supone un gran avance en términos económicos ya que la ausencia de todo tipo de barcos durante la instalación genera un ahorro significativo de costes. Además tiene otras ventajas de carácter técnico como una mejor calidad de enterramiento de los cables lo que repercute en una vida útil más larga de los mismos y una simplificación del proceso de enterramiento.

El estudio económico ha revelado un ahorro de coste de la instalación del cable inter array con el proceso innovador que oscila entre el 36% y el 62%, según se tome un escenario realista o conservador.

Dado que el coste de la instalación de los cables actualmente representa un 4% de toda la inversión necesaria para la instalación de un parque eólico offshore, con la puesta en marcha del nuevo proceso se podría conseguir una disminución de dichos costes a aproximadamente la mitad de su montante actual. Esto supondría una contribución importante para mejorar la competitividad de la energía eólica offshore.

Según un estudio realizado en el sector de la energía eólica offshore se prevé una fuerte demanda en el mercado de la instalación de cables submarinos en la industria offshore en Europa hasta 2030 lo que probablemente generará una escasez de barcos cableros en los próximos años [39].

El coste de la inversión para el nuevo vehículo de operación remota se estima en una cuarta parte aproximadamente de la inversión requerida actualmente para la compra de un barco cablero.

Otro factor a tener en cuenta es que el proceso innovador genera un retorno de la inversión inferior a tres años lo que disminuye el riesgo económico y es un buen indicador de rentabilidad.

De cara al futuro sería interesante estudiar otras posibles aplicaciones del vehículo SCARGO que podrían contribuir a una bajada del coste de la generación de energía eólica offshore.

Una posible aplicación sería su utilización en trabajos de mantenimiento o reparaciones de los cables submarinos u otras instalaciones bajo el agua. El vehículo SCARGO cuenta con la ventaja de poder ejecutar esos trabajos incluso bajo condiciones marítimas adversas.

Otra posibilidad a explorar es la utilización del vehículo SCARGO en los trabajos de instalación y mantenimiento de los export cables; de momento por razones técnicas se ha descartado su uso en esas tareas pero con el perfeccionamiento futuro de la tecnología de conectores húmedos, así como la construcción de parques eólicos en aguas más profundas, esta posibilidad podría llegar a ser viable.

9 Patentes

Los resultados de los trabajos realizados han demostrado la viabilidad técnica y económica del proceso innovador de instalación de cables, esto ha llevado a tomar la decisión de solicitar dos patentes relacionadas con el diseño del vehículo SCARGO y el proceso de ejecución de la instalación de los cables.

La **primera patente** se refiere al vehículo de operación remota SCARGO y su característica única de ser alimentado, monitorizado y controlado por el propio cable que está instalando. De esta manera es posible eliminar el uso de barcos durante el proceso de la instalación del cable y así bajar considerablemente el coste de la instalación. El uso del vehículo SCARGO también permite operar en condiciones marítimas adversas lo que permite reducir el tiempo de ejecución de la obra.

Además se supone que con el proceso innovador el cable está expuesto a menos estrés durante la instalación, lo que permite reducir los riesgos asociados a fallos en el mismo e incluso incrementa su vida útil.

La **segunda patente** trata de un dispositivo que facilita la instalación y subida de los cables inter array a la plataforma del aerogenerador y al mismo tiempo cumple las funciones de fijación y protección del mismo, ver detalles en los apartados 4.2.2.1 y 4.2.2.2 .

El uso de este dispositivo facilita el proceso de la instalación, elimina el uso de buzos y permite un ahorro económico considerable.

Actualmente las dos posibles patentes están siendo verificadas y se encuentran en estado de redacción, el objetivo es realizar su solicitud oficial lo más pronto posible.

10 Bibliografía

- [1] M. Z. J. Cristina L. Archer, «Evaluation of global wind power,» 2005. [En línea]. Disponible: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JD005462/epdf>. [Último acceso: Octubre 2015].
- [2] E. d. V. Hans Eerens, «Wind-energy potential in Europe 2020-2030,» Diciembre 2008. [En línea]. Disponible: http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TP_2008_6_ren_wind_energy_Europe.pdf. [Último acceso: Agosto 2015].
- [3] T. C. Estate, «A Guide to an Offshore Wind Farm,» 2010. [En línea]. Disponible: <http://www.thecrownestate.co.uk/media/5408/ei-a-guide-to-an-offshore-wind-farm.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [4] ABB, «Submarine cable systems,» 04 2010. [En línea]. Disponible: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/badf833d6cb8d46dc1257c0b002b3702/\\$file/XLPE+Submarine+Cable+Systems+2GM5007+.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/badf833d6cb8d46dc1257c0b002b3702/$file/XLPE+Submarine+Cable+Systems+2GM5007+.pdf). [Último acceso: 08 2015].
- [5] ThinkDefence, «An Offshore Problem,» 07 Abril 2013. [En línea]. Disponible: <http://www.thinkdefence.co.uk/2013/04/an-offshore-problem/>. [Último acceso: Octubre 2015].
- [6] LORC, «LORC KNOWLEDGE List of Offshore Wind Farms,» LORC, 17 Agosto 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.lorc.dk/offshore-wind-farms-map/list>. [Último acceso: 17 Agosto 2015].
- [7] Varios, «Cable lay vessels,» Diciembre 2015. [En línea]. Disponible: <http://lerustraining.blogspot.com.es/2013/12/cable-lay-vessels.html>. [Último acceso: Enero 2016].
- [8] D. N. V. AS, «Subsea Power Cables in Shallow Water,» Febrero 2014. [En línea]. Disponible: <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/codes/docs/2014-02/RP-J301.pdf>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [9] S. W. NEWS, «ABB Invests USD 400 Million to Expand Subsea Cable Production Capacity in Sweden,» subsea world news, 8 12 2011. [En línea]. Disponible: <http://subseaworldnews.com/2011/12/08/abb-invests-usd-400-million-to-expand-subsea-cable-production-capacity-in-sweden/>. [Último acceso: noviembre 2015].
- [10] SMD, «COMPACT 2.3/3.0M HARD GROUND CABLE TRENCHER,» 2014. [En línea]. Disponible: <https://smd.co.uk/products/tractors-self-propelled/cbt1100.htm>. [Último acceso: agosto 2015].

- [11] O. MAGNE, «Espacenet SYSTEM FOR SUBSEA CABLE INSTALLATION,» 2012. [En línea]. Disponible:
<http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=WO&NR=2012007790A1&KC=A1&FT=D>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [12] Nexans, «NEXANS CAPJET trenching system,» [En línea]. Disponible:
http://www.nexans.no/eservice/Norway-no_NO/fileLibrary/Download_540151571/Norway/files/DATABLAD%20CAPJET.pdf. [Último acceso: agosto 2015].
- [13] J. Schachner, «POWER CONNECTIONS FOR OFFSHORE WIND FARMS,» Enero 2004. [En línea]. Disponible:
http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/OffshoreWindFarmEnergy/res00068/E_infra_master_thesis.pdf. [Último acceso: Agosto 2015].
- [14] Nexans, «Power Cable Catalogue,» 2012. [En línea]. Disponible:
<http://www.nexans.co.nz/NewZealand/2013/Power%20Cable%20Catalogue%20Full%20version%202012.pdf>.
- [15] Wikipedia, «List of offshore wind farms in the North Sea,» Julio 2015. [En línea]. Disponible:
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms_in_the_North_Sea. [Último acceso: Agosto 2015].
- [16] M. Ketting, «BauPortal,» Abril 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.bauportal-digital.de/ce/praktische-gesichtspunkte-der-hydraulikauslegung-von-sonderfahrzeugen-mit-raupenfahrwerken/detail.html>. [Último acceso: 18 Agosto 2015].
- [17] IHC, «Hi-Traq,» Junio 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.ihceb.com/subsea-technologies/subsea-technologies/tracked-vehicles/hi-traq/>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [18] P. O. Group, «Company Profile,» [En línea]. Disponible:
<http://pharos.thirdfloordesign.net/cms/uploads/downloads/pharos-offshore-company-profile.pdf>. [Último acceso: 2015].
- [19] F. S. Services, «Q1400 TRENCHING SYSTEM,» 2012. [En línea]. Disponible:
<http://www.fugrosm.com/assets/resources/files/Fugro-TSM%20Q1400%20Trenching%20System.pdf>. [Último acceso: 2015].
- [20] V. O. O. W. P. bv, «Outline Method Statement Submarine Export cable installation,» 16 Octubre 2012. [En línea]. Disponible:
http://www.rvo.nl/sites/default/files/sn_bijlagen/bep/80-Windparken/Windpark-Gemini/Fase1/2_Ontwerpbesluiten/_5%20MER_Bijlage%207.pdf. [Último acceso: 2015].
- [21] D.-S. J. a. X. L. Z. N. Yang1, «Tension Analysis of Submarine Cables During Laying Operations,» 2013. [En línea]. Disponible:

- <http://benthamopen.com/contents/pdf/TOCIEJ/TOCIEJ-7-282.pdf>. [Último acceso: 2015].
- [22] M. O. ENGINEERING, «Special Report,» Mayo 2013. [En línea]. Disponible: http://www.ocean-tec.co.uk/downloads/file_20130515155444.pdf. [Último acceso: Agosto 2015].
- [23] PARKBURN, «3.5Te Capacity (Top Loading) Tensioner Data Sheet,» [En línea]. Disponible: <http://www.parkburn.com/ProductsAndMarkets/PowerCableHandlingSystems/Tensioners/Typical%203.5Te%20Tensioner%20Data%20Sheet.pdf>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [24] A. H. Lee Willis, «Electrical Power Cable engineering,» 2005. [En línea]. Disponible: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2014/McGee.pdf. [Último acceso: 08 2015].
- [25] S. H. Karlsdóttir, «Experience in transporting energy through subsea power cables: The case of Iceland,» 2013. [En línea]. Disponible: http://skemman.is/stream/get/1946/15487/37516/1/Experience_in_transporting_energy_through_subsea_power_cables_The_case_of_Iceland.pdf. [Último acceso: 8 2015].
- [26] M. BITOWT y M. JOHANSSON, «Design of a tidal power park and a wave power park with a techno-economical approach,» 2013. [En línea]. Disponible: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/178247/178247.pdf>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [27] C. Energy, «Corvus Energy - Technology,» [En línea]. Disponible: <http://corvus-energy.com/Technology.html>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [28] W. G. Kenny, «Wet Mate Connector Market Study,» 21 3 2014. [En línea]. Disponible: <https://ore.catapult.org.uk/documents/10619/115897/pdf/70d226bc-98f0-4986-b3b3-1043b1822053>. [Último acceso: 8 2015].
- [29] Siemens, «Siemens Subsea Medium and High Power Electrical Connector Systems for the Oil & Gas industry,» 2013. [En línea]. Disponible: http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/industries-utilities/oil-gas/applications/subsea/downloads/SpecTRON_brochure.pdf. [Último acceso: 08 2015].
- [30] Siemens, «FoeTRON,» mayo 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/industries-utilities/oil-gas/applications/subsea/products/connectors/siemens-industries-utilities-market-specific-solutions-subsea-foetron-oil-gas-brochure.pdf>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [31] Siemens, «Wet mateable medium voltage power, low voltage auxiliary and fibre optic systems,» Mayo 2015. [En línea]. Disponible:

- <http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/market-specific-solutions/oil-and-gas/documents/marine-renewables122014.pdf>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [32] R. J. Michael Slater, «Electromagnetic Field Study,» 2010. [En línea]. Disponible: <https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/22435/7-The-prediction-of-electromagnetic-fields-generated-by-submarine-power-cables.pdf?sequence=18>. [Último acceso: Octubre 2015].
- [33] Vattenfall, «Technical Description Lillgrund Wind Power Plant,» septiembre 2008. [En línea]. Disponible: https://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/om-vattenfall/om-oss/var-verksamhet/vindkraft/lillgrund/technical_description_lillgrund_11336934.pdf. [Último acceso: agosto 2015].
- [34] Vattenfall, «Offshore Cable Installation - Lillgrund,» Enero 2009. [En línea]. Disponible: https://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/om-vattenfall/om-oss/var-verksamhet/vindkraft/lillgrund/offshore_cable_installation.pdf. [Último acceso: Agosto 2015].
- [35] B. OFFSHORE, «Vessel, Pleijel,» BALTIC OFFSHORE, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.balticoffshore.se/pleijel.html>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [36] P. M. R. A/S, «M/S "AASE MADSEN" Diving and Offshore Vessel,» [En línea]. Disponible: <http://peter-madsen.dk/Brochurer/AM%20-%20uk%20rev%202013.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [37] EWEA, «Wind energy scenarios for 2030,» Agosto 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf>. [Último acceso: Octubre 2015].
- [38] G. M. S. Limited, «Corporate Overview and Introduction to the Off-Shore Power Cable Installation Business,» 2010. [En línea]. Disponible: <https://www.marinemoney.com/sites/all/themes/marinemoney/forums/NYC10/Presentations/Jack%20Barker.pdf>. [Último acceso: Agosto 2015].
- [39] G. M. S. Limited, «Corporate Overview and Introduction to the,» 2010. [En línea]. Disponible: <http://www.marinemoney.com/sites/all/themes/marinemoney/forums/NYC10/Presentations/Jack%20Barker.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2015].
- [40] EWEA, «Wind energy scenarios for 2030,» Agosto 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf>.
- [41] GWEC, «GWEC Global Wind Energy Council,» 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>.

- [42] E. T. C. o. A. P. a. C. C. Mitigation, «Wind-energy potential in Europe 2020-2030 ETC/ACC Technical Paper 2008/6,» 2 Noviembre 2009. [En línea]. Disponible: http://acm.eionet.europa.eu/reports/ETCACC_TP_2008_6_ren_wind_energy_Europe.
- [43] T. Worzyk, Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects, Berlin Heidelberg: Springer Verlag , 2009, p. 60.