La primera interconexión española de corriente continua (HVDC). El proyecto Rómulo (Península-Mallorca)

Autores: Juan Prieto y Ramón Granadino de Red Eléctrica de España

1. INTRODUCCIÓN

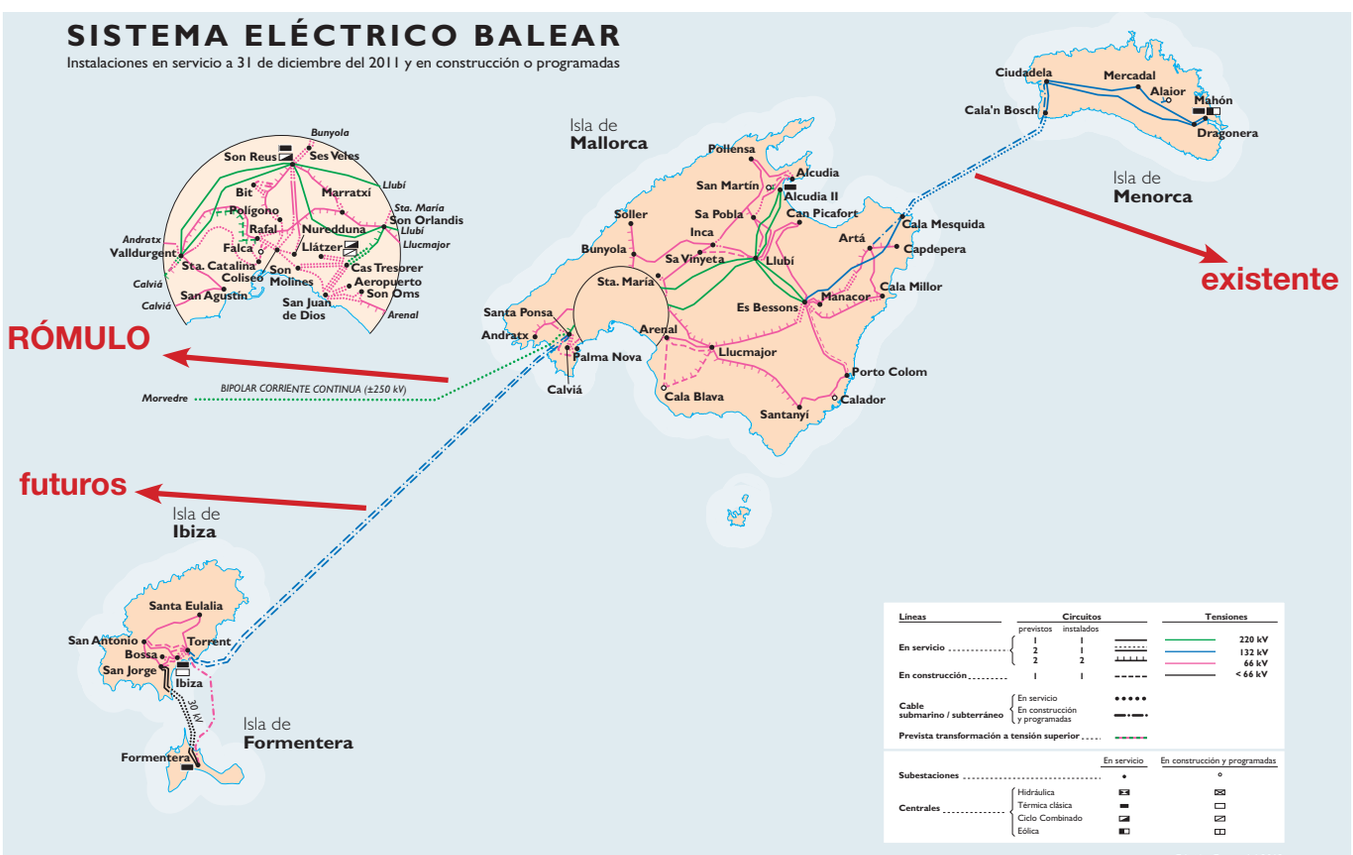
El *Sistema Eléctrico Balear* está constituido por dos subsistemas independientes: Mallorca-Menorca e Ibiza-Formentera. Éstos no están conectados al sistema peninsular español, que sí lo está al *Sistema Europeo ENTSO-E*. *Red Eléctrica de España* (REE), transportista único y operador del sistema eléctrico español adjudicó en 2007 dos importantes contratos llave en mano, incluyendo desde el diseño hasta la construcción, a la empresa *Siemens* y al consorcio formado por las empresas *Nexans y Prysmian*, para la construcción de las estaciones conversoras y del sistema de cables, respectivamente. Estos contratos significaron el arranque del proyecto Rómulo que constituye el enlace eléctrico submarino entre la Península y Mallorca.

En resumen, el proyecto Rómulo comprende 244 km de interconexión en corriente continua HVDC con cables submarinos entre la Península, en el término municipal de Sagunto, Valencia, y la isla de Mallorca en Santa Ponsa, en el municipio de Calviá.

El proyecto Rómulo tiene varias características que lo hacen excepcional y desafiante:

- Es la mayor inversión llevada a cabo por REE en un único proyecto (420 M€).
- Es el segundo sistema de cables submarinos más profundo del mundo con una profundidad máxima de 1485 m.
- Es el primer enlace en corriente continua de alto voltaje (HVDC) instalado en el sistema eléctrico español.

Se trata de un enlace bipolar con retorno metálico, diseñado con tecnología bidireccional de corriente continua de 2 x 200 MW de potencia, con una tensión nominal de ± 250 kV-DC. Como continuación a los estudios de viabilidad finalizados en 2006, los contratos se firmaron en septiembre de 2007. Las tres operaciones de tendido de cable tuvieron lugar en el primer semestre de 2011, y el funcionamiento



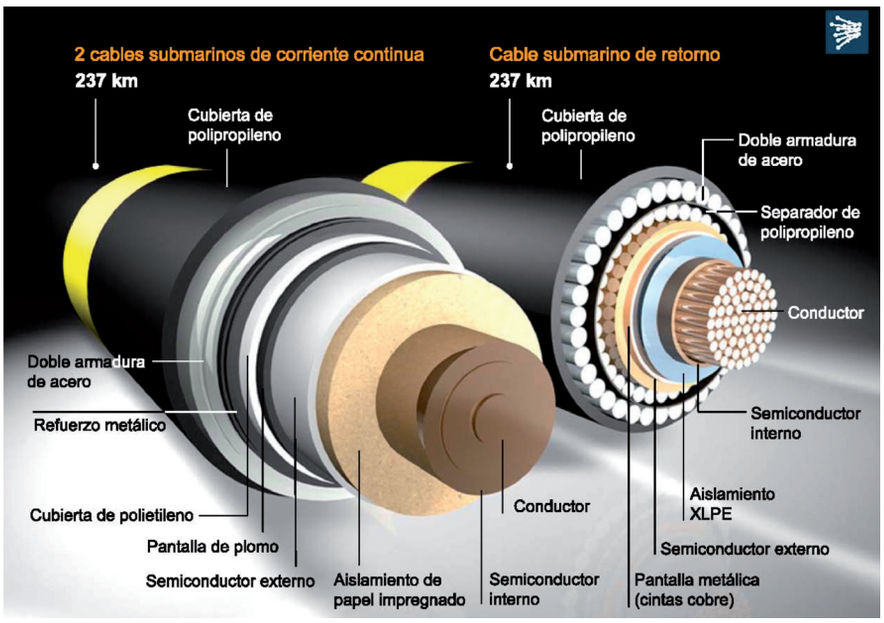
El Proyecto RÓMULO y las conexiones existente y futura en el Sistema Eléctrico Balear

del enlace comenzó en otoño de 2011.

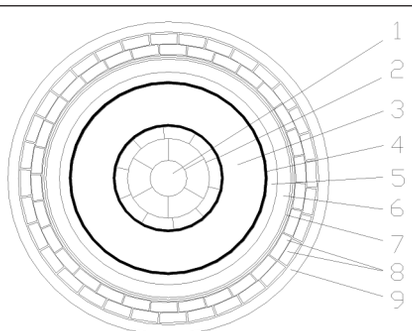
La motivación principal de esta interconexión es mejorar la calidad y fiabilidad del suministro eléctrico mediante la conexión de las Islas Baleares al *Mercado Ibérico de Electricidad.*

Desde finales de 2011, esta interconexión se encuentra operando a total satisfacción de REE y en varias ocasiones ha demostrado ya su utilidad para mitigar o evitar incidentes que sin el enlace hubieran afectado grandemente a la seguridad de suministro eléctrico en Mallorca y Menorca.

Adicionalmente, el enlace supone un ahorro económico del orden de 50 M€ al año, en el coste global de cobertura de la demanda eléctrica en Baleares, puesto que por los cables discurre energía generada en la península que de otro modo tendría que ser generada



Cables submarinos de alta tensión y de retorno



1. Conductor	El conductor, de cobre, consiste en un hilo circular central rodeado de hilos concéntricos de sección sectorial Diámetro del conductor	31,5 mm
2. Blindaje del conductor	Sobre el conductor hay una capa semiconductora de papel de carbón	
3. Aislamiento	El aislamiento consiste en papel impregnado de un componente de alta viscosidad Espesor Diámetro sobre el aislamiento	12.0 mm 57.0 mm
4. Blindaje del aislamiento	El aislamiento está blindado con papel de carbón y papel metalizado	
5. Pantalla de plomo	El material de revestimiento es de aleación de plomo extruido. Espesor	2.65 mm
6. Cubierta anti-corrosión	Cubierta extruida de polietileno Espesor	3.2 mm
7. Refuerzo transversal	El refuerzo transversal consiste en dos capas de acero galvanizado	
8. Armadura	Forma de armadura de acero. Dimensiones	Plano 3x8 mm
9. Cubierta exterior	Cintas de Polipropileno Espesor	3.5mm
TAMAÑO GLOBAL DEL CABLE		
Diámetro exterior		94 mm
Peso		29.5 kg/m
Peso en el agua		22.5 kg/m

en las islas, cuyo parque de generación es más costoso e ineficiente.

Del mismo modo, esta interconexión tiene beneficios medioambientales puesto que evita decenas de miles de toneladas de CO_2 cada año, debido a que la generación eléctrica desde la península tiene un elevado componente renovable (eólica, hidráulica, etc) que no tiene el sistema Balear.

EL SISTEMA DE CABLES

El contrato llave en mano para el enlace eléctrico submarino, comprende el diseño, ensayo, fabricación y tendido de los siguientes componentes principales:

- Dos cables submarinos de ±250 kV-HVDC, cada uno de 237 km de longitud.
- Dos cables subterráneos de ±250 kV-HVDC, cada uno de 7 km de longitud.
- Un cable submarino de retorno de alrededor de 237 km de longitud.
- Un cable subterráneo de retorno de 7 km de longitud.
- Un cable submarino y subterráneo de fibra óptica de 244 km de longitud.

Una de las características principales del sistema de cables es que cada uno de los cables submarinos se transportó e instaló desde un barco en una única tirada, evitando así cualquier tipo de empalme.

Durante los estudios de viabilidad (2005-2006) se llevó a cabo una exhaustiva inspección del fondo marino con dos objetivos, seleccionar las mejores rutas para los cables entre la estación conversora Morvedre (Sagunto) en la península y la estación conversora de Santa Ponsa (Mallorca) e identificar la morfología del fondo marino, ambos necesarios para diseñar las medidas generales de protección de los cables.

Dentro de lo que abarcaba el contrato llave en mano, se realizó un estudio adicional detallado del fondo marino y del subsuelo (BAS). Esto se llevó a cabo para optimizar aún más las rutas del trazado y decidir los mejores métodos para su protección.

Debido a la longitud del enlace, se ha utilizado cable impregnado en masa para el trazado submarino. También se ha utilizado cable impregnado en masa para el trazado de tierra y así evitar empalmes entre dos tipos de cables distintos.

Una característica inusual de este proyecto es el uso de dos cables impregnados en masa de HVDC con 750 mm2 de conductor de cobre provisto de dos diseños diferentes de armadura. El cable de simple armadura se utiliza para aguas poco profundas (unos 200 m) y el cable de doble armadura se utiliza en las zonas de mayor profundidad siendo la máxima de 1485 m. De esta manera no hace falta recurrir al uso de empalmes intermedios.

Las principales características de los componentes de los cables submarinos de doble armadura de acero (DWA) son las siguientes.

El aislamiento está hecho de capas de alta densidad de papel impregnado en masa viscosa de aceite que proporcionan un alto nivel de rendimiento eléctrico. La fase de encintado se lleva a cabo controlando tanto la temperatura como la humedad en el ambiente. Este procedimiento de fabricación asegura la mejor calidad del dieléctrico evitando la posibilidad de pliegues durante las siguientes fases del proceso, cuando el cable se enrolla y desenrolla reiteradamente. Las fases de secado e impregnación se llevan a cabo en toda la longitud del cable, fabricándolo en plataformas giratorias. Después de la fase de secado el cable se impregna con el aceite mediante presión negativa (degasificado).

La armadura está compuesta de dos capas de acero galvanizado de alta resistencia. Las dos capas se aplican en direcciones opuestas, de tal manera que no tienen torsión causada por la alta tracción mecánica a la que el cable estará sometido durante el tendido.

Los ensayos en el mar se llevaron a cabo por *Prysmian* y *Nexans* en tramos de alta y media profundidad utilizando los cables HVDC diseñados por cada fabricante. Prysmian utilizó dos tipos de tendido de cable, aproximadamente 6000 m en aguas profundas y 2000 m en profundidad media, ambos tendidos con un conjunto de empalmes flexibles. Para esta prueba Prysmian utiliza su propia embarcación "Giulio Verne", equipada adecuadamente para tender y recubrir el cable en la profundidad adecuada.

Nexans también utilizó dos tendidos de cable, 3500 m para la zona de mayor profundidad y 600 metros para la zona de profundidad media. Ambos tendidos incluyen un conjunto de empalmes flexibles. Nexans utiliza su propia embarcación, el "Nexans Skagerrak" para tender y recubrir los cables. Estos dos barcos referidos son los únicos en el mundo capaces de realizar la instalación de estos cables a tan alta profundidad.

Los cables se fabrican bajo un sistema de garantía de calidad en las plantas de producción de Prysmian (Italia) y Nexans (Noruega y Japón) que a continuación se detallan:

- Polo 1 del cable de HVDC submarino y subterráneo: Arco Felice (Napoles-Italia) de Prysmian
- Polo 2 del cable submarino de HVDC: Tokio (Japón) de Nexans
- Polo 2 del cable subterráneo de HVDC: Halden (Noruega) de Nexans
- Cable de retorno metálico: 50% en Arco Felice (Prysmian) y 50% en Halden (Nexans)
- Cable de Fibra Óptica submarina y subterránea: Rognan (Noruega) de Nexans.

La fabricación del total de los casi 1.000 km de cables submarinos ha requerido algo menos de dos años. Después de la fabricación y ensayos en fábrica cada cable submarino se cargó en una longitud única en la embarcación que realizó cada tendido.



Buque de tendido de cables

PROTECCIÓN DEL CABLE

Las principales amenazas para los cables submarinos en el Mediterráneo están vinculadas a la pesca de arrastre, seguidas por las anclas de los barcos. Debido a la importancia de esta interconexión HVDC para la seguridad del suministro de energía en Mallorca, cada extremo de los cables submarinos han sido soterrados desde la costa hasta una profundidad de 1000m. Se ha diseñado de esta manera para limitar el riesgo de fallo en caso de daños externos.

Se han requerido obras de protección en unos 100 km de cada uno de los tres cables. Alrededor del 90% de la longitud total protegeida se ha enterrado bajo el lecho marino con inyección de agua a presión (*jetting*), ya que las características del fondo marino permiten un soterramiento eficaz de entre 40 cm y 2 m. Para alojar el resto del tendido se ha procedido a la apertura de zanjas en sustratos duros/compactos como medio de protección.

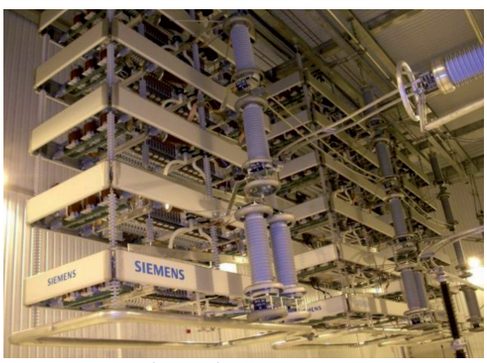
LAS ESTACIONES CONVERSORAS

Las estaciones conversoras en la Península y Mallorca han sido diseñadas y construidas por *Siemens* según lo especificado por *Red Eléctrica* y, en concreto, para dar cabida a los cuatro escenarios de operación que a continuación se detallan:

- Funcionamiento Bipolar (con cable de retorno en servicio)
- Funcionamiento Rígido Bipolar (por indisponibilidad del cable de retorno)
- Operación Monopolar con retorno metálico usando cable de electrodo
- Operación Monopolar con retorno metálico usando cable de polo.

Las pérdidas de carga de cada estación conversora son menos del 0.8% de la potencia nominal, además del 0,1% como máximo de pérdidas en vacio. El nivel de transferencia de potencia nominal de corriente continua está entre 800 A y 824 A, dependiendo de la configuración y de la dirección del flujo de energía. Con el fin de proteger





Estación conversora de Morvedre (Sagunto)
Sala de válvulas de tiristores

la pérdida de optimización del funcionamiento monopolar y además asegurar el correcto funcionamiento de los cables electrodo y polo, es viable que trabajen como conductores de retorno en paralelo.

La transferencia entre los diferentes modos de funcionamiento de la HVDC (bipolar con y sin retorno metálico y monopolar con uno o dos cables de retorno metálicos) se realiza a través de mecanismos automáticos. Equipos específicos como el de retorno metálico del interruptor de transferencia (MRTB) y el interruptor de retorno metálico (MRS) se implementan en el sistema HVDC para que este sea capaz de cambiar del cable de electrodo de retorno al cable de polo de retorno incluyendo el funcionamiento en paralelo de los dos cables sin disminuir el nivel de transferencia de potencia ni la interrupción del transporte de corriente continua.

Con el fin de proporcionar el mejor control del nivel de tensión y para equilibrar la demanda de potencia reactiva del convertidor de corriente continua en todas las condiciones de funcionamiento y al menos a un máximo de tensión de corriente alterna, en la Estación Conversora de Morvedre se instala un total de compensación reactiva de 200 MVAr y de 164 MVAr en la Estación Conversora de Santa Ponsa. La compensación se divide en dos bancos de 100 MVAr (1 por polo) en el lado de la Península y cuatro bancos de 41 MVAr (2 por polo) en el lado del enlace de Mallorca.

El funcionamiento de un conversor



Estación conversora de Santa Ponsa (Calviá, Mallorca)

de HVDC inherentemente genera corrientes armónicas, que si no se solucionan pueden propagarse por el sistema de transmisión, tal vez incluso amplificados debido a las resonancias del sistema. Con el fin de mitigar estos efectos armónicos en la península los bancos de compensación de reactiva se han diseñado para actuar también como filtros pasivos. Estos filtros están en sintonía con el armónico 12 y 24.

El sistema de transporte en Mallorca puede mostrar condiciones inferiores de resonancia. De este modo, es necesario un ajuste adicional del 3er. armónico, resultando en 4 filtros pasivos idénticos de sintonización triple y corriente alterna. Tal diseño de filtro no sólo satisface los requisitos de rendimiento de armónicos en toda la operación, sino que también ofrece un alto grado de flexibilidad y redundancia.

Las conversoras del Proyecto Rómulo se componen de tecnología tiristores activados con luz. Las válvulas de tiristores están dispuestas en tres torres de 12 pulsos, cada uno representando una fase. Cada torre consta de seis unidades modulares, cada una con 24 niveles de tiristores conectados en serie con los componentes auxiliares.

Las estaciones conversoras están situadas en zonas industriales, por lo tanto, se minimiza el impacto ambiental. Las zonas industriales también facilitan otro tipo de infraestructuras como la carretera de acceso adecuada, alimentación auxiliar, evacuación de agua de lluvia o de aguas residuales, comunicaciones, etc. Por otra parte, la proximidad al mar y a otras fábricas industriales significa que las estaciones conversoras están afectadas por el ambiente salino y la contaminación. El desafío al que se enfrentó REE fue el de la necesidad de equilibrar las obras civiles y su mantenibilidad, al tiempo que garantizaba que la disponibilidad del sistema no se viera afectada.

En el proyecto Rómulo se tomó la decisión de usar tecnología GIS (equipos de interior aislados en gas) en la estación de Santa Ponsa (Mallorca) y HIS (equipos aislados en gas pero de exterior) en la estación de Morvedre (Península). Las tecnologías seleccionadas para la construcción de la subestaciones de CA son las soluciones más efectivas en términos de mantenimiento y en lo que se refiere al ahorro de espacio.

RETOS Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

Los principales retos para la instalación del enlace fueron los siguientes:

- Aspectos de gestión: dos programas de ensayos, dos pruebas en el mar, la coordinación de los dos fabricantes, en cuatro fábricas, aceptación social y actuaciones para la integración medioambiental.
- Aspectos operativos: tres campañas para el tendido del cable, tendido del cable en alta mar a casi 1500 m de profundidad, campañas de protección (300 km), trabajos de tendido y situación de los barcos cerca de sus límites operativos.
- Aspectos de ingeniería: por la profundidad máxima del cable, la longitud del cable submarino sin empalmes intermedios, el diseño de trazado y la evaluación del soterramiento bajo el lecho marino.

Durante la duración del proyecto RÓMULO fueron introducidas diferentes medidas con el fin de maximizar la integración medioambiental y la aceptación social. Estos proyectos tan especiales sólo tienen éxito si estos dos temas claves se tienen en cuenta desde el inicio con los estudios de viabilidad hasta el final con la instalación del mismo.

Para las rutas del cable, es de suma importancia que en la etapa inicial del proyecto se obtenga el máximo consenso posible con todas las partes implicadas, sobre todo en tierra y las proximidades de las costas.

Para las estaciones conversoras, la medida más favorable fue la selección del diseño de interior para las principales instalaciones (excepto para los transformadores). Las ventajas de la construcción cerrada es que reduce el impacto visual sobre los edificios de los alrededores, y reduce el impacto del ruido generado por los filtros. La instalación cerrada de los equipos eléctricos permite una apariencia externa homogénea de toda la estación conversora.

Los esfuerzos más significativos del proyecto para hacer posible su aceptación e integración, se han realizado en la zona de Mallorca debido a sus especiales condiciones sociales y ambientales. En Santa Ponsa el impacto visual se redujo aún más con la selección del color ocre para las fachadas del edificio impuesto por las normas de las autoridades del municipio. Esta tonalidad integra el edificio en la composición del paisaje agrícola adyacente a la zona industrial. Por otra parte, se desarrolló un proyecto de integración paisajística como medida para reducir, aún más, el impacto visual de la estación.

Otras de las medidas específicas adoptadas para contribuir a la aceptación y la integración de la estación conversora de Santa Ponsa, fue la protección de los algarrobos (Ceratonia siliqua). Junto con los expertos en medio ambiente del municipio se llevó a cabo un plan de trasplante durante un período de cinco semanas, durante el cual, más de 30 árboles fueron trasplantados a una nueva ubicación cerca del recinto con una técnica especial que garantizaba el 95% de supervivencia.

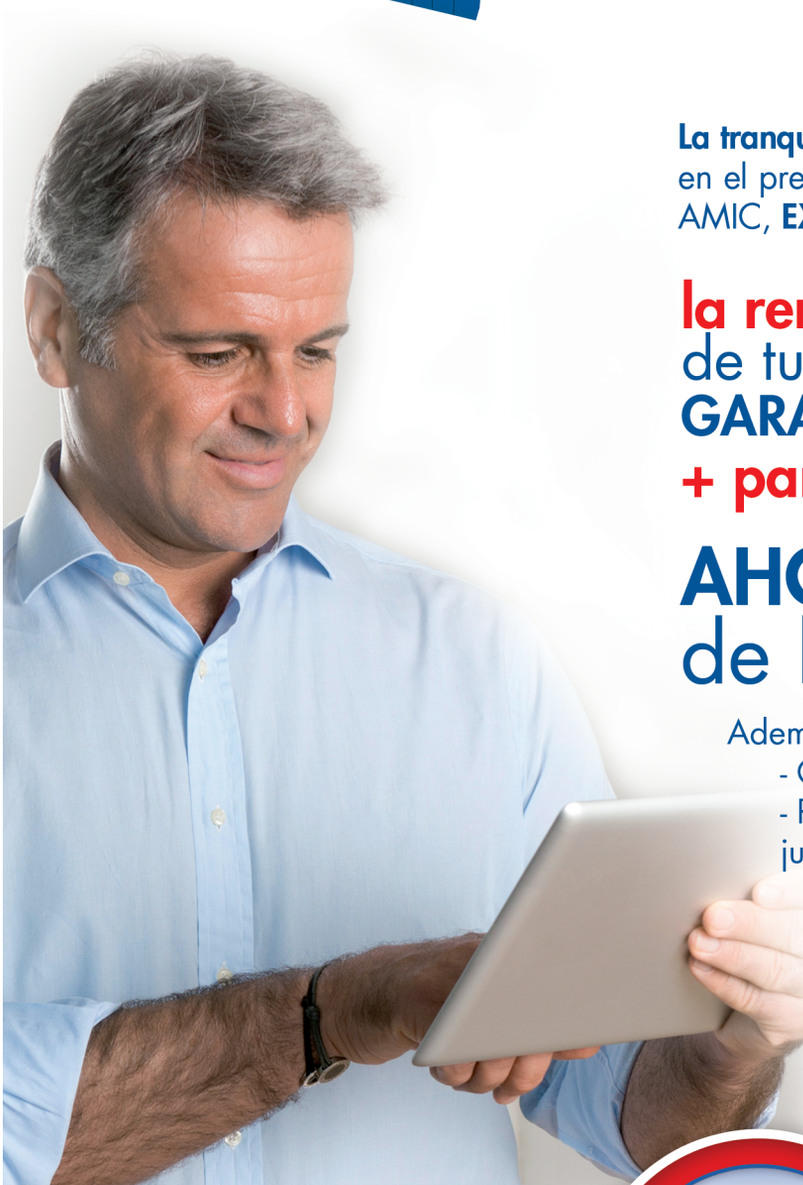
Por último, para el enlace submarino en Mallorca se adoptó una solución basada en la técnica de perforación horizontal dirigida. Esta solución minimiza el impacto de las obras en la playa de Santa Ponsa y en las áreas con posidonia, consideradas ambientalmente muy sensibles.

CONCLUSIÓN

El Proyecto Rómulo, de interconexión eléctrica entre la Península y Mallorca, establece un nuevo nivel de fiabilidad y control del flujo de potencia en el sistema eléctrico balear, reduciendo los cortes de energía, proporcionando una mayor flexibilidad operativa y permitiendo un ahorro de costes para el sistema eléctrico nacional.

amic PPA

Planifica TU JUBILACIÓN con AMIC PPA



La tranquilidad de tu futuro con excelentes ventajas fiscales[3] en el presente. Así es el Plan de Previsión del Asegurado de AMIC, **EXCLUSIVO** PARA INGENIEROS.

la rentabilidad de tus ahorros GARANTIZADA 3,90% [1]
+ participación en beneficios [2]

AHORRO de hasta 49% [3] **en I.R.P.F.**

Además:
- Gastos mínimos de gestión [4].
- Posibilidad de disponer de tu plan antes de la jubilación [5].

Y ELIGE tu regalo[6] del

CATÁLOGO DE REGALOS amic



(1) Rentabilidad fija garantizada actualizable trimestralmente. (2) Rentabilidad año 2012: 4,87% (rentabilidades pasadas no garantizan rentabilidades futuras). (3) Las aportaciones que hagas se reducen de la Base Imponible General de tu declaración. Según la legislación fiscal vigente. Consulta la legislación fiscal aplicable en tu Comunidad Autónoma para poder conocer los tipos marginales y las limitaciones especiales aplicables. (4) 0,25% trimestral. (5) En los supuestos que permite la Ley de Regulación de los Planes y Fondos de Pensiones. (6) Solicita las bases de la promoción.

Compruébalo fácilmente:
Por teléfono: 901 12 34 12; por email: comercial@amic.es
o visítanos en nuestra sede y recibirás un obsequio.
Sede: Pso. de la Castellana, 257, 28046 Madrid
www.amic.es/ppa



Grupo amic
La Mutualidad de los Ingenieros