

Sobre el autor



Fernando Emilio Postigo Marcos

Ingeniero Industrial del ICAI con especialidad eléctrica por la Universidad Pontificia Comillas. Actualmente se encuentra realizando el Doctorado en Energía Eléctrica y trabajando en el IIT como Investigador en Formación.

Resumen del artículo

En este artículo se estudia el estado actual del sistema eléctrico balear y sus limitaciones. Con el objetivo de solventar las restricciones desde una perspectiva económica, técnica y ambiental se proponen ciertas inversiones. Estas pasan por la ejecución de una línea submarina en AC entre la península ibérica y la isla de Ibiza, así como la instalación de un compensador síncrono. Para comprobar su eficiencia se desarrolla un modelo que permite cuantificar los resultados obtenidos. La aplicación de las medidas propuestas aporta un ahorro anual de 78M€, la incorporación del archipiélago balear al sistema síncrono europeo y una importante reducción en las emisiones de CO₂.

Palabras clave: estrategia – inversiones – energéticas - eléctrico - balear

Abstract

This article studies the current state of the Balearic electrical system and its limitations. With the objective of answering the existing problems from an economic, technical and environmental perspective some investments are proposed. These investments go through

the execution of a submarine electric line in AC between the Iberian Peninsula and the island of Ibiza, as well as the installation of a synchronous compensator. In order to check its efficiency, a model is developed allowing the quantification of the obtained results. The application of the proposed measures brings an annual saving of 78M €, the incorporation of the Balearic Islands into the European synchronous system and a significant reduction in CO₂ emissions.

Key Words: strategic – investments – energetic – electric - Balearic

Análisis estratégico de inversiones energéticas en el Sistema eléctrico Balear

7 diciembre, 2016 6 diciembre, 2016

Introducción. Evolución y estado actual del sistema eléctrico balear

El sistema eléctrico balear ha estado formado hasta el año 2012 por dos subsistemas aislados. El mayor era el subsistema formado por las islas de Mallorca y Menorca, mientras que el más pequeño estaba formado por las islas de Ibiza y Formentera. Debido al tamaño de los sistemas se presentaban varios problemas fundamentales:

En primer lugar, la calidad del suministro no siempre era la deseada, produciéndose numerosos fallos en la continuidad y en la calidad del suministro. En el año 2014 la tasa de indisponibilidad de la red de transporte balear fue un 11% superior que la del resto de España. Por otra parte, el coste de explotación del sistema balear era muy elevado en comparación con el sistema eléctrico peninsular, produciéndose un sobrecoste anual al estado español cercano a los 500 M€. Finalmente, el parque de generación balear está compuesto principalmente por centrales térmicas en las que se produce la combustión de elementos fósiles implicando gran cantidad de emisiones a la atmosfera.

Con la motivación de subsanar dichos problemas, REE (Red Eléctrica de España) desarrolló el proyecto Rómulo, que hasta la fecha ha consistido en la realización de dos conexiones submarinas pioneras en el mundo. La primera fase del proyecto se denominó Rómulo I y consistió en una doble conexión de capacidad 2×200 MW en HVDC (High Voltage Direct Current) entre la península ibérica y Mallorca. La segunda fase del proyecto, denominada Rómulo II, implicó una doble conexión en AC entre Mallorca e Ibiza estableciendo una capacidad de transporte entre las islas de 2×100 MW. En la Figura 1 se muestra un mapa actual del sistema eléctrico balear tras la ejecución del proyecto Rómulo I y II.

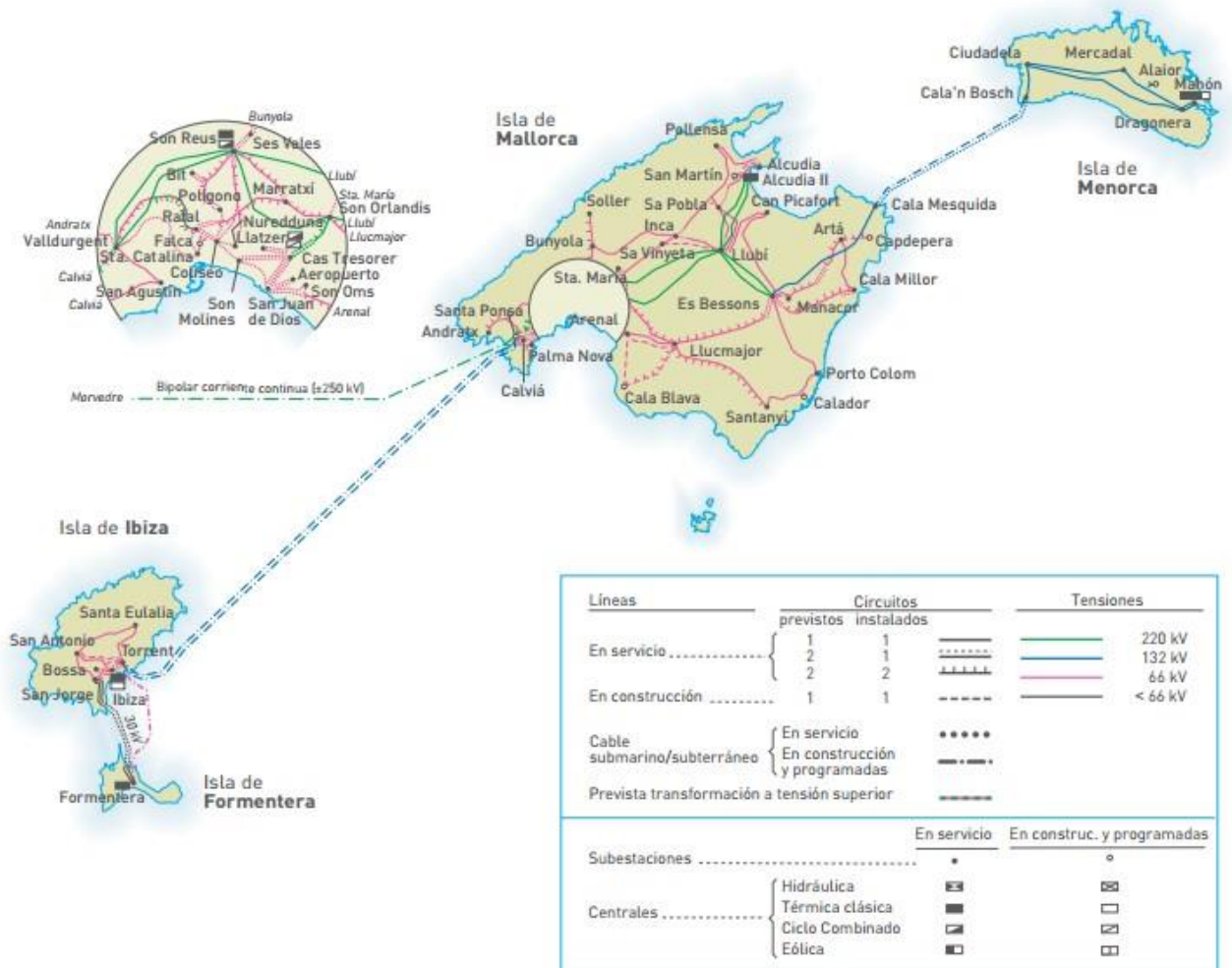


Figura 1: Mapa actual del sistema eléctrico balear. Fuente REE

Objetivos

En este contexto definimos los objetivos del proyecto. Abordamos tres aspectos fundamentales: la búsqueda de medidas que impliquen una reducción del coste actual de cobertura de la demanda insular, la disminución de las emisiones de CO₂ y la mejorar de la calidad del servicio eléctrico tanto desde el punto de vista de interrumpibilidad como de calidad de la onda.

Medidas propuestas

Con el propósito de alcanzar los objetivos antes definidos se realiza un análisis de la demanda y la generación encargada de su cobertura. En este artículo se proponen dos medidas que implicarían una tercera fase del proyecto Rómulo en el archipiélago balear.

La primera propuesta consistiría en la realización de una conexión submarina de doble circuito 2×120 MW a 132 kV en AC entre la península Ibérica y la isla de Ibiza que pueda suponer un incremento en la participación de las Islas Baleares al mercado eléctrico peninsular reduciendo de esta manera el precio de la energía. La decisión de realizar la conexión en AC se debe a que a pesar de que la distancia entre la península e Ibiza se encuentra en el umbral entre el uso de AC y DC, la corriente alterna permite incorporar a las islas baleares al sistema síncrono europeo y disponer así de ventajas tales como la estabilidad en frecuencia.

El trazado de las líneas, así como el emplazamiento de las subestaciones se selecciona de manera que se obtenga una disposición económica y técnicamente eficiente de las mismas. La subestación peninsular se localizaría en un polígono industrial próximo al municipio alicantino de Altea y a las vías del ferrocarril, de manera que el aprovisionamiento de los equipos se facilite. Por otra parte, el estribo insular de la línea se emplazaría junto a la subestación ibicenca de Torrent encargada de conectar la isla con Mallorca (proyecto Rómulo II) y cuyo terreno adyacente es actualmente propiedad de REE. Se opta por esta opción ya que de esta manera la potencia peninsular importada no consumida en Ibiza podría ser evacuada a Mallorca evitando congestiones en el propio sistema insular. La longitud final del trazado es de 142 km submarinos y 5 km subterráneos.

Ambas subestaciones se diseñan con tecnología GIS (Gas Insulated Substation), reduciendo de manera notable las distancias de aislamiento necesarias. Dada la criticidad de la conexión en la operación del sistema eléctrico balear, se opta por proporcionar independencia a cada uno de los enlaces a través de la configuración de las mismas. La subestación del extremo insular, al ser una ampliación de la ya existente se diseña conforme a los criterios de la inicial optando por tanto por una configuración de interruptor y medio en un único parque de 132 kV. En el otro extremo del enlace submarino, la subestación peninsular dispondrá de una configuración diferente en función del nivel de tensión. Se opta por una configuración de doble barra en el parque de 132 kV, mientras que el parque de 220 kV tendrá una configuración de interruptor y medio, permitiendo la conexión a dos subestaciones cercanas, Montebello y Gandía con un doble

enlace a 220 kV. La configuración simplificada de estas se puede observar en la Figura 2.

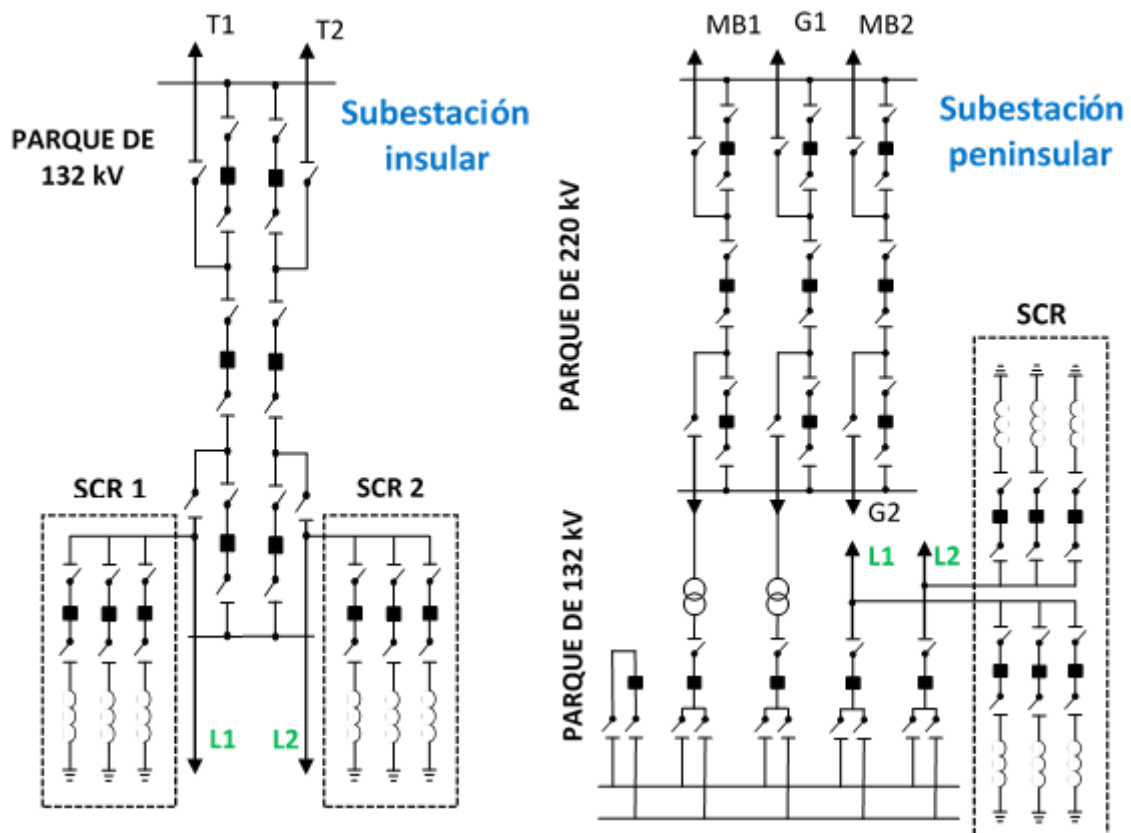


Figura 2: Esquema simplificado de las subestaciones

Dada la naturaleza de la conexión, cabe destacar la generación de reactiva producida a lo largo de los conductores submarinos, por este motivo se hacen necesarios sistemas de compensación de potencia reactiva que mantengan las tensiones entre los límites permitidos. Para la selección de los dispositivos más adecuados para este fin se ha realizado un estudio electrotécnico completo barajando todos los modos posibles de operación del enlace optando finalmente por un sistema de compensación de reactiva compuesto por un banco de tres reactancias de 22 MVar cada una. De esta manera, el conjunto de la línea y bancos de compensación pasa de ser generador de reactiva a consumidor cuando las tres reactancias están conectadas, sin embargo, ante la pérdida de una de las reactancias el sistema no colapsa y aún puede seguir operando. En la Figura 3 se puede observar el perfil de tensiones y de corrientes existentes en cada punto del conductor tomando como emisor el sistema peninsular y bajo un modo de operación en el que se transporta la máxima capacidad de potencia permitida.

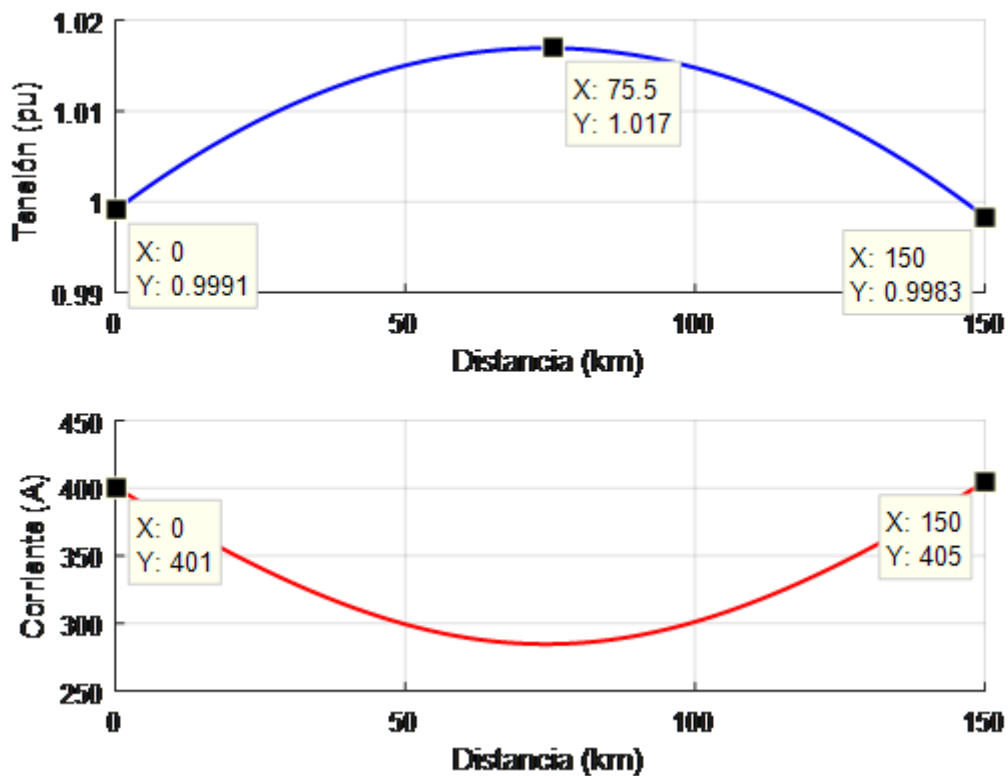


Figura 3: Perfil de tensión y corriente de los enlaces a máxima potencia

La segunda medida propuesta parte de la mejora de la operación del enlace en HVDC encargado de la conexión de la península con Mallorca (Rómulo I) cuyo factor de utilización en 2015 fue cercano al 38%. Dicha conexión se desarrolló con tecnología LCC (Line Commutated Converters), este tipo de conexión condiciona la explotación del mismo por dos motivos principales. En primer lugar, exige tensión alterna en ambos estribos de la línea impidiendo una posible explotación del archipiélago balear sin generación que la aporte. Por otro lado, las estaciones conversoras AC/DC exigen gran cantidad de potencia de cortocircuito en su punto de conexión. Este último punto no será conflictivo en el extremo peninsular de la conexión al existir una red mallada y potencia de cortocircuito suficiente para poderse operar con normalidad, sin embargo, el estribo insular carece de una red mallada y la generación balear es en múltiples ocasiones insuficiente para aportar la potencia de cortocircuito necesaria para una explotación del enlace a plena capacidad. Partiendo de las características de las estaciones conversoras existentes se ha podido establecer una relación entre la capacidad de transporte de los enlaces HVDC y la potencia de cortocircuito en barras de las mismas.

En el sistema eléctrico balear, el número de grupos acoplados en la central térmica de carbón de Alcudia define en gran medida la potencia de cortocircuito en barras de las estaciones convertoras debido a su capacidad y cercanía, haciéndose esta crítica en la operación del enlace HVDC. Con el objetivo de subsanar esta situación se propone la instalación de dos compensadores síncronos junto a las estaciones convertoras de tal manera que se aporte la potencia de cortocircuito necesaria en cada momento para la operación óptima de los enlaces. A pesar de que con la instalación de un único compensador síncrono con una potencia nominal de 270 MVA sería suficiente para poder contar con ambos enlaces (la potencia de cortocircuito se encontraría cercana a los 900 MVA), se ha optado por la instalación de dos compensadores de 150 MVA en lugar de uno de manera que se puedan seguir explotando parcialmente los enlaces HVDC aun cuando alguno de estos permanezca fuera de servicio.

Comprobación de la efectividad de las medidas propuestas

Con el objetivo de comprobar la eficacia de las medidas propuestas, se ha generado un modelo que permite evaluar el impacto de las inversiones a lo largo de un año para luego extrapolarlo durante la vida útil de las instalaciones. Para ello, se ha partido de las demandas horarias de cada sistema considerado (peninsular, Mallorca-Menorca, Ibiza-Formentera) en el año 2015 y de las curvas de precios medios ponderados de generación para dichos subsistemas. La Figura 4 tiene el propósito de esquematizar dicho proceso.

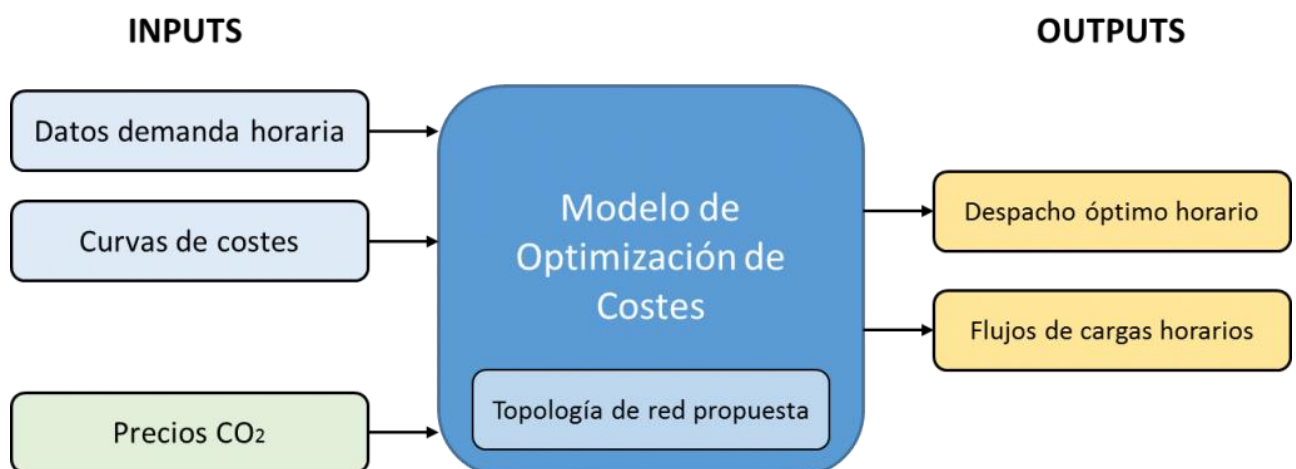


Figura 4: Esquema de entradas y salidas del modelo

En los siguientes puntos se muestran algunas de las principales expresiones del modelo de optimización.

- **F.O. (Función Objetivo):** Minimización de los costes de explotación total del sistema, siendo $C_i^*(P_{Gi})$ las curvas de costes de generación [€/MW] y P_{Gi} la potencia producida [MW]. Cabe destacar la equivalencia entre potencia y energía en el modelo ya que la demanda será estudiada para cada hora de manera ponderada en MW y el modelo se ejecuta para cada una de las horas del año. Los subíndices elegidos corresponden con 1. Península, 2. Mallorca y 3. Ibiza.

$$\text{Min}(C_1^*(P_{G1}) * E_{G1} + C_2^*(P_{G2}) * E_{G2} + C_3^*(P_{G3}) * E_{G3})$$

- **R1 (Restricción 1):** La potencia generada debe ser igual a la potencia demandada para cada una de las horas del estudio.

$$P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = P_{D1} + P_{D2} + P_{D3}$$

- **R2:** La potencia generada debe encontrarse entre unos límites establecidos.

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$$

- **R3:** El flujo de potencia que circula por las líneas en cada instante de estudio viene fijado por la potencia generada y demandada en cada uno de los nudos según las ecuaciones que a continuación se presentan. La simplicidad que las caracteriza se debe al funcionamiento de enlace HVDC bajo consigna, eliminando por tanto la necesidad de realizar flujos de cargas.

$$P_{12} + P_{13} = P_{G1} - P_{D1}$$

$$-P_{12} - P_{32} = P_{G2} - P_{D2}$$

$$-P_{13} + P_{32} = P_{G3} - P_{D3}$$

* Siendo P_{ij} la potencia que se transporta del nudo i al j

- **R4:** Las conexiones entre las islas están compuestas por dos líneas, de esta manera, el flujo que circulará entre los nudos vendrá determinado por la suma de ambas.

$$P_{ij} = P_{ij}^a + P_{ij}^b$$

- **R5:** La potencia máxima que se puede transportar a través de los enlaces viene definida por las siguientes expresiones

$$P_{ij}^{a \min} < P_{ij}^a < P_{ij}^{a \max}$$

$$P_{ij}^{b \min} < P_{ij}^b < P_{ij}^{b \max}$$

- **R6:** La seguridad en el suministro de energía eléctrica implica la necesidad de cumplimiento del criterio N-1. En el archipiélago balear esta limitación se ve relajada debido a la existencia de reserva rodante (RR), siendo esta 60 MW. Dichas restricciones se evalúan en las siguientes expresiones, de manera que la suma de las capacidades restantes por cada uno de los enlaces junto con la reserva rodante sea suficiente para suplir la pérdida de cada línea.

$$(P_{12^b \max} - P_{12^b}) + (P_{13^a \max} - P_{13^a}) + (P_{12^b \max} - P_{12^b}) + RR - P_{12^a} \geq 0$$

$$(P_{12^a \max} - P_{12^a}) + (P_{13^a \max} - P_{13^a}) + (P_{12^b \max} - P_{12^b}) + RR - P_{12^b} \geq 0$$

$$(P_{12^a \max} - P_{12^a}) + (P_{12^b \max} - P_{12^b}) + (P_{13^b \max} - P_{13^b}) + RR - P_{13^a} \geq 0$$

$$(P_{12^a \max} - P_{12^a}) + (P_{12^b \max} - P_{12^b}) + (P_{13^a \max} - P_{13^a}) + RR - P_{13^b} \geq 0$$

De la misma manera, entre la conexión entre Mallorca e Ibiza.

$$(P_{23^b \max} - P_{23^b}) + RR - P_{23^a} \geq 0$$

$$(P_{23^a \max} - P_{23^a}) + RR - P_{23^b} \geq 0$$

Un punto a tener en cuenta en el análisis de las inversiones propuestas son las emisiones de CO₂. Para su cuantificación, se ha desarrollado un término adicional que introducido en las curvas de coste de la energía permite penalizar las emisiones añadiendo su coste asociado. Este término se compone del producto de dos elementos.

$$C_i^*(E_{Gi}) = C_i(E_{Gi}) + \text{Coef Emisión}_i * \text{Precio EUA}$$

El primer elemento es un coeficiente de emisión que relaciona las toneladas de CO₂ emitidas por unidad de energía generada, siendo este diferente para cada región de producción. Cabe destacar que el parque de generación balear tiene un coeficiente de emisión un 158% superior al peninsular debido a que tan solo el 8% de la cobertura de la demanda balear proviene de origen renovable. El segundo elemento establece el precio de los European Union Allowance (EUA), estos son permisos europeos que autorizan la emisión de una tonelada de CO₂ a la atmosfera, asociando un valor económico por tonelada emitida. Este término está sujeto al mercado, por lo que no puede ser definido de manera estática. Sin embargo, se ha realizado una previsión de la fluctuación de dichos precios hasta el año 2020 (fecha en la que se podría poner en operación dichas instalaciones) mediante un modelo de regresión a partir de los estudios de 11 analistas individuales recogidos en Carbon-Pulse. La Figura 5 resume el resultado de dicho estudio y una extrapolación con la tendencia de los cinco años siguientes.

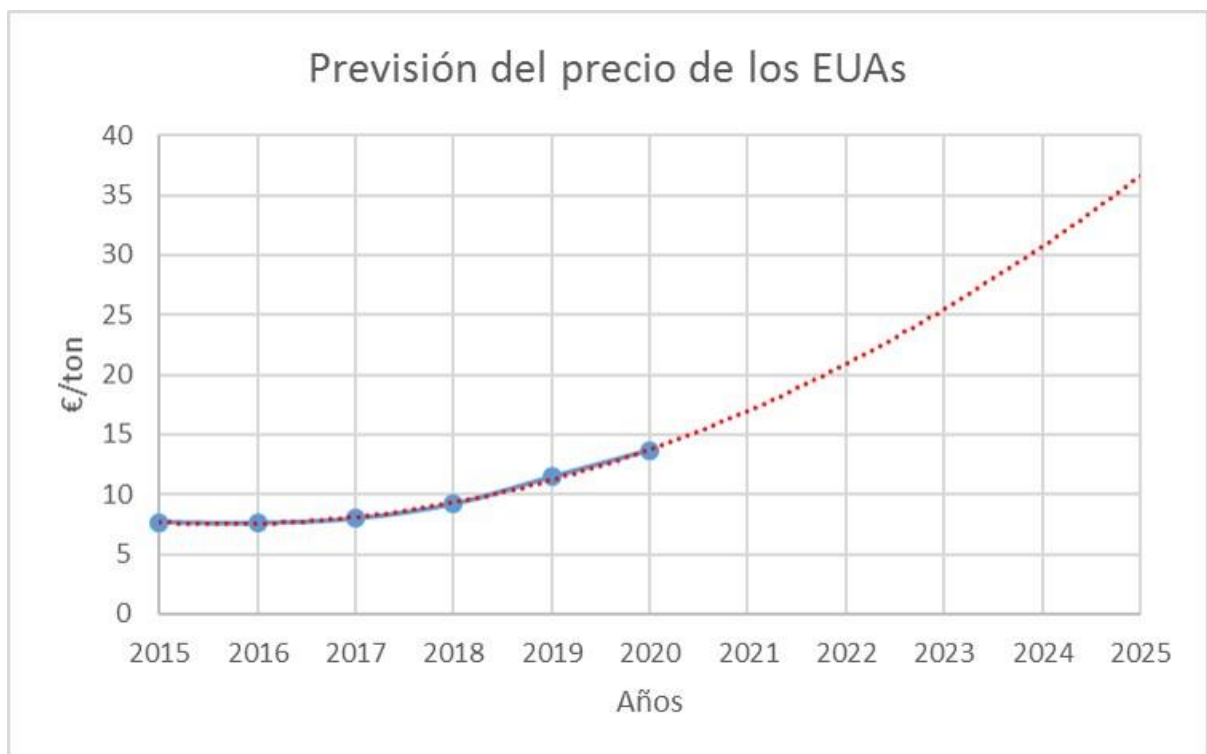


Figura 5: Previsión del precio de los EUAs

Como se puede observar, el precio de los EUAs tiene una propensión de crecimiento positivo durante los próximos años, obteniéndose un precio medio estimado de 13.65 €/ton para el año 2020, este es el dato que se utiliza en el modelo para el cálculo de las previsiones. No obstante, esta suposición es conservadora puesto que el precio de los EUAs tiene una tendencia positiva a partir de 2020 (momento a partir del cual se iniciará la operación) y esto justificaría aún más la inversión dado el coeficiente de emisión balear. Este término se puede anular en el caso en que no se quiera tener en cuenta el efecto de las emisiones en los resultados.

Resultados

Los resultados obtenidos con el modelo sin tener en cuenta el efecto del CO₂ indican un ahorro anual en la explotación de 61 M€, mientras que si se añade en el modelo dicho efecto el ahorro anual asciende a 78 M€. Esto se debe principalmente a un incremento en la importación de potencia peninsular, alcanzando una media de 384 MW y suponiendo un avance en la utilización de la capacidad de las conexiones de un 38% a un 62%.

Finalmente se realiza un estudio económico en el que se analiza el coste de las inversiones propuestas. De una manera resumida, el coste de las líneas supone un 74% de la inversión total, los compensadores síncronos un 18%, y las subestaciones peninsular e insular el 8% restante. Estas instalaciones suponen un coste total de 253M€. Para valorar la rentabilidad de las inversiones se propone el ratio de periodo de retorno de la inversión, que permite relacionar el coste total con el beneficio por unidad de tiempo. De esta manera se puede determinar que la inversión será recuperada en menos de cuatro años.

Más allá de los beneficios económicos, se pueden observar ventajas desde el punto de vista electrotécnico puesto que el sistema balear pasaría a ser síncrono con el peninsular y se reducirían los deslastres de carga debidos a alteraciones de la frecuencia (no cuantificados económicamente en el modelo) o desde el punto de vista ambiental, produciéndose un ahorro cercano al millón de toneladas de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Conclusiones y futuros desarrollos

Los resultados antes presentados denotan la eficiencia de las medidas formuladas produciéndose un ahorro anual de 78 M€, la incorporación del archipiélago balear al sistema síncrono europeo y una importante reducción en las emisiones de CO₂.

Se propone como materia de estudios futuros el estudio de la eliminación de la generación de origen fósil del subsistema Ibiza-Formentera. Según contempla la legislación española, en el caso de ejecutarse las inversiones propuestas en este artículo se cumplirían los índices de cobertura mínimos.

Como conclusión, la ampliación del proyecto Rómulo expuesta en este artículo aportaría notables beneficios respecto a la situación actual abriendo la puerta a futuros desarrollos.

Bibliografía

- Análisis estratégico de inversiones energéticas en el Sistema eléctrico Balear; Proyecto Fin de Máster en Ingeniería Industrial en la Universidad Pontificia Comillas; Fernando Postigo Marcos. Junio de 2016.
- Avance del Informe del Sistema Eléctrico 2015, publicado en 2016 por Red Eléctrica de España S.A.
- Plataforma web ESIOS de Red Eléctrica de España SAU para la consulta de precios, demanda y generación en los sistemas eléctricos peninsular y balear.
- Energías Renovables y Eficiencia Energética en las Islas Baleares: Estrategias y líneas de actuación; Govern de les Illes Balears; Conselleria d'Economia i Competitivitat, Direcció General d'Indústria i Energia; Mayo de 2015.
- Folleto Proyecto Rómulo; Red Eléctrica de España SAU; Septiembre de 2011.
- Subestaciones eléctricas de alta tensión, Red Eléctrica de España SAU, Matías J. Sánchez Mingarro; Septiembre de 2015.
- Electric Power Systems – Voltage control models for underground cables; Universidad Pontificia Comillas; Luis Rouco Rodríguez.
- Putting a Price on Carbon with a Tax; World Bank; 2016.
- Carbon Pulse Article EUA's Forecasting; 2016.
- Factores de Emisión de CO₂ y Coeficientes de Paso a Energía Primaria de Diferentes Fuentes de Energía Final Consumidas en el Sector Edificios en España; Ministerio de Industria Energía y Turismo – Instituto de Diversificación y Ahorro de la Energía; Versión de Marzo de 2014.