

## Informe final

Acción: Master plan for OPS in Spanish ports (2015-EU-TM-0417-S). Actividad: 2. Specific studies. Sub-actividad: 2.2. Analysis of technical alternatives and innovations. Tarea: 2.2.1. Benefits of the OPS on the national electric grid" (UPM-GELEO Research Group).

Coordinador de la tarea 2.2.1: Sergio Martínez (UPM-GELEO Research Group)

### Resumen

En este documento se resumen brevemente las actividades realizadas en la tarea 2.2.1 y sus fechas de realización, se citan los documentos que describen cada actividad con detalle y se presentan las conclusiones generales de la tarea y la recomendación final.

### 1. Introducción

De acuerdo con el "Grant Agreement" de la acción, esta tarea se ha implementado en tres fases: *"First the definition of scenarios and data collection for the provisions of ancillary services from ships to the grid, electrical installations on ports and their associated technical parameters, grid power quality and capacity parameters for the analysis of contribution to the OPS. On the **second phase**, a power system model with shore-to-ship power supply and control strategy will be developed. During the **third phase**, results of the model will be analyzed and recommendations both to the OPS system and to the power grid will be subsequently produced"*.

### 2. Actividades de asistencia a las reuniones de la asamblea general del proyecto

Los días 10 y 11 de noviembre 2016, el coordinador de la tarea asistió a la reunión inicial de la asamblea general del proyecto en Santa Cruz de Tenerife. Presentó la tarea al resto de socios, participó en las discusiones y realizó una visita técnica a las instalaciones del terminal de pasajeros del puerto y al buque Bencomo Express. Los días 26 y 27 de octubre de 2017 asistió a la asamblea general anual en Palma de Mallorca, presentó los trabajos desarrollados desde el inicio del proyecto hasta la fecha de la reunión y participó en la visita a las instalaciones del varadero del puerto y al faro de Porto Pi. El día 30 de noviembre de 2018 asistió a la asamblea general anual en la sede de Puertos del Estado en Madrid donde también presentó los trabajos desarrollados durante el año 2018. Los días 11 y 13 de septiembre de 2019 asistió a la asamblea general anual en la ETS de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid donde también presentó los trabajos desarrollados durante el último año 2019. Finalmente, el día 17 de diciembre de 2020 asistió a la reunión final de la asamblea general que se celebró por videoconferencia.

### 3. Actividades de la primera fase

En relación con la primera fase de la tarea, se ha realizado un primer estudio (de 11-2016 a 02-2017) para la definición de escenarios en el suministro de servicios complementarios de red por parte de

los buques. Los resultados se recogen en <sup>1</sup>, junto con algunos resultados de recopilación de datos. Como ejemplo, la figura siguiente muestra una tabla resumen de las posibilidades de prestación de distintos servicios complementarios en distintos escenarios

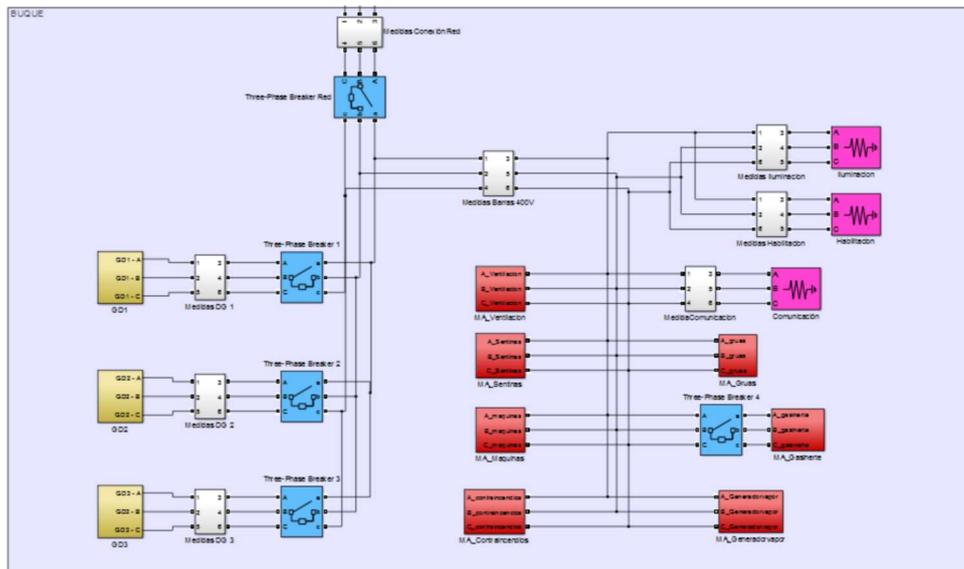
		Control U	Control P-f	Generación P
Escenarios 1 y 6	CASO A	SI	Subir y bajar: SI Subir: SI	SI
	CASO B	SI	Bajar: NO Subir: SI	SI
	CASO C	SI	Subir y bajar: SI	SI
	CASO D	SI	Subir: BAJO Bajar: SI	SI
Escenarios 2 y 7	CASO A	SI	Subir: NO Bajar: SI	NO
	CASO B	SI	Subir: SI Bajar: NO	NO
	CASO C	SI	Subir y bajar: BAJO	NO
	CASO D	NO	NO	NO
Escenarios 3 y 8	CASO A	SI	Subir y bajar: SI	SI
	CASO B	SI	Subir: SI Bajar: NO	SI
	CASO C	SI	Subir y bajar: SI	SI
	CASO D	SI	Subir: BAJO Bajar: SI	SI
Escenarios 4 y 9	CASO A	SI	Subir: NO Bajar: SI	NO
	CASO B	SI	Subir: SI Bajar: NO	NO
	CASO C	SI	Subir y bajar: BAJO	NO
	CASO D	NO	NO	NO
Escenarios 5 y 10	CASO A	SI	Subir y bajar: SI	SI
	CASO B	SI	Subir: SI Bajar: NO	SI
	CASO C	SI	Subir y bajar: SI	SI
	CASO D	SI	Subir: BAJO Bajar: SI	SI

Tabla 19: Capacidad en servicios complementarios de cada escenario

### Caracterización de escenarios

1. Conexión en AT a 50 Hz en tierra y 50 Hz en el buque sin convertidor.
2. Conexión en AT a 50 Hz en tierra y 50 Hz en el buque con convertidor de dos cuadrantes
3. Conexión en AT a 50 Hz en tierra y 50 Hz en el buque con convertidor de cuatro cuadrantes.
4. Conexión en AT a 50 Hz en tierra y 60 Hz en el buque con convertidor de dos cuadrantes.
5. Conexión en AT a 50 Hz en tierra y 60 Hz en el buque con convertidor de cuatro cuadrantes.
6. Conexión en BT a 50 Hz en tierra y 50 Hz en el buque sin convertidor.
7. Conexión en BT a 50 Hz en tierra y 50 Hz en el buque con convertidor de dos cuadrantes.
8. Conexión en BT a 50 Hz en tierra y 50 Hz en el buque con convertidor de cuatro cuadrantes.
9. Conexión en BT a 50 Hz en tierra y 60 Hz en el buque con convertidor de dos cuadrantes.
10. Conexión en BT a 50 Hz en tierra y 60 Hz en el buque con convertidor de cuatro cuadrantes.

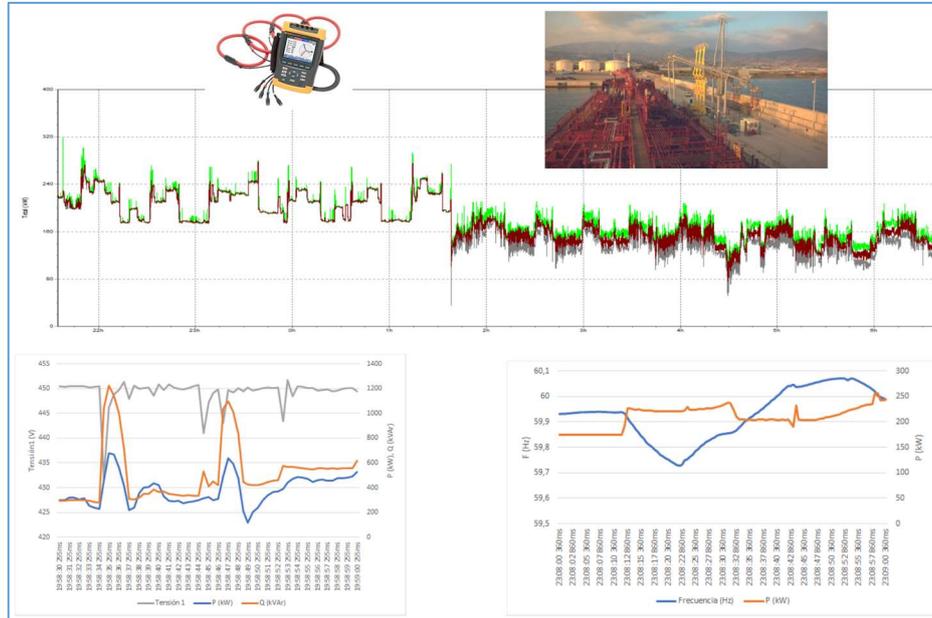
En un segundo trabajo (de 11-2016 07-2017) <sup>2</sup>, se ha procedido a la recopilación de datos de sistemas eléctricos de los buques. Se desarrolló un primer modelo en Matlab SimPowerSystems, con datos procedentes de información bibliográfica. La figura siguiente muestra el diagrama de bloques del nivel superior del modelo desarrollado.



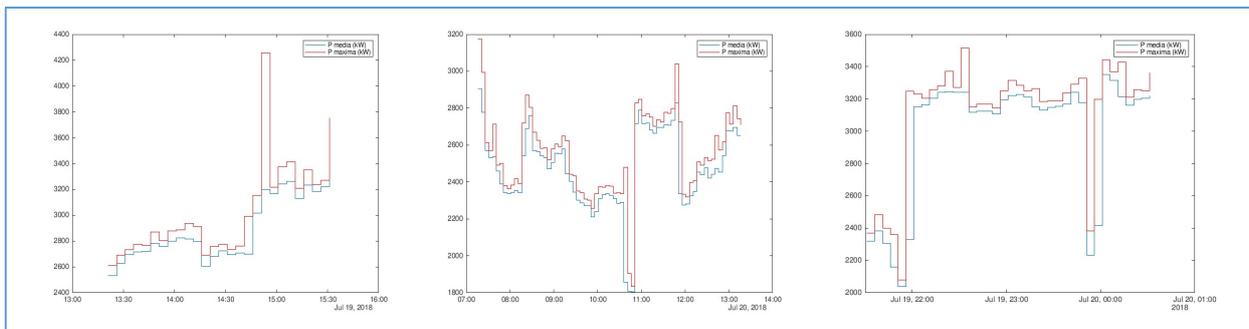
<sup>1</sup> Marta de España, "Caracterización de escenarios en el suministro eléctrico a buques durante el amarre", Trabajo Final de Grado en Ingeniería de la Energía, Universidad Politécnica de Madrid, Feb. 2017.

<sup>2</sup> Gonzalo Fernández, "Modelado del sistema eléctrico de buques de transporte de hidrocarburos para el estudio del suministro eléctrico en amarre y su posible contribución a servicios complementarios de red", Trabajo Final de Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, Jul. 2017.

En abril de 2017, se llevó a cabo una campaña de medidas a bordo del buque Tinerfe en dos estancias diferentes en los puertos de Motril y Algeciras, en las que se registraron valores reales de tensiones, intensidades, potencias activas y reactivas y frecuencia con una tasa de muestreo de dos muestras por segundo. La figura siguiente muestra una fotografía tomada a bordo del buque y algunos de los registros obtenidos.



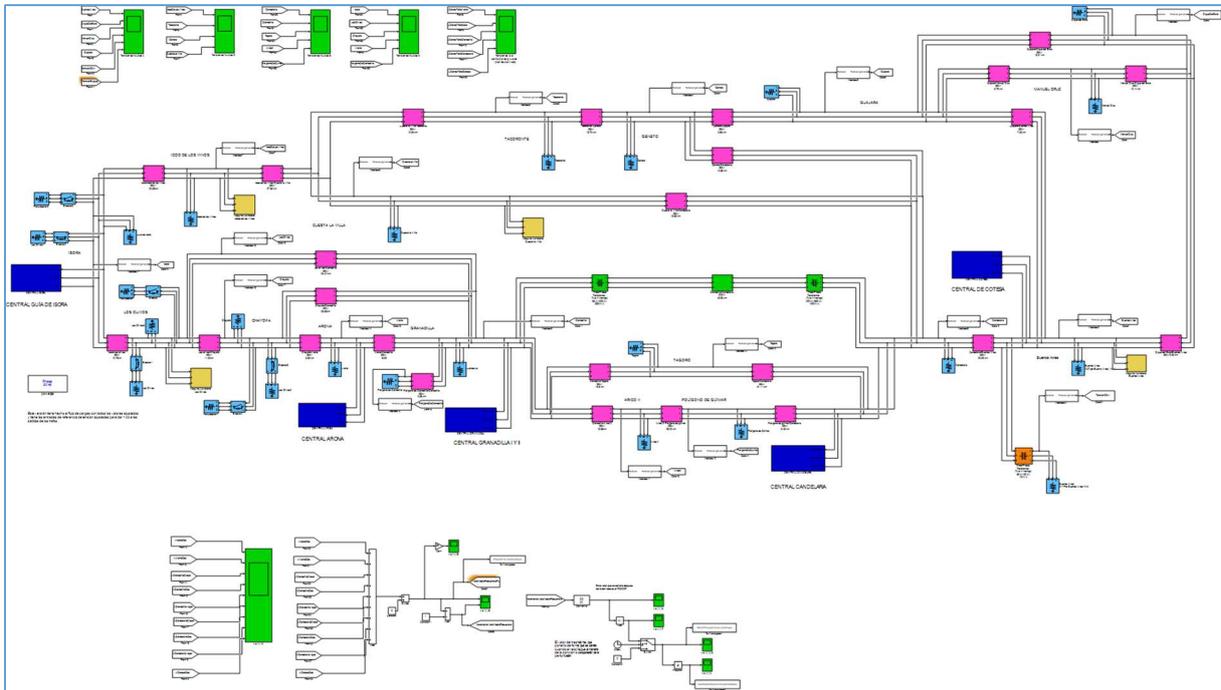
Como complemento, en julio de 2018, se llevó a cabo una campaña de medidas análoga a bordo del buque Fortuny en dos estancias diferentes en los puertos de Málaga y Melilla. En este caso, se registraron tensiones, intensidades, potencia activa, potencia reactiva, y frecuencia con una tasa de muestreo de 12 muestras por hora. La figura siguiente muestra tres registros de potencia activa media y máxima en cada periodo cincominutal.



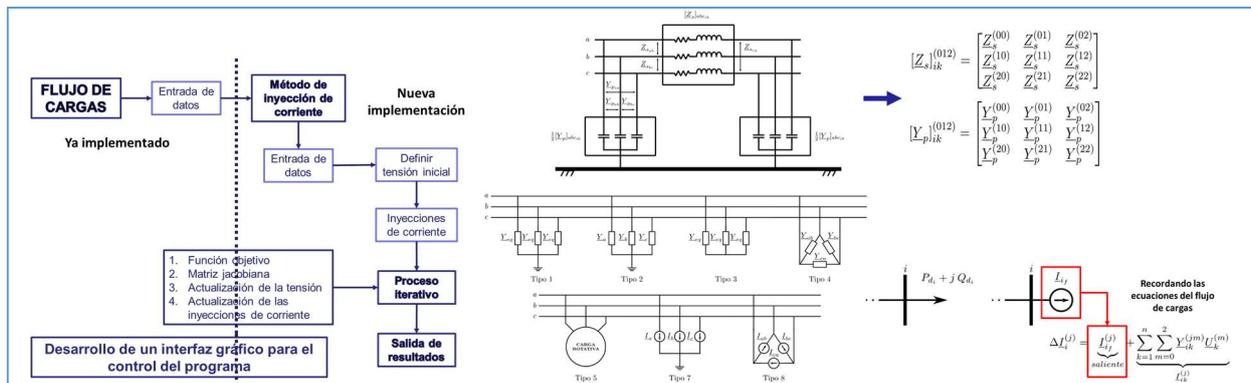
#### 4. Actividades de la segunda fase

En relación con la segunda fase de la tarea, en primer lugar, se ha desarrollado un modelo simplificado del sistema eléctrico de la isla de Tenerife <sup>2</sup>. Este modelo ha sido útil para una primera evaluación del impacto del OPS en el control de frecuencia de la red y para interactuar con el modelo del sistema eléctrico del buque.

En un tercer trabajo (de 2-2017 a 10-2018) <sup>3</sup>, se ha desarrollado un modelo detallado del sistema eléctrico de la isla que permite obtener resultados más precisos en cuanto a control de frecuencia y la evaluación del impacto del servicio complementario de control de tensión. La figura siguiente muestra el diagrama de bloques del nivel superior del modelo desarrollado.



En un cuarto trabajo (de 11-2016 a 07-2017) <sup>4</sup>, se ha desarrollado una herramienta en Matlab para el análisis de redes eléctricas desequilibradas que permite evaluar el impacto del servicio de control de tensión en la red de distribución próxima al punto de conexión del buque. La figura siguiente muestra el diagrama de bloques general de la herramienta y algunos detalles de su implementación.

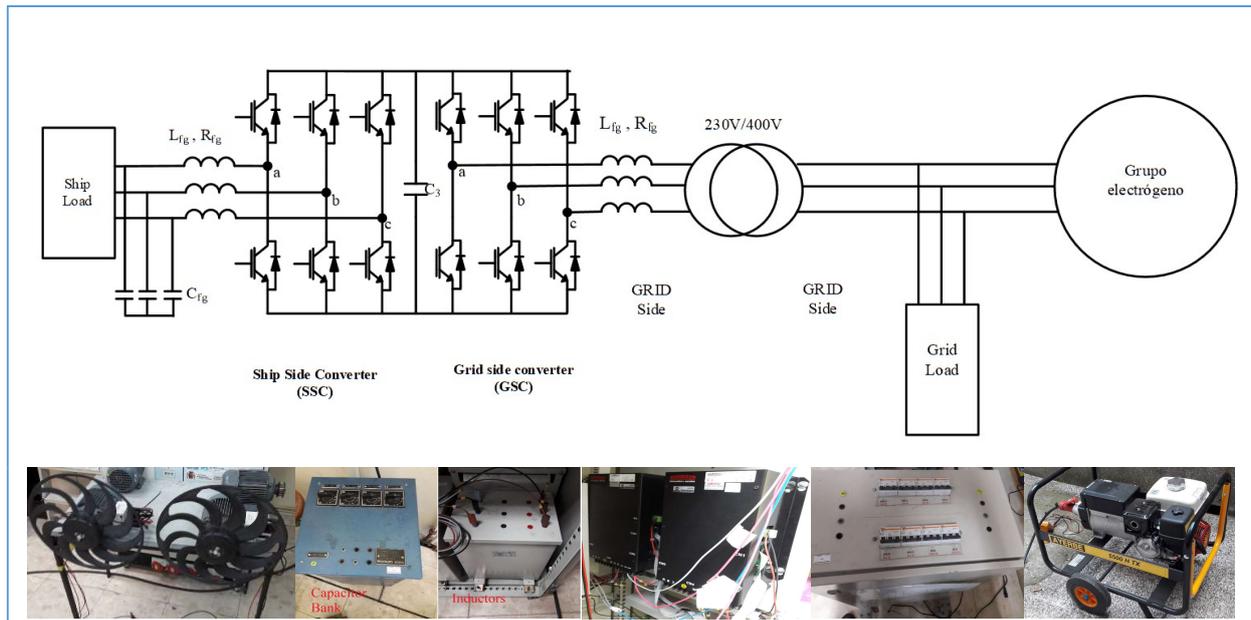


En un quinto trabajo (de 01-2018 a 07-2018), se ha construido una microrred de laboratorio compuesta por un generador eléctrico de 5,5 kVA, una carga de red de tipo impedancia, un transformador, un convertidor electrónico “back-to-back” y una carga de buque con accionamientos de tipo bombeo. Esta microrred se ha utilizado para validar en el laboratorio las estrategias de

<sup>3</sup> Inmaculada Amor, “Modelado del sistema eléctrico de la isla de Tenerife para el estudio del impacto del suministro eléctrico a buques durante su amarre”, Trabajo Final de Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, Oct. 2017.

<sup>4</sup> David Montalbán, “Desarrollo informático del método de inyección de corriente para la resolución del flujo de cargas trifásico”, Trabajo Final del Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, Jul. 2017.

control propuestas en el segundo trabajo <sup>2</sup>. La figura siguiente muestra el esquema general de dicha microrred y fotografías de algunos de sus componentes.



## 5. Actividades de la tercera fase

En relación con la tercera fase de la tarea, se han realizado trabajos de evaluación general del impacto del OPS en la red eléctrica en dos ámbitos: reducción de emisiones de  $CO_2$  y contribución al servicio complementario de control primario de frecuencia.

Respecto a las **emisiones de  $CO_2$** , en un sexto trabajo (de 02-2017 a 02-2018) <sup>5</sup>, se han recopilado y procesado datos acerca de las estancias de buques en los puertos españoles. Tras un minucioso trabajo de cribado de errores y recopilación de datos de otras fuentes, fundamentalmente de Red Eléctrica de España, como resultado, y en combinación con datos suministrados por Puertos del Estado, se han obtenido estimaciones espacio-temporales acerca del consumo eléctrico de los buques y se ha analizado el impacto en la cobertura de esta demanda por parte de las centrales eléctricas del sistema con detalle diezminutal a lo largo de un año. Ello ha permitido calcular la masa de  $CO_2$  que dejarían de emitir todos los buques y la que emitirían las centrales del sistema eléctrico para producir esa energía eléctrica con la estructura de generación correspondiente a cada periodo de diez minutos. La principal contribución de este estudio sobre otras estimaciones es la finura en el detalle espacio-temporal (puerto a puerto, buque a buque y con la estructura de generación eléctrica de cada sistema eléctrico, todo ello con detalle diezminutal durante un año). Como resumen, la tabla siguiente muestra los resultados agregados del año 2016. La conclusión general para el proyecto es que el suministro eléctrico a buques durante su amarre supone una importante reducción neta de las emisiones de  $CO_2$ .

<sup>5</sup> Alejandro García, "Suministro de energía eléctrica a buques durante su amarre. Balance entre el incremento de emisiones de  $CO_2$  en el sistema de energía eléctrica español y su reducción en la red de Puertos del Estado", Trabajo Final de Máster Universitario en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid, Feb. 2018.

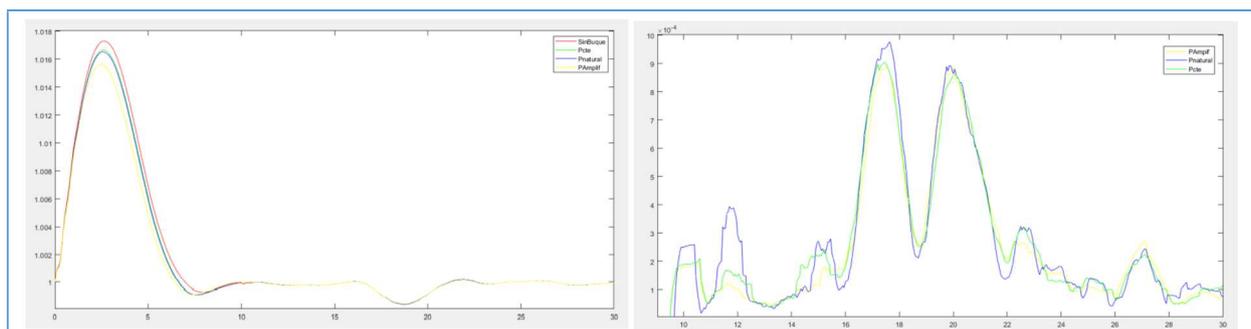
Em. CO2 Maniobra (ME)	Em. CO2 Maniobra (AE)	Em. CO2 Reposo hotelling (AE)	Em. CO2 Trabajo hotelling (AE)
80.745,52	162.629,29	1.058.333,88	528.042,88
Em. CO2 Maniobra y hotelling (Totales)			1.829.751,57
Em. CO2 Hotelling			
<b>1.586.376,76</b>			
Em. CO2 SE (comp. mensual)		Em. CO2 SE (comp. diezminutal)	
392.264,73		306.106,11	
Ahorro em. generando con SE (mensual)		Ahorro em. generando con SE (diezmin.)	
1.194.112,03		1.280.270,65	

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la contribución de los buques conectados al servicio complementario de **control de frecuencia**, en el tercer trabajo mencionado anteriormente, basado en el segundo y continuación del mismo, la utilización de los modelos desarrollados en la segunda fase ha permitido obtener ciertas conclusiones de índole técnica o de implementación. Lo más destacable, sin embargo, es que ha permitido demostrar tres ideas de interés general para el proyecto: el suministro eléctrico a buques durante su amarre puede ayudar a la estabilidad de frecuencia del sistema eléctrico al que se conecta; cuanto mayor sea la potencia del buque, su efecto estabilizador es mayor; y el efecto estabilizador se puede potenciar mediante un control adecuado de la conexión.

En un séptimo trabajo (de 12-2017 a 11-2018) <sup>6</sup>, se ha utilizado el modelo desarrollado en el tercero <sup>3</sup> para analizar el impacto que una participación en el control potencia-frecuencia de buques conectados a la red, con un control como el propuesto en el segundo trabajo <sup>2</sup>, puede tener sobre el incremento de la generación eólica técnicamente admisible en un sistema eléctrico, particularizado para el de la isla de Tenerife. La conclusión principal es que dicha participación permite reducir las oscilaciones de frecuencia asociadas a las variaciones de producción de los parques eólicos debidas a las fluctuaciones del viento. Dicho de otro modo, para un nivel admisible de variabilidad de la frecuencia del sistema eléctrico, la contribución de los buques a la regulación primaria de frecuencia permite un mayor nivel de penetración de la generación eólica.

En un octavo trabajo, (de 3-2018 a 9-2019) <sup>7</sup>, se realizó un análisis de impacto similar sobre el incremento de la generación solar fotovoltaica técnicamente admisible, llegándose a conclusiones análogas. La figura siguiente muestra la evolución de la frecuencia y de su derivada en uno de los casos estudiados.

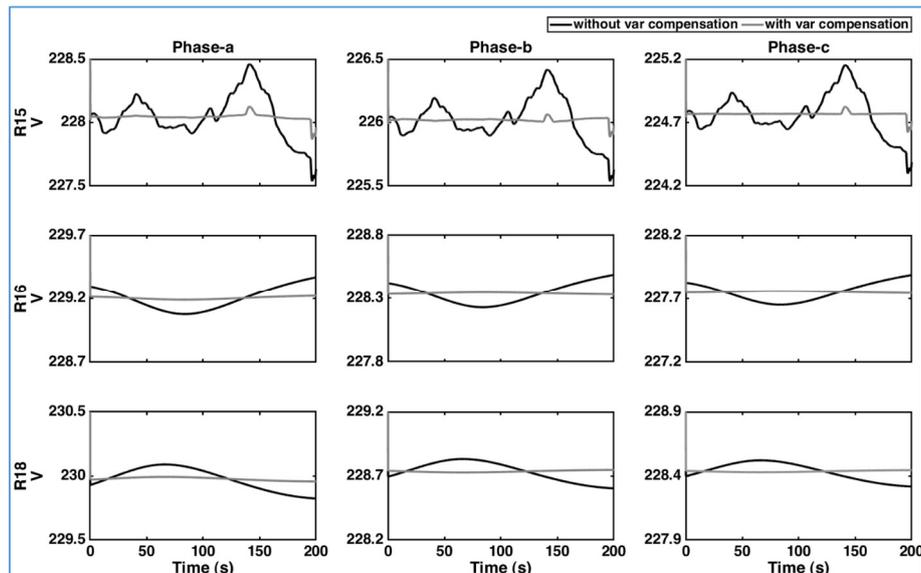


Adicionalmente, algunas de las ideas desarrolladas en esta tarea del proyecto se pueden extender más allá del ámbito de los buques conectados a la red durante su amarre. Así, la herramienta

<sup>6</sup> Beatriz Aparicio, "Incremento de la generación eólica admisible en el sistema eléctrico de Tenerife mediante la participación en el control potencia-frecuencia de buques conectados a la red", Trabajo Final de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Nov. 2018. Disponible en: <http://oa.upm.es/53765/>

<sup>7</sup> Andrea Minguijón, "Estudio sobre el incremento de la generación fotovoltaica admisible en el sistema eléctrico de Tenerife mediante la participación en el control potencia-frecuencia de buques conectados a la red", Trabajo Final de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Sep. 2019. Disponible en: <http://oa.upm.es/56675/>

desarrollada en el cuarto trabajo <sup>4</sup> se ha aplicado al análisis del impacto de la conexión de sistemas de generación eléctrica undimotriz sobre las tensiones del sistema eléctrico, cuyos resultados se han publicado en la revista *Sustainability* <sup>8</sup>. Asimismo, el grupo de investigación ha trabajado con dicha herramienta y con la estrategia de control propuesta en el segundo trabajo <sup>2</sup> para extender los resultados de esta tarea del proyecto a una situación análoga, la conexión de vehículos eléctricos a la red para la recarga de sus baterías, habiendo publicado los resultados en un capítulo de libro <sup>9</sup>. La figura siguiente ilustra cómo la compensación de potencia reactiva por parte del convertidor de conexión del buque puede mitigar las variaciones de tensión y mitigar los desequilibrios entre fases en distintos nudos próximos al punto de conexión.



## 6. Conclusiones más relevantes

Como resumen, las conclusiones generales obtenidas con la tarea 2.2.1 son las siguientes:

- En cuanto a las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, se confirma que el suministro eléctrico a buques durante su amarre supone una importante reducción neta (reducción de emisiones en buques menos incremento de emisiones en centrales eléctricas).
- En cuanto a la estabilidad de frecuencia del sistema eléctrico al que se conectan los buques durante su amarre:
  - Un control adecuado de la conexión contribuye a mejorar la estabilidad.
  - Cuanto mayor es la potencia del buque, mayor es su efecto estabilizador.
  - El efecto estabilizador se puede potenciar mediante estrategias de control optimizadas.

<sup>8</sup> Hugo Mendonça, Rosa M. de Castro, Sergio Martínez, David Montalbán, "Voltage Impact of a Wave Energy Converter on an Unbalanced Distribution Grid and Corrective Actions", *Sustainability*, Vol 9, no. 10, pp. 1-16, Oct. 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su9101844>

<sup>9</sup> Sergio Martínez, Hugo Mendonça, Rosa M. de Castro, Danny Ochoa, "Chapter 10. Contribution of electric vehicles to power system ancillary services beyond distributed energy storage", en "ICT for Electric Vehicle Integration with the Smart Grid", IET, The Institution of Engineering and Technology, Stevenage (Reino Unido), Dic. 2019. Disponible en: [https://doi.org/10.1049/PBTR016E\\_ch10](https://doi.org/10.1049/PBTR016E_ch10)

- En cuanto a la integración de la generación eléctrica eólica y solar fotovoltaica, la participación de los buques en el control primario de frecuencia permite un mayor nivel de penetración de la generación renovable en el sistema de energía eléctrica.
- En cuanto al control de la tensión, la participación de los buques puede contribuir de forma local al mismo y a la compensación de desequilibrios.

## **7. Recomendación final**

A la vista de las conclusiones anteriores, se recomienda que los operadores de los sistemas eléctricos fomenten de alguna manera la prestación de los servicios complementarios de red que pueden ofrecer los buques conectados durante su amarre.

Madrid, abril de 2021