

Estudio estadístico para la modelización de los precios de la electricidad del mercado mayorista español

*Cortés López, Juan Carlos, jccortes@imm.upv.es
Instituto Universitario de Matemática Multidisciplinar
Universidad Politécnica de Valencia*

*Debón Aucejo, Ana María, andeau@eio.upv.es
Centro de Gestión de la Calidad y del Cambio
Universidad Politécnica de Valencia*

*Rico Llopis, Manuel, marillo@ade.upv.es
Facultad de Administración y Dirección de Empresas
Universidad Politécnica de Valencia*

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es la modelización del comportamiento de los precios de la electricidad de los días laborables del mercado mayorista español, tratando de captar todos los elementos que los componen. Este modelo está compuesto por cuatro componentes, Tendencia, Ciclo, Estacionalidad y Componente Irregular, siguiendo el esquema de descripción Clásica de series temporales. Al estudio aquí presentado se añade un análisis estadístico de los resultados.

Palabras claves: Serie temporal; regresión no lineal; mercado electricidad español

Área temática: Métodos Estadísticos (mst).

ABSTRACT

The aim of this paper is modeling the behavior of electricity prices for working days of the Spanish wholesale market. The model tries to capture all the relevant elements that determine electricity prices. This model is based on four elements, trend, cycle, seasonality and irregularity, following the classical description about time series. In addition, we provide a statistical analysis of results.

Keywords: Time series; nonlinear regression; Spanish electricity market

1. INTRODUCCIÓN

Los mercados de electricidad de distintos países del mundo han venido experimentado un proceso de desregulación para las actividades de generación y distribución. Lo que anteriormente controlaban los reguladores fijando los precios en función de los costes del servicio, ahora se somete a las leyes competitivas del mercado, donde interactúan las fuerzas de la demanda y la oferta, resultando un comportamiento dinámico e incierto de los precios de la electricidad. Con la desregulación de la función de distribución han aparecido los mercados mayoristas de electricidad, donde acuden los distintos agentes compradores y vendedores de energía, de lo que resulta la formación de un precio de equilibrio para una determinada cantidad de energía. Entre los factores que influyen sobre la demanda de electricidad se incluyen las condiciones climáticas, la estación del año o el tipo de actividad que desempeñe el consumidor. Por otro lado, algunos de los factores que influyen sobre la oferta son la localización de los generadores, la concentración de su competencia, la estructura de transporte de energía o los procesos de formación de precios en el mercado mayorista.

España no ha sido una excepción a estos cambios en el sector eléctrico, donde el proceso desregulator, iniciado en 1999, ha resultado en la creación de un mercado mayorista de la electricidad, en el que tienen derecho a participar los agentes distribuidores de energía por el lado de la oferta, y los consumidores cualificados y las compañías comercializadoras de electricidad por el lado de la demanda. La desregulación en España alcanzó su punto máximo en el año 2003, cuando legislativamente se aprobó la libre competencia y libre formación de precios en el mercado mayorista, aunque no en la distribución minorista, que pospuso esa desregulación hasta el año 2009. Con la creación del mercado mayorista español de la electricidad se ha negociado la cantidad de energía que se suministraba al mercado para cada una de las horas de todos los días de la semana, resultando de ello 24 precios diarios en todos los días de negociación. Se ha observado que el comportamiento de estos precios ha seguido distintas fases, comenzando con una evolución imprevisible e irregular, propia de los mercados en proceso de maduración, y siguiendo con una fase de mayor regularidad, sobre todo a partir de la desregulación total del mercado, lo cual se empieza a observar en el año 2004. Este hecho se analizará en detalle posteriormente.

El objetivo del presente trabajo es la modelización del comportamiento de los precios de la electricidad de los días laborables del mercado mayorista español, tratando de captar todos los elementos que los componen. Este modelo está compuesto por cuatro componentes, Tendencia, Ciclo, Estacionalidad y Componente Irregular, siguiendo el esquema de descripción Clásica de series temporales (Shumway, 2006). Al estudio aquí presentado se añade un análisis estadístico de los resultados.

Los precios observados del mercado mayorista español de la electricidad tienen periodicidad horaria, como se ha señalado anteriormente, lo cual puede introducir distorsiones a la hora de elaborar un modelo, a causa de la presencia de datos extremos que pueden afectar a la estimación de los parámetros del mismo. Es por esta razón por lo que se han calculado los precios medios diarios, como el promedio de los precios horarios de cada día, para trabajar con el modelo. La serie de precios completa incluye los precios medios diarios desde el 1 de enero de 1999 hasta el 31 de diciembre de 2008, tal y como se muestra en el Gráfico 1.

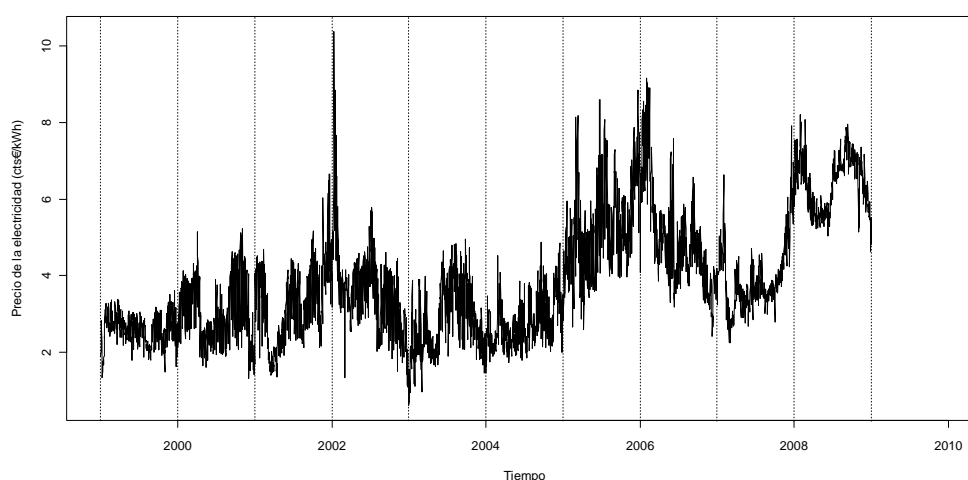


Gráfico 1: Serie de precios completa (1999-2008)

De esta serie se han extraído las cuatro componentes que, según el Modelo Clásico de descripción de series temporales, forman parte de cualquier serie temporal como es esta, Tendencia, Ciclo, Estacionalidad e Irregularidad. El primer problema que surge al tratar con esta serie de precios es que contiene varios elementos distorsionadores que pueden provocar errores en la estimación del modelo. Después de realizar varios ensayos poco satisfactorios, se ha llegado a la conclusión de que es

necesario realizar varias correcciones sobre la serie de precios con el objeto de tratar con aquellos datos que mejor recojan los elementos mencionados anteriormente. Este tratamiento se explica en el apartado 2.

2. TRATAMIENTO DE LA SERIE DE PRECIOS

Sobre la serie de precios se han realizado las correcciones que se describen en el presente epígrafe. En primer lugar, se han eliminado los precios correspondientes a los fines de semana, ya que se ha observado la existencia de una estacionalidad semanal, con una considerable caída de precios en sábado y domingo respecto a los datos de entre semana, que puede distorsionar la estimación de parámetros. Por otro lado, también se han eliminado los días festivos, que también se consideran datos anómalos porque tienen un comportamiento similar al de los fines de semana. Este hecho se explica porque la mayor demanda de electricidad se produce durante los días laborables, ya que los mayores consumidores de electricidad son las empresas, que detienen su actividad durante el fin de semana, provocando de esa manera una caída acusada de los precios durante estos días. La modelización del comportamiento de los precios del fin de semana podría realizarse con otro modelo que no es objeto del presente trabajo. Por otra parte cabe subrayar que en los datos analizados no existían datos perdidos (*missing data*).

Existen, de media, 104 días al año de fin de semana, ya que un año tiene 52 semanas. Por otro lado, según los calendarios laborales oficiales, los días festivos oficiales al año ascienden a 11 días en años no bisiestos y 12 días en años bisiestos. Así pues, se descuentan de media en cada año 115 días correspondientes a fines de semana y festivos, con lo cual, el número de días a considerar por año es 250.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el periodo que se debe seleccionar. El criterio de selección ha estado basado en que se deben observar con claridad el comportamiento regular de los precios que se pretende modelizar. Este comportamiento regular, con Tendencia, Ciclo y Estacionalidad, se observa más claramente en el periodo 2004-2008. Es por ello que la serie definitiva que se va a emplear para la modelización contiene 250 días por año durante 5 años, es decir, 1250 datos. Esta decisión a su vez está avalada por la opiniones emitidas por expertos que consideran que antes de dicho

período el mercado de electricidad en España estaba en proceso de maduración (Lucía, 2005).

A su vez, la serie de precios de la electricidad presenta puntos extremos (*outliers*) representados por fuertes *spikes* (picos en la terminología anglosajona) hacia arriba y hacia abajo. Estos picos pueden influir de manera determinante en el análisis de la tendencia y de la estacionalidad de las series temporales que definen los precios y que se desea modelizar. Por ello, es conveniente eliminar estos *outliers* antes de proceder a estimar los parámetros del modelo.

Para detectar los *outliers* se calculan el cuartil inferior (Q_1) y superior (Q_3) y el rango intercuartílico (IQR) para la serie de precios y se considera que una observación es un *outlier* si ésta queda fuera del intervalo determinado por $[Q_1 - 1.5 \times \text{IQR}, Q_3 + 1.5 \times \text{IQR}]$. En el caso concreto de la serie empleada, el rango resultante es $[1.81, 9.17]^1$. De la serie de precios se eliminan los *outliers* y se sustituyen por la media aritmética de sus valores anterior y posterior, tal y como se debería proceder en caso de existencia de *missing data*. En el caso de la serie de precios seleccionada no existen precios *outliers* después de eliminar los fines de semana y los festivos, por lo que no ha sido necesario sustituir ningún valor tal y como se ha detallado. La serie resultante se representa en el Gráfico 2.

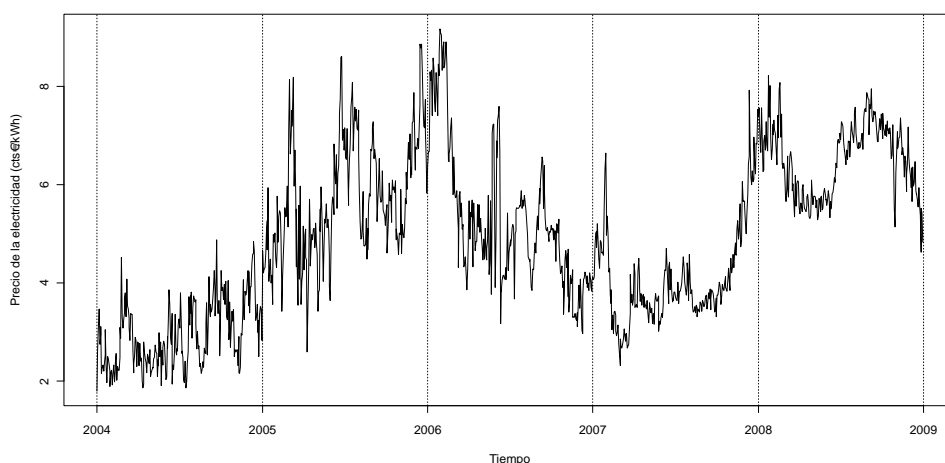


Gráfico 2: Serie de precios medios diarios laborables del periodo 2004-2008

¹ Los límites inferior y superior del intervalo que se muestra coinciden con los valores mínimo y máximo de la serie porque los límites calculados según el criterio mencionado excedían, en módulo, estos valores. El intervalo calculado es el $[-0.19, 9.95]$. Por esta razón no existen *outliers*.

3. AJUSTE DEL MODELO A LOS PRECIOS OBSERVADOS

El Modelo de precios que se propone es el que se muestra en la Ecuación (1), en la que se representan las cuatro componentes mencionadas anteriormente:

$$P(t) = P_{TC}(t) + P_E(t) + I(t). \quad (1)$$

Se ha partido de un modelo para la tendencia $T(t)$ y el ciclo $C(t)$, denotado como $P_{TC}(t)$, basado en una función lineal y una curva trigonométrica (vía la función coseno), respectivamente (Franco, 2000). Las razones que justifican esta decisión son la sencillez de la función coseno y su fácil interpretación, además de que la tendencia se modeliza de forma adecuada con una función lineal creciente. La frecuencia seleccionada para el coseno ha sido de 750 días (3 años), ya que el ciclo observado en el período considerado tiene esta duración. Por todo ello, el modelo de precios basado en el modelo de Fourier con un armónico y una componente lineal y del cual se parte como primera propuesta, es el que se muestra en la Ecuación (4), sumando las dos componentes detalladas en las Ecuaciones (2) y (3), correspondientes a las componentes Tendencia y Ciclo respectivamente.

$$T(t) = b_0 + b_1 \cdot t, \quad (2)$$

$$C(t) = b_2 \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (t - b_3)}{750} \right], \quad (3)$$

$$P_{TC}(t) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (t - b_3)}{750} \right], \quad (4)$$

La Ecuación (4) será denominada Modelo Tendencia-Ciclo, los parámetros del cual tienen el siguiente significado:

- $P_{TC}(t)$ denota el precio de la electricidad en el día t en cts €/kWh.
- t representa los días transcurridos desde el 1 de enero de 2004.
- b_0 representa la parte fija o autónoma del precio en cts €/kWh.
- b_1 puede interpretarse como la tendencia o *drift* del precio en cts €/kWh.
- b_2 representa la amplitud de la función coseno, medida en cts €/kWh. Proporciona una medida de las oscilaciones cíclicas en el precio.
- b_3 denota el desfase del coseno con respecto al 1 de enero de 2004 en días.

Para determinar el Modelo Tendencia-Ciclo, los parámetros que se deben calcular son b_0 , b_1 , b_2 y b_3 . Todos los parámetros se calculan mediante el ajuste trigonométrico propuesto. Este modelo se debe ajustar a la serie de precios diarios corregida, es decir, sin los fines de

semana, sin los festivos y habiendo eliminado y sustituido los *outliers*, tal y como se ha dicho anteriormente.

El primer ajuste se realiza con el programa R empleando la función *nls*, que sirve, en este caso, para ajustar la función trigonométrica propuesta a la serie de precios. Para ello, se introducen todos los precios observados y corregidos de todos los efectos distorsionadores (fines de semana, festivos y *outliers*). Posteriormente, se busca un punto inicial para el ajuste del modelo dado en la Ecuación (4) a las observaciones de los precios conocidos. Los valores iniciales de b_0 y b_1 se obtienen a partir de la regresión lineal de $P(t)$ sobre t , posteriormente se ajusta el modelo suponiendo que $b_2=1$ para encontrar el valor inicial de b_3 , finalmente se toma este punto con $b_2=1$ como inicial del ajuste definitivo del modelo (4) completo.

Los valores de los parámetros obtenidos de este ajuste son los que se muestran en la Tabla 1. En ella se observa que todos los parámetros son significativamente distintos de 0, a un nivel de confianza del 95%, dado que el P-Valor correspondiente a cada parámetro es menor que el 5%.

Parámetro	Estimado	Error estándar	T-Valor	P-Valor
b_0	4.193	0.05385	77.85	< 2e-16
b_1	0.001203	0.00007487	16.07	< 2e-16
b_2	1.569	0.03677	42.68	< 2e-16
b_3	-296.3	2.983	-99.33	< 2e-16

Tabla 1: Resultados del ajuste del Modelo Tendencia-Ciclo

De la Tabla 1 se extrae que los valores de los parámetros son:

- $b_0 = 4.193$ cts €/kWh
- $b_1 = 0.001203$ cts €/kWh.
- $b_2 = 1.569$ cts €/kWh.
- $b_3 = -296.3$ días.

Si se representa el modelo Tendencia-Ciclo, se obtienen los resultados del Gráfico 3.

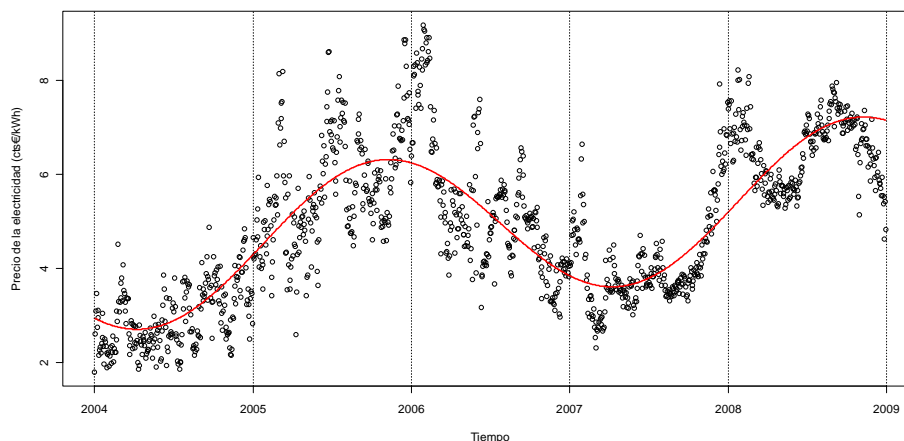


Gráfico 3: Ajuste del Modelo Tendencia-Ciclo a la serie de precios observados

El segundo ajuste se va a realizar sobre la diferencia entre los precios observados y $P_{TC}(t)$ que modeliza las dos componentes ajustadas hasta ahora, es decir, la Tendencia $T(t)$ y el Ciclo $C(t)$. Esta nueva serie, ya no tiene ni tendencia ni ciclo, como se puede observar en el Gráfico 4 y se denomina $P_E(t)$.

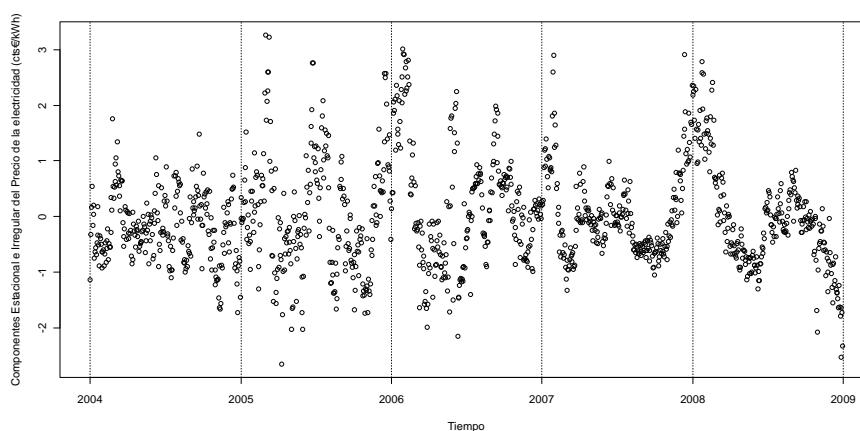


Gráfico 4: Serie de precios descontando Tendencia y Ciclo

En un primer análisis descriptivo del Gráfico 4 se pueden observar oscilaciones estacionales, es decir, de duración menor de un año. En concreto, estas oscilaciones duran aproximadamente unos seis meses (125 días). Esto admite la siguiente interpretación: los picos de precios en el mercado mayorista de la electricidad se producen a mediados del invierno y del verano, y los valles a mitad de primavera y otoño, con lo cual la duración de cada uno de esos ciclos es de seis meses. Las razones de estos picos y valles que se dan de manera regular todos los años son la mayor demanda existente tanto en invierno como en verano, en caso del primero

por el consumo de energía eléctrica para calefacción y, en el segundo, por el auge de los aparatos eléctricos de refrigeración, así como el acondicionamiento de edificios tanto para frío como para calor con sistemas eléctricos.

La expresión propuesta para modelizar la estacionalidad anual es la siguiente:

$$P_E(t) = a_1 \cdot \cos \left[\frac{2\pi(t-a_2)}{125} \right], \quad (5)$$

y se denominará Modelo Estacional. Los parámetros a_1 y a_2 de este modelo se ajustarán a los valores que resulten de descontar a los precios observados el modelo Tendencia-Ciclo. Obsérvese que en el Modelo dado en la Ecuación (5) se mantiene la función trigonométrica al igual que en el Modelo Tendencia-Ciclo, dado que recoge de forma bastante exacta las oscilaciones regulares, sólo que la frecuencia de la misma se reduce de 750 días, que era lo que duraba un ciclo, a 125 días (seis meses), que es lo que dura una estación, y es el efecto que se pretende captar con el Modelo Estacional.

Los resultados obtenidos para los parámetros del Modelo Estacional son los que se muestran en la Tabla 2.

Parámetro	Estimado	Error estándar	T-Valor	P-Valor
a_1	0.47175	0.03389	13.92	< 2e-16
a_2	18.58552	1.42939	13.00	< 2e-16

Tabla 2: Resultados del ajuste del Modelo Estacional

La representación del ajuste del Modelo Estacional a la serie descontada se puede observar en el Gráfico 5.

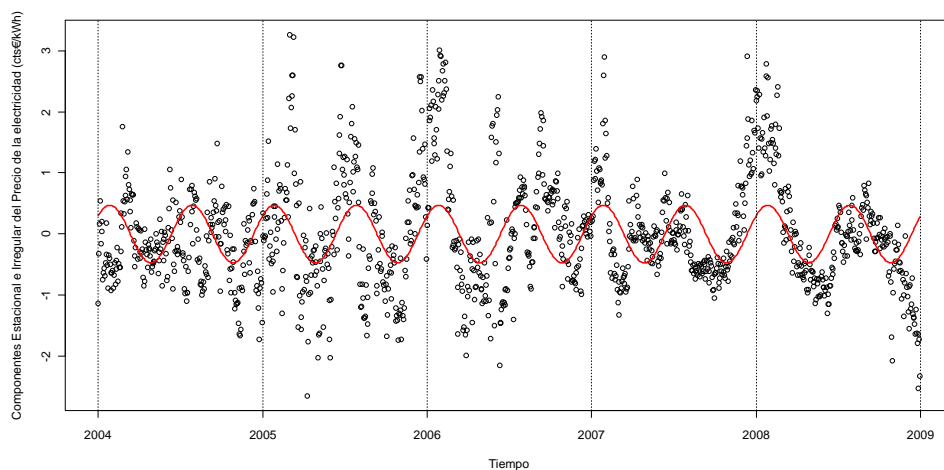


Gráfico 5: Ajuste del Modelo Estacional a la serie descontada

La última componente de la serie de precios, la componente Irregular $I(t)$, debería ser una serie estacionaria, es decir, sin tendencia ni estacionalidad, para comprobar la idoneidad del modelo ya que, por definición, la componente Irregular no sigue ningún comportamiento identificable, puesto que si lo tuviera implicaría que existe alguna variable que el modelo no recoge. Para comprobar la estacionariedad de la componente Irregular, se representan la FAS y la FAP² de la serie descontando de ella la Tendencia, el Ciclo y la Estacionalidad. Esto se muestra en el Gráfico 6.

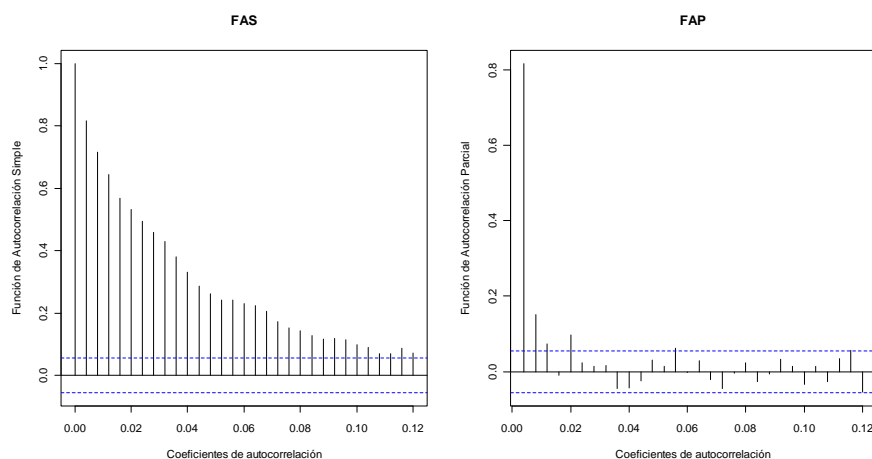


Gráfico 6: FAS y FAP de la componente Irregular

Como se puede ver en el Gráfico 6, en la FAS se produce un descenso exponencial de los coeficientes de autocorrelación, en el periodo objeto de estudio, de lo cual se puede deducir que hemos eliminado la tendencia. Sin embargo, se observa una ligera estacionalidad, ya que el decrecimiento en los coeficientes va acompañado de oscilaciones en los mismos. Por su parte, en la FAP se observan dos coeficientes claramente significativos en los primeros por lo que se puede observar la existencia de un proceso Autorregresivo de grado 2 (AR(2)).

El último paso, pues, consistirá en ajustar un modelo ARIMA para recoger este el comportamiento que siguen los residuos. Con el paquete *forecast* del programa R se puede ajustar automáticamente un modelo ARIMA con la función *auto.arima*.

El modelo ARIMA ajustado es el $(2,0,1) \times (0,1,0)_{250}$, siendo los resultados del ajuste los que se muestran en la Tabla 3, donde puede verse que todos los parámetros son significativos, ya que todos los T-valores están por encima de 2.

² Siglas correspondientes a Función de Autocorrelación Simple (FAS) y Función de Autocorrelación Parcial (FAP).

Coeficientes			
	AR (1)	AR (2)	MA (1)
Estimado	1.2048	-0.2494	-0.5673
Error estándar	0.1256	0.1106	0.1138
T-valor	9.5924	-2,2549	-4,9851

Sigma ² estimado como 0.447: log likelihood = -1052.27		
AIC = 2112.54	AICc = 2112.58	BIC = 2132.17
Medidas del error		
ME = -0.002945093	RMSE = 0.6194627	MAE = 0.4124308
MPE = -0.01803876	MAPE = 0.04877298	MASE = 1.143691

Tabla 3: Resultados del ajuste del modelo ARIMA para la componente irregular

4. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo es una parte esencial para comprobar la idoneidad del mismo para conseguir recoger el comportamiento de los precios diarios de la electricidad del mercado mayorista español. Para realizar la validación nos serviremos de dos de las herramientas habituales para ello: el Gráfico Q-Q, para comprobar la normalidad de los residuos, y el comando *tsdiag* de la librería *tseries* de R.

En el Gráfico 7 se muestra el Gráfico Q-Q. Se puede observar que los residuos muestran curvatura alejándose ligeramente de la diagonal (que sería la normalidad exacta) por lo que sugieren la aplicación de logaritmos.

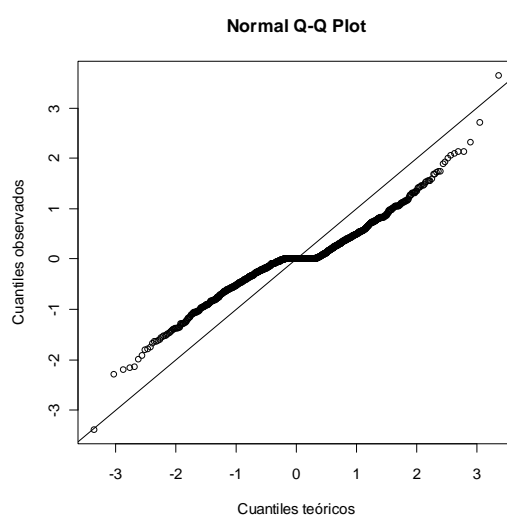


Gráfico 7: Gráfico Q-Q de normalidad de los residuos

En el Gráfico 8 se puede observar el análisis realizado con *tsdiag*. Este análisis se divide en tres gráficos, el superior de los Residuos Estandarizados (*Standardized Residuals*), el situado en el medio de la FAS de los residuos (*ACF of Residuals*) y la inferior de los p-valores para el estadístico de Ljung-Box (*p-values for Ljung-Box statistic*). En el primer gráfico se representan los residuos de la serie ARIMA. En la FAS debe observarse que los residuos no tienen autocorrelación, como así sucede, pues solo el primero de los coeficientes de autocorrelación es 1, mostrando la relación de un residuo consigo mismo. Finalmente, el test de Box-Pierce (and Ljung-Box) contrasta la hipótesis nula de la distribución aleatoria de los residuos. Esto proviene de la idea de que unos residuos de un modelo correctamente especificado se distribuyen independientemente. Como puede deducirse de la observación del tercer gráfico, el modelo puede admitirse como correctamente especificado pues los principales p-valores nos llevan a no poder rechazar la hipótesis.

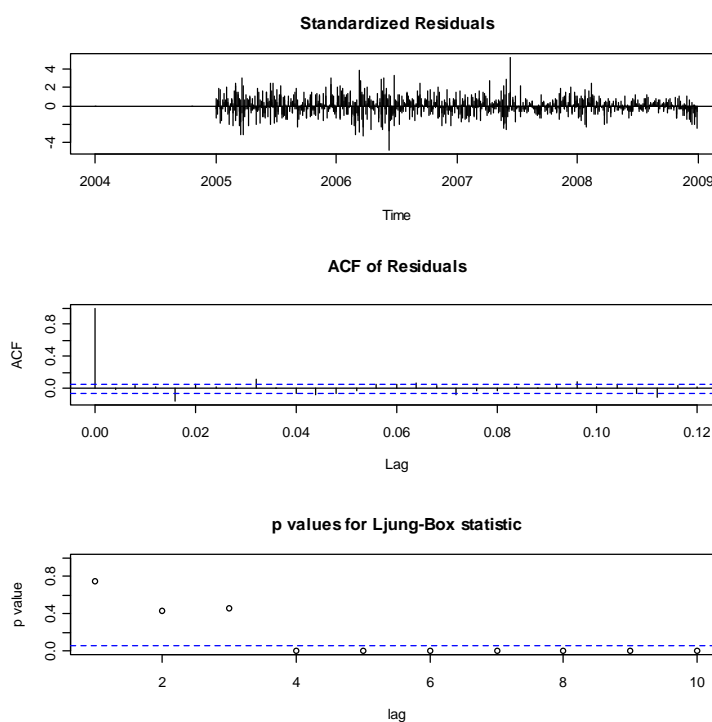


Gráfico 8: Resultados del análisis *tsdiag*

5. CONCLUSIONES

En el trabajo se ha mostrado cómo construir un modelo para los precios del mercado mayorista español de la electricidad combinando técnicas analíticas y estadísticas, recogiendo en buena medida las principales componentes que conforman los precios: la tendencia, el ciclo, la estacionalidad y la componente irregular. Sin embargo, y como se deduce de los resultados el estudio de dichas componentes debe ser objeto de un estudio más detallado que permita mejorarlas. A partir del Gráfico 7 debe explorarse si el comportamiento de los residuos mejoraría sensiblemente si se utilizaran logaritmos. En segundo lugar el modelo ARIMA ajustado a los residuos pone de relieve la existencia de estacionalidad con otros periodos que podrían ser objeto de estudio con anterioridad, explotando al máximo el comportamiento regular de la serie debido al hecho de estar en una determinada época o subperiodo interanual.

En trabajos futuros abordaremos la inclusión de un modelo mixto basado en el movimiento browniano y un proceso de Poisson compuesto. Esto está motivado por la aparición en determinados momentos del tiempo de saltos extremos tal y como se observa en la primera figura del Gráfico 8.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FRANCO UGIDOS, P. (2000). “Análisis y Desarrollo de productos financieros derivados asociados a Índices del Mercado Mayorista español de energía eléctrica”. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas.
- SHUMWAY, R.H. y STOFFER, D.S. (2006). “Time Series Analysis and its Applications with R Examples”. Springer, New York.
- LUCÍA LÓPEZ, J. y MENEU FERRER, V. (2005). “Los precios en los mercados reestructurados de la electricidad: algunas lecciones básicas para la negociación derivada”. Departamento de Economía Financiera, Universidad de Valencia.
- BENTH F.E., BENTH J.S., KOEKEBAKKER, S (2008). “Stochastic Modelling of Electricity and Related Markets”. World Scientific.