



Ignacio Egido Cortés

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Pontificia Comillas. Profesor Colaborador Asistente del ICAI.



Luis Rouco Rodríguez

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Profesor Propio Ordinario del ICAI.



Javier Alonso Perez

Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla y Licenciado en Económicas por la UNED. Subdirector de Mercados de Contado y Operación de Endesa.



Eloisa Porras Muñoz

Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Subdirección de Mercados de Contado y Operación de Endesa.



José Luis Ruiz Mendoza

Ingeniero Técnico Industrial en Electricidad por la Universidad Politécnica de Madrid. Subdirección de Mercados de Contado y Operación de Endesa.



Impacto en regulación frecuencia-potencia de los cambios de programa en escalón de las unidades generadoras

Palabras clave: Regulación secundaria, AGC, desvío de frecuencia, programa de generación.

Key words: Secondary regulation, AGC, frequency deviation, unit scheduling.

Resumen:

El establecimiento de los mercados de energía eléctrica ha afectado a la calidad de la regulación de frecuencia. En particular, las elevadas desviaciones de frecuencia se asocian a los cambios de programa horario en forma de escalón. Este artículo analiza desde un punto de vista estadístico la relación entre las variaciones de frecuencia y los cambios de programa horarios en escalón de las unidades de generación, y determina el impacto que tendría el cambio de programa en rampa sobre la potencia y la energía secundaria de regulación. Se ha obtenido que el cambio de programa en rampa de las unidades de generación bajo programa reduciría considerablemente los esfuerzos requeridos a la regulación secundaria. Hace casi 25 años, tras las primeras experiencias de funcionamiento de la RCP, dicha práctica ya fue implantada con resultados muy satisfactorios.

Abstract:

The implementation of electricity markets has affected the quality of frequency regulation. More specifically, big frequency deviations are associated to hourly step-wise generating unit programs. This paper has investigated using statistical techniques the relationship between frequency deviation and the generating unit hourly programs. It has also determined the benefits from implementing ramp-wise generating unit programs. It has found that ramp-wise generating unit programs would result in great reduction of the secondary regulation requirements. Moreover, such approach was implemented successfully in the Spanish secondary regulation system 25 years ago.

Introducción

Diversas organizaciones internacionales encargadas de la fiabilidad y calidad de funcionamiento de grandes sistemas interconectados, como la UCTE [1], el Nordel [2] y el NERC [3], han expresado su preocupación por la calidad de la regulación de frecuencia tras el establecimiento de los mercados de energía eléctrica. En particular, se asocian las elevadas excursiones de frecuencia con ciertos mecanismos de los mercados eléctricos como son los cambios de programa horarios de las unidades de generación en forma de escalón [4].

La corrección de las elevadas excursiones de frecuencia requiere movilizar elevados recursos de regulación secundaria. Por supuesto, la puesta en juego de dichos recursos lleva asociada elevados costes para los sistemas.

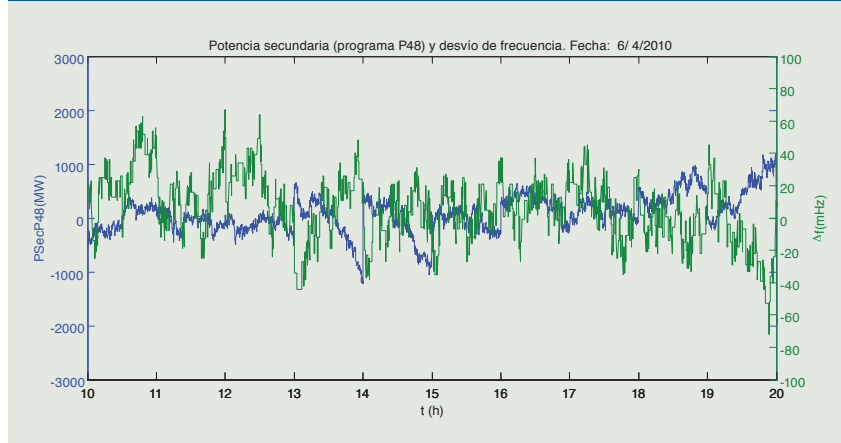
El trabajo documentado en este informe ha analizado la relación entre las variaciones de frecuencia y los cambios de programa horarios en escalón de las unidades de generación. Más aún, ha determinado el impacto que tendría el cambio de programa en rampa sobre la potencia y la energía secundaria de regulación.

Este trabajo se ha basado en el análisis de información obtenida del sistema ESIOS de Red Eléctrica de España (por ejemplo, el programa P48) y de registros proporcionados por Endesa (por ejemplo, la demanda total y la frecuencia).

Dada la imposibilidad de desarrollar modelos de simulación que reflejen con precisión los muy diversos aspectos que determinan el comportamiento de sistema (la frecuencia es resultado del comportamiento tanto de la generación bajo programa como de la generación bajo regulación a lo largo y ancho del sistema europeo), el método de trabajo utilizado en este estudio ha estado basado en diversas técnicas estadísticas de análisis de datos.

Merece la pena resaltar que el programa P48 disponible en el sistema ESIOS de Red Eléctrica de España [5] debe considerarse un mero indicativo de las necesidades de regulación secundaria, ya que parece que incorpora

Figura 1: Potencia secundaria para programa P48 y desvío de frecuencia correspondientes al día 6/4/2010: ampliación de las horas de la 10 a la 20



“ajustes” sobre el programa P48 tal como queda cerrado para los agentes del mercado.

En los apartados que siguen se resumen las conclusiones extraídas tras estudiar, de una parte, las variaciones de frecuencia y cambios de programa horarios y, de otra parte, la potencia y energía secundaria en caso de cambios de programa horarios en escalón y en rampa.

Variaciones de frecuencia y cambios de programa horarios

La variación de la frecuencia de un sistema eléctrico es resultado de la aparición de desequilibrios entre generación y demanda. Pese a que la demanda experimenta una variación continua en el tiempo, dicha variación es “suave” durante la inmensa mayoría del tiempo. Por el contrario, la generación experimenta más frecuentes variaciones “bruscas” debido a muy variados comportamientos, deseados e indeseados, tanto de la generación bajo programa como de la generación bajo regulación.

Una perturbación significativa intencionada en la generación bajo programa, que puede dar lugar a significativas excursiones de la frecuencia, es el cambio horario en forma de escalón. Si bien, el cambio de programa horario en escalón es intencionado, la forma precisa en que las unidades de generación bajo programa siguen ese cambio de programa se puede considerar como no intencionada.

A partir de la diferencia entre demanda (generación bajo control) y programa de generación se puede obtener una variable (que se ha denominado potencia secundaria) que debiera estar relacionada con la variación de frecuencia. Se analiza un periodo de 10 horas de un día (el día 6/4/2010). La Figura 1 muestra conjuntamente la variación de frecuencia y la potencia secundaria. Se encuentran periodos horarios en los que claramente la variación de la potencia secundaria tiene signo contrario al de la variación de la frecuencia: por ejemplo, entre las 13 y 14 horas y entre 19 y 20 horas. Por el contrario, otros periodos no muestran con claridad tal comportamiento (por ejemplo, entre 11 y 12 horas y entre 15 y 16 horas).

Se plantea, por tanto, no sólo estudiar un periodo específico, sino analizar estadísticamente gran número de periodos de tiempo de 10 minutos alrededor del cambio horario (−5min,+5min). Un método que ofrece grandes posibilidades es el agrupamiento en clases similares, o *clustering*, (ver [6] ó [7] para tener más detalles). La Figura 2 muestra los resultados de dicho tratamiento. Se han encontrados cinco clases o *clusters* que representan la variación de frecuencia en el cambio de hora. En todas las clases se aprecia un cambio claro de la frecuencia en el cambio de hora.

Es interesante analizar si semejante comportamiento se produce en otros momentos significativos de los

periodos horarios (15, 30, 45 minutos). La Figura 3 muestra las clases representativas de dichos momentos significativos junto con el comienzo de la hora (0 minutos). Se aprecia

claramente que en las clases de momentos intermedios de la hora no se aprecia el patrón de cambio de frecuencia que se aprecia en el momento de comienzo de la hora.

En consecuencia, el análisis estadístico realizado pone de manifiesto que en el cambio de la hora se produce un evento que da lugar a una variación de frecuencia que no tiene lugar en otros

Figura 2: Representación de cada uno de los cinco clusters obtenidos por separado. Se incluyen todas las señales de frecuencia pertenecientes al cluster y el representante del cluster

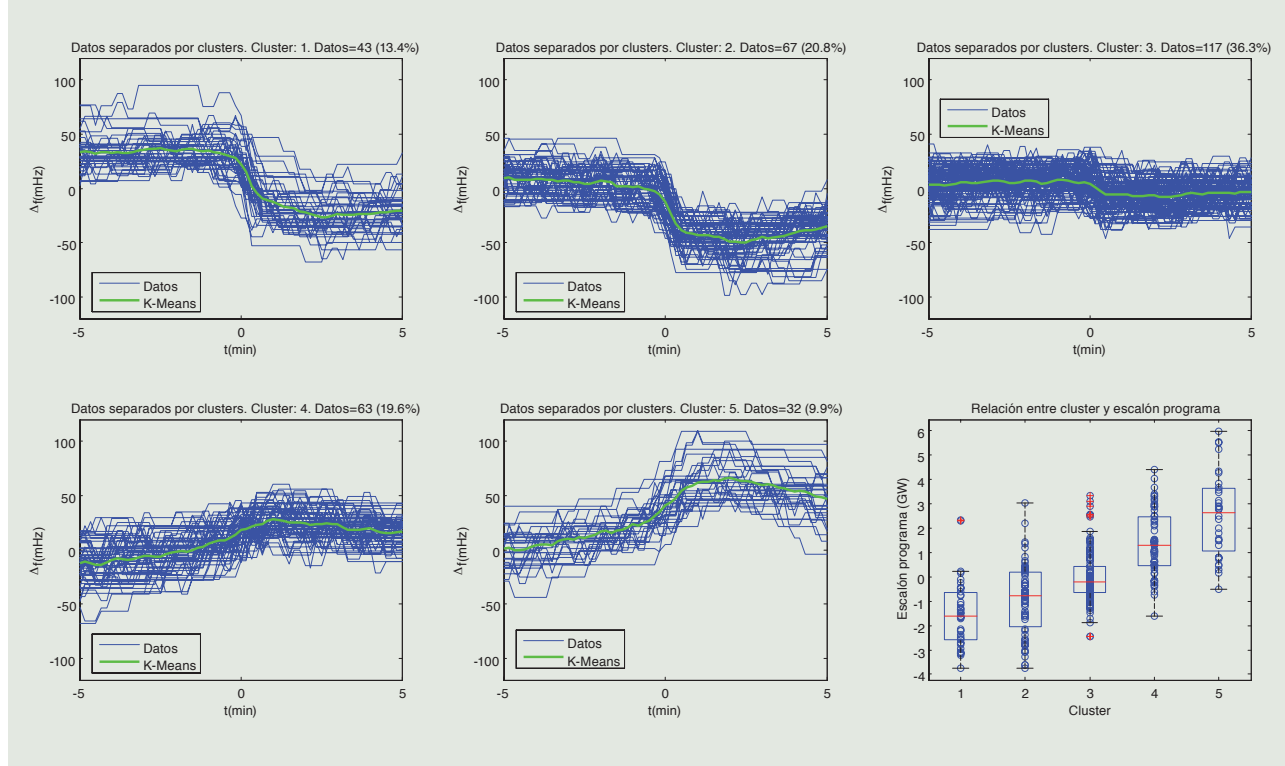
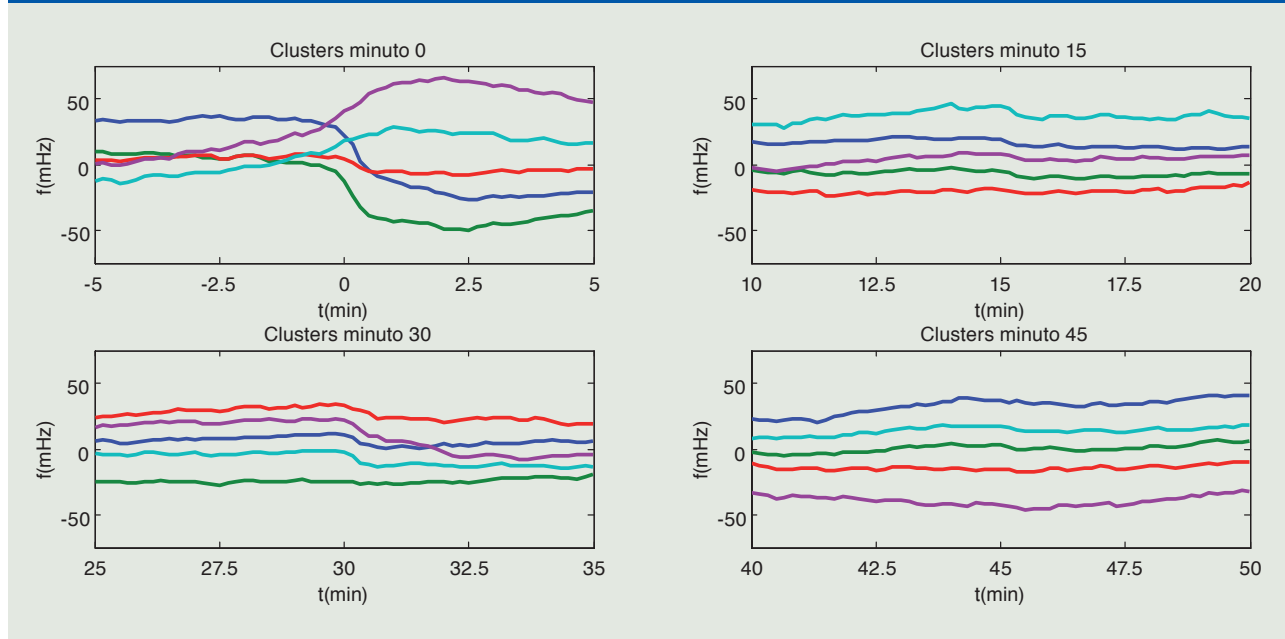


Figura 3: Clusters obtenidos para la frecuencia en cada uno de los intervalos de 10 minutos analizados, centrados en el cambio de hora y en los minutos 15, 30 y 45 de la hora



momentos de la hora (15, 30 ó 45 minutos). El único evento que ocurre regularmente en el cambio de la hora es el cambio del programa horario de las unidades de generación en forma de escalón.

También se ha confirmado la correlación entre magnitud y sentido de la excursión de frecuencia y del escalón de potencia secundaria. En la última gráfica de la Figura 2 se han representado, para cada *cluster* de frecuencia, los valores de cambio de programa junto con un diagrama de cajas y patillas de los datos correspondientes.

Debe notarse que los efectos del cambio de programa horario de las unidades de generación en forma de escalón dependen de la tecnología de las unidades de generación bajo programa: mientras que una central térmica de carbón tiene una rampa típica de 5 MW/minuto, una central térmica de ciclo combinado 2x1 puede llegar a tener una rampa total de 30 MW/minuto. Por tanto, si la regulación económica incentiva la minimización de los desvíos con relación al programa y la mayoría de las unidades bajo programa es rápida, el cambio de programa horario resultará en excursiones significativas de frecuencia. En este sentido, la presencia de unidades más lentas en el conjunto de las unidades bajo programa resultaba, paradójicamente, más beneficioso que perjudicial al ser menor la perturbación introducida por el cambio de programa en escalón.

Este problema, sin embargo, no es nuevo. REE revisa en [8] (Anexo I, página 3) la evolución histórica de la Regulación Compartida Peninsular, RCP, (el sistema de regulación secundaria del sistema peninsular español) y resalta entre otras mejoras introducidas el "Establecimiento de los intercambios programados de zona y los programas de generación según rampas continuas de duración horaria en lugar de la evolución anterior en escalones de 10 minutos y resto de hora de valor constante. De esta forma se disminuía drásticamente la necesidad de reservas y su utilización innecesaria".

Potencia secundaria en caso de cambios de programa horarios en escalón y en rampa

Se aborda ahora el impacto sobre la potencia y energía secundaria de que los cambios de programa horario sean en rampa en lugar de escalón. Esta propuesta, aunque no exenta de dificultades de materialización en un entorno de mercado, debe entenderse como la recuperación de prácticas ya ensayadas con éxito hace muchos años en la RCP.

Se va a utilizar el algoritmo de cambio de programa en rampa propuesto por Red Eléctrica de España en [9]. La Figura 4 ilustra la conversión del pro-

grama en forma de escalón del día 6/4/2010 al programa en forma de rampa.

Se aborda, en primer lugar, el análisis del impacto del cambio de programa en rampa en lugar del cambio de programa en escalón en la potencia secundaria. La intuición indica que la potencia secundaria será menor si el programa cambia en rampa en lugar de en escalón. La Figura 5 compara la potencia secundaria calculada a partir del programa para programa en escalón y programa en rampa para el caso ejemplo del día 15/12/2010. En efecto, la potencia secundaria es menor cuando el programa cambia en rampa, confirmando la intuición señalada an-

Figura 4: Conversión del programa en escalones a programa en rampas correspondiente al día 6/4/2010

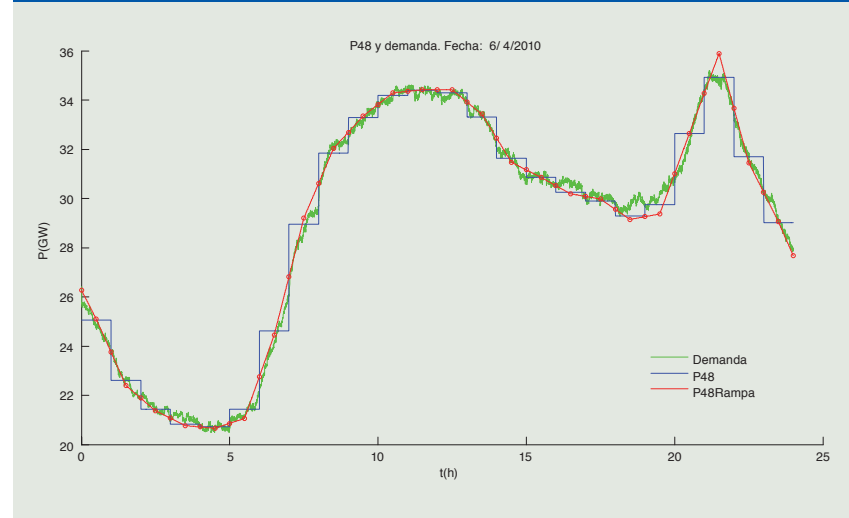
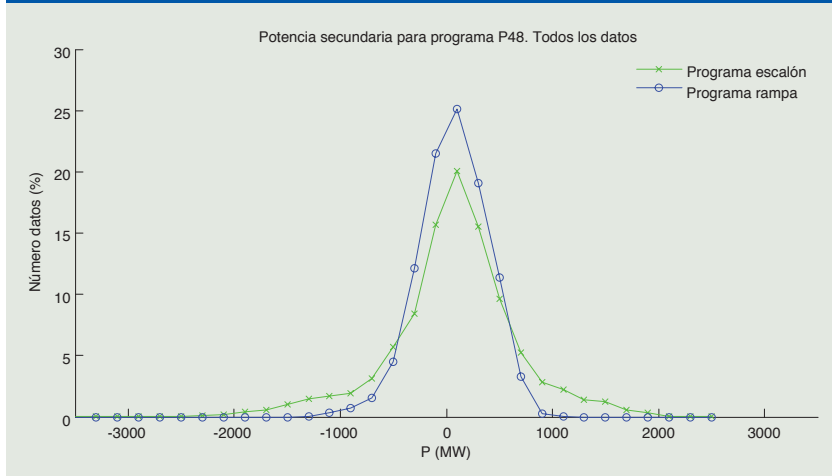


Figura 5: Comparación de la potencia secundaria para programa P48 en escalón y programa P48 en rampa correspondiente al día 15/12/2010



Figura 6: Distribución de la potencia secundaria con programa P48 en escalón y programa P48 en rampa correspondiente para todos los datos disponibles



teriormente.

Al igual que se hizo con las variaciones de frecuencia, se propone un análisis estadístico de la potencia secundaria en cuando el programa cambia en rampa o en escalón. La Figura 6 muestra los histogramas de la potencia secundaria tanto con cambio del programa en rampa como con cambio de programas en escalón. Ambos histogramas están centrados en el origen. Con cambio de programa en rampa hay más instantes con potencia secundaria pequeña que con cambio de programa en escalón. Por el contrario, con cambio de programa en escalón hay más instantes con potencia secundaria elevada que con cambio de programa en rampa.

Como se observa en la Figura 6, tanto para el programa en escalón como para el programa en rampa aparecen valores de potencia secundaria bastante grandes, que superan la banda de regulación a subir y bajar asignada habitualmente en el sistema. Debido a la distribución obtenida para la potencia secundaria, esto ocurre en mayor medida para el programa en escalón que para el programa en rampa. En estos casos, la potencia necesaria no puede ser generada por los grupos en regulación secundaria dentro de su banda asignada, sino que debe ser generada de otro modo. Por ejemplo, a través de la asignación de banda secundaria adicional a algunos grupos, asignan-

do potencia de regulación terciaria o potencia a través de la gestión de desvíos.

En este punto es interesante comentar que la potencia secundaria requerida por el sistema puede superar en ciertos momentos la banda de regulación disponible. Ello requiere un esfuerzo de regulación adicional y, por supuesto, una compensación económica adicional. En la Figura 7 se ha representado la potencia secundaria calculada para el día 15/12/2010 entre las 10h y las 20h tanto para el programa en escalón como para el programa en rampa y, también, la banda de regulación a subir y bajar asignada ese día para cada hora. Se observa que tanto la potencia secundaria correspondiente al programa

en rampa como al programa en escalón superan en algunos instantes la banda de regulación asignada. Sin embargo, esto ocurre con mayor frecuencia y la banda se supera en mayor medida en el caso de programa en escalón.

Energía secundaria en caso de cambios de programa horarios en escalón y en rampa

La energía secundaria calculada como diferencia entre la demanda y el programa es igual tanto con programas en escalón como con programas en rampa, ya que los programas en rampa se calculan para que la energía total en la hora coincida con la del programa en escalón.

Se ha analizado si la energía secundaria calculada como diferencia entre demanda y programa es una buena medida de la energía secundaria que se liquida tras la operación real de la regulación secundaria. La energía secundaria en la liquidación se calcula en cada hora como la energía a subir más la energía a bajar, ya que en algunas horas hay energía en los dos sentidos.

La Figura 8 compara la energía de la liquidación, la energía calculada para el programa en escalón y la energía calculada para el programa en rampa en el día 15/12/2010. La tendencia es que ambas energías se parezcan, aunque claramente no coinciden. La energía calculada con el programa en escalón

Figura 7: Potencia secundaria para programa en escalón y en rampa y banda de regulación asignada. Datos para el día 15/12/2010



Figura 8: Comparación de la energía secundaria para programa P48 en escalón y programa P48 en rampa correspondiente al día 15/12/2010 y la energía secundaria liquidada



trar con la banda asignada a la regulación secundaria para diferentes valores de banda de regulación asignada y se muestran en la Figura 10. Los resultados muestran que cuanto mayor es la potencia secundaria en el caso de programación en escalón, mayor es la energía que no puede suministrar la regulación secundaria con su banda casada. Por supuesto, la energía correspondiente a la potencia que no puede suministrar la regulación secundaria con su banda asignada es menor cuando el programa es en rampa que cuando el programa es en escalón. La reducción total (subir más bajar) obtenida para una banda de regulación típica de 700 MW a subir y 500 MW a bajar, implica pasar de 90 MWh (cambio en escalón) a 15 MWh

y en rampa son iguales por la razón expuesta previamente.

Para comprobar la relación entre la energía secundaria de la liquidación y la energía secundaria calculada a partir de la demanda y el programa se ha representado en una gráfica la primera en función de la segunda. La Figura 9 presenta los resultados obtenidos para todos los datos disponibles. Se ajusta un polinomio de primer orden a los datos calculados. Se observa que hay una correlación positiva entre ambas energías. La pendiente debería ser igual a 1, pero resulta ser algo mayor (1.11). La recta debería pasar por el punto (0, 0), pero para 0 MWh de energía calculada la recta predice una energía en el histórico de -85 MWh, por lo que la energía en el histórico (suma de energía a subir y bajar) tiende a ser menor que la energía correspondiente a la diferencia entre generación y demanda. Que la energía secundaria calculada no coincida con la energía secundaria liquidada indica las limitaciones de la utilización del programa como fuente de datos para determinar la potencia secundaria y por tanto la energía secundaria.

También se ha intentado evaluar la energía correspondiente a la potencia que no puede suministrar la regulación secundaria con su banda asignada. Para ello, se ha calculado la energía media en una hora (a subir y bajar de forma separada) que no es posible suminis-

Figura 9: Relación entre la energía secundaria de la liquidación y la energía secundaria calculada a partir de la demanda y el programa P48 para todos los datos disponibles

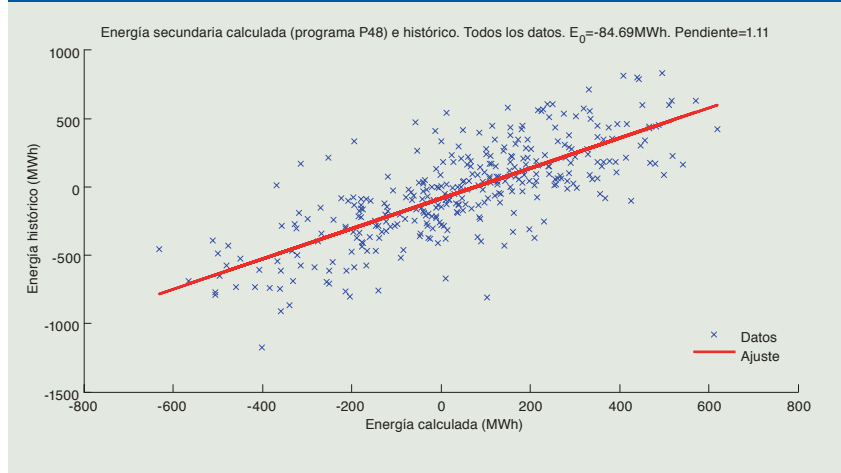
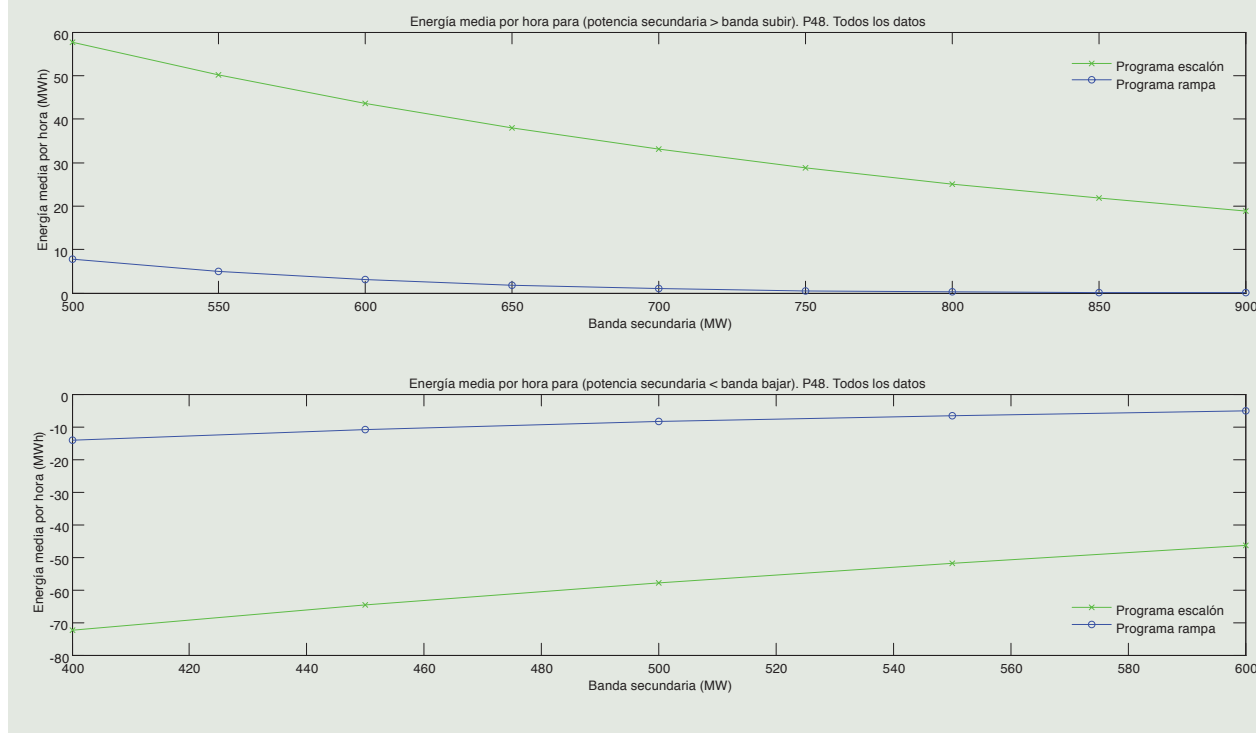


Figura 10: Energía media por hora que no es posible suministrar por la regulación secundaria con su banda asignada. Resultados para todos los datos disponibles



(cambio en rampa), es decir, una reducción aproximada de un 83%. Si se supone que esta energía se suministrará por las zonas mediante banda de regulación adicional, cuyo precio es un 50% mayor que el precio de la banda, y se utiliza como precio de la banda 14.75 €/MWh, el precio medio en el año 2010, se obtiene una reducción en el coste asociado a esta banda adicional de aproximadamente 14,5 millones de euros.

Conclusiones

El análisis estadístico de las variaciones de frecuencia ha confirmado que se producen excursiones de frecuencia significativas en el cambio de hora y que estas excursiones no tienen lugar en otros momentos singulares de la hora (15, 30 y 45 minutos). Además, el signo y magnitud de las excursiones de frecuencia está correlado con el signo y magnitud de los cambios de programa. La única perturbación regular que se produce en el sistema es el cambio de programa de las unidades de generación que no están bajo regulación. La presencia, cada vez más frecuente, de unidades rápidas (centrales térmicas de ciclo combinado)

resultará en excusiones de frecuencia cada vez más grandes.

Como quiera que la frecuencia es resultado del comportamiento del sistema europeo en su conjunto, cualquier acción correctora debe implantarse a lo largo y ancho del mismo para que sea efectiva.

El cambio de programa en escalón de las unidades de generación bajo programa implantado en los mercados eléctricos exige a la regulación secundaria considerables esfuerzos en términos de la potencia secundaria. Es muy frecuente que la potencia secundaria supere la banda asignada. Este hecho lleva asociado un sobrecoste que se prevé que se reducirá en un 80 % (14,5 millones de euros) si se cambia de programa en escalón a programa en rampa.

El cambio de programa en rampa de las unidades de generación bajo programa reduciría considerablemente los esfuerzos requeridos a la regulación secundaria. Hace casi 25 años, tras las primeras experiencias de funcionamiento de la RCP, dicha práctica fue implantada con resultados muy satisfactorios. ■

Bibliografía

- [1] UCTE Ad-Hoc Group, "Frequency Quality Investigation Excerpt of the Final Report", disponible en https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/ce/otherreports/090330_UCTE_FrequencyInvestigationReport_Abstract.pdf.
- [2] G. Nilssen, "Planned actions to remedy the weakening Nordic frequency quality", Statnett, Dokument ID, 1438187, Date: 15.06.2010.
- [3] NERC Frequency Excursions Task Force, "22:00 Frequency Excursions", 25 June 2002.
- [4] T. Weißbach, E. Welfonder, "High Frequency Deviations Within the European Power System – Origins and Proposals for Improvement", *Electra*, February 2009, pp. 9-15.
- [5] Red Eléctrica de España, "Sistema ESIOs", <http://www.esios.ree.es>.
- [6] D. Hand, H. Mannila, and P. Smyth, "Principles of Data Mining", MIT Press, Boston (MA, USA), 2001.
- [7] J. Abonyi, and B. Feil, "Cluster Analysis for Data Mining and System Identification", Birkhäuser, Basel, 2007.
- [8] Red Eléctrica de España, Dirección de Operación, "Propuesta de revisión del servicio de regulación secundaria", Mayo 2007.
- [9] Red Eléctrica de España, Departamento de Aplicaciones para la Programación, "Optimización de programa en rampas", Junio 2010.