

Validación estadística y criterios a considerar en la obtención de los modelos que representan la línea base de consumo de gas natural en Hospitales

J. San José Alonso¹, L. Platón¹, R. Mata Crespo¹, A. Guijarro Rubio² y M.A. Martínez Cabero³.

¹Escuela de Ingenierías Industriales (Universidad de Valladolid) Paseo del Cauce nº 59, 47011 Valladolid (julsan@eii.uva.es)

²Gerencia Regional de Salud de la Sanidad de Castilla y León (SACYL)

³Departamento de Ahorro y Eficiencia Energética (Ente Regional de la Energía de Castilla y León)

Resumen

Las políticas energéticas exigen mejorar la eficiencia energética del sector servicios, que en el año 2014 supuso un 10,7 % del consumo de energía primaria de España. Los Centros Sanitarios en España suponen el 6,8 % del consumo del sector servicios y en términos económicos supone un gasto cercano a los 700 millones de euros.

La mejora en la eficiencia energética de un hospital se consigue con la implementación de Medidas de Mejora de la Eficiencia Energética (MMEE). Las MMEE deben producir una reducción en el consumo de energía primaria del hospital, y dicho ahorro se debe poder cuantificar. En este sentido, el Protocolo Internacional de Medida y Verificación (IPMVP) establece cuatro opciones para su cuantificación: A) Verificación aislada de la MMEE, medición de parámetros clave. B) Verificación aislada las MMEE, medición de todos los parámetros. C) Verificación de toda la instalación y D) Simulación calibrada.

Este artículo se centra en la opción C) verificación de toda la instalación, que consiste en obtener un modelo matemático que represente la línea base de consumo de gas natural del hospital, partiendo del histórico de consumos del hospital, como estos modelos son validados estadísticamente y como se comprueba su bondad de ajuste para ser empleados en el ámbito energético mediante el cumplimiento de parámetros de calidad establecidos en el IPMVP.

- Coeficiente de determinación $R^2 > 0,75$.
- Coeficiente de variación $CV < 0,2$
- Sesgo $< 0,005\%$

Los modelos permiten, al comparar los consumos energéticos reales con los estimados, detectar posibles consumos anómalos y evaluar el impacto de las posibles MMEE.

Introducción

La Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, establece un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética dentro de la Unión a fin de asegurar la consecución del objetivo principal de eficiencia energética de un 20% de ahorro para 2020, y preparar el camino para mejoras posteriores de eficiencia energética más allá de ese año¹. Se estima que la reducción del consumo energético de la UE en un 20% puede ahorrar cerca de 50.000 millones de euros al año.

En este contexto, se establece una obligación a las administraciones públicas, de tener un papel ejemplarizante, dado que de las 160.000 camas de hospital que hay en España 105.000 pertenecen a hospitales públicos, los hospitales están obligados a mejorar su eficiencia energética².

Algunos datos sobre los hospitales Españoles se recogen a continuación. El gasto sanitario en España en el 2014 fue de 95.722 millones de €, que representa el 9,2% del PIB, de esta cantidad 39.930 millones de € fue el gasto imputado por los Hospitales.³ El consumo de energía final en España en el 2014 fue de 83.031 ktep, de los cuales 608 ktep correspondieron a los hospitales, que representa el 0,73% del total de energía final consumida, que se reparte en 256 ktep térmicos y 353 ktep eléctrico^{4,5}. Aunque es difícil determinar el coste asociado a la energía consumida por todos los hospitales, por la gran cantidad de alternativas de que dispone un hospital para sus suministros energéticos, se puede establecer que el consumo energético está sobre 700 millones de € año, sobre el gasto total imputado por los hospitales representa 1,7%^{6,7}.

Existen multitud de estudios y trabajos donde se cuantifican los ahorros que se pueden obtener por aplicación de MMEE en centros hospitalarios, como por ejemplo: enerTIC⁸ cuantifica los ahorros obtenidos con un control del consumo energético en tiempo real, para hospitales con más de mil camas en 1,1 millones de € año, para hospitales entre 250 y 1000 camas en 0,7 millones de € año y para hospitales con menor capacidad hasta 0,3 millones de € año.

a3e⁹ establece para un hospital tipo de 500 camas las acciones y costes para conseguir el ahorro, donde especifica: un ranking de acciones, el coste de la acción por m², el ahorro de la acción estimado en el porcentaje y el retorno de la inversión. (La acción de instalar calderas de

¹ DIRECTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética.

² Ministerio de Sanidad y Política Social, Sistema Nacional de Salud 2010, Anexo D. Datos y Cifras, Madrid 2011.

³ Ministerio de Sanidad, Servicios, Sociales e Igualdad. Subdirección General de Información Sanitaria e Innovación; Datos y Cifras, España; Julio de 2016.

⁴ Foro de la Industria Nuclear de España; Energía 2016, Madrid 2016.

⁵ IDEA Secretaría General, Departamento de Planificación y estudios, Informe anual de consumos energéticos. Año 2014, 7ª edición, Junio 2016.

⁶ Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Secretaría de Estado de Energía; La Energía en España 2014, Madrid 2015.

⁷ Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia; Precio del Mercado de Productos de Energía Eléctrica 2014, <https://www.cnmc>. 2016.

⁸ enerTIC, Hospitales de Andalucía ahorrarían 24,5 millones anuales si controlasen su consumo energético en tiempo real, Abril 2012.

⁹ Asociación de Empresas de Eficiencia Energética, Grupo de trabajo. Rehabilitación Energética de Edificios, Hospital; Consumo, Medidas y potenciales de ahorro en edificios. Junio 2016.

condensación supone: un coste de 3,4 €/m²; con un ahorro estimado del 30%; un ahorro anual de 149.575 € y un retorno de la inversión de 2 años.)

Cuando un hospital se implica en una mejora de la eficiencia energética debería hacerlo siguiendo una metodología, existen muchas metodologías aplicables, pero hoy día parece evidente, aplicar una metodología que permita incorporarse a un Sistema de Gestión Energética, el sistema más utilizado es la normativa UNE-EN-ISO 50001¹⁰. Esta Norma se basa en el marco de mejora continua, Planificar-Hacer-Verificar-Actuar.

Esto se concreta en:

- Planificar: Se realiza una auditoría, se determina la línea base de la energía, se determinan los indicadores del Hospital. En base a estos datos se fijan los objetivos, metas, las Medidas de Mejora de Eficiencia Energética y la política de energía de la organización.
- Hacer: Se pone los medios oportunos para poner en marcha las MMEE.
- Verificar: Supone informar de los resultados reales obtenidos por la aplicación de las MMEE, para ello se requiere: monitorear y medir. Esto permite valorar cuantitativamente los resultados obtenidos.
- Actuar: En base a los resultados obtenidos en la verificación, se fijan las acciones para la mejora continua en la eficiencia energética.

La base de este enfoque se muestra en la Figura 1¹¹.

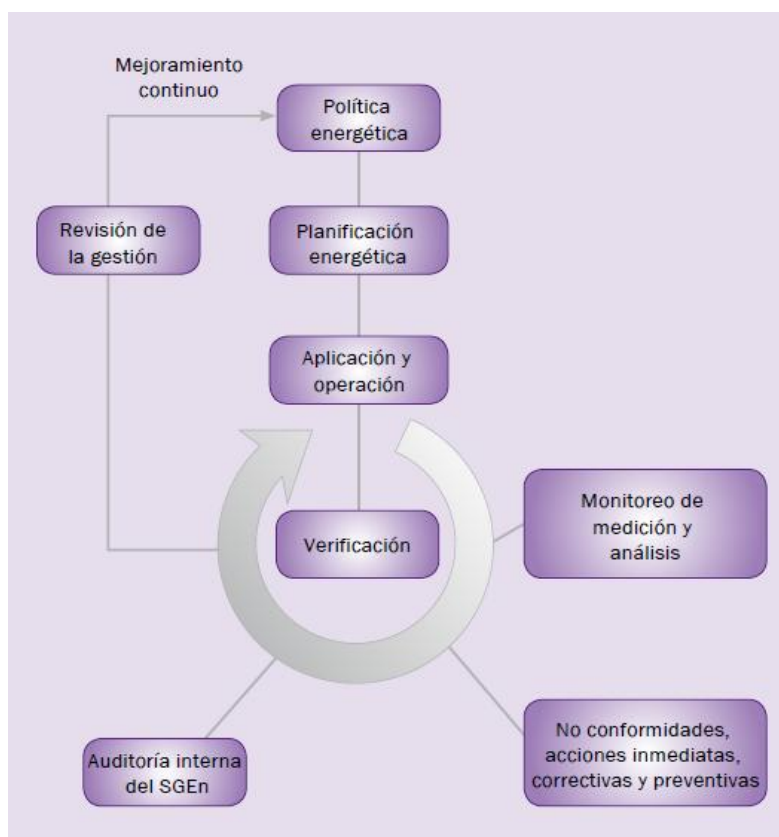


Figura 1: Modelo sistema de Gestión Energética de la UNE-EN-ISO 50001.

¹⁰ AENOR; UNE-EN ISO 50001:2011. Sistemas de Gestión de la Energía, Madrid 2011.

¹¹ ISO; Gana el desafío de la energía con la ISO-50001(gestión de la energía), Junio 2011.

En este artículo sólo se va a tratar la verificación. La verificación es la forma de cuantificar los ahorros reales obtenidos por la implementación de MMEE en una instalación de una forma fiable. Normalmente la verificación de ahorros requiere: medir y verificar los ahorros. Existen varios Protocolos Internacionales de Medida y Verificación (PIMV) entre los que se destacan los desarrollados por: EfficiencyValuationOrganization (EVO)¹², American Society of Heating, Refrigerating and Air-ConditioningEngineers (ASHRAE)¹³ y Greenhouse Gas ProtocolforPojectAccounting¹⁴. En este artículo se va a seguir el IPMVP de EVO.

Verificación

La Medida y Verificación (M&V) según EVO es “Un proceso que consiste en utilizar la medida para establecer de forma fiable el ahorro real generado en una instalación dentro de un programa de Gestión Energética.”¹⁵ El ahorro de energía no se puede obtener de una medida directa, puesto que se obtiene como diferencia de los consumos de energía de la instalación, sin MMEE y con MMEE, una vez implementada la MMEE, por lo que el consumo sin MMEE debe de ser estimado.

El protocolo IPMVP da cuatro opciones para medir los ahorros, que son aplicables según: el tipo de instalación, el funcionamiento de la instalación, las variables de que dependa el consumo, etc. Las opciones se recogen en la tabla 1:

Tabla 1: descripción general de las opciones del IPMVP.

Opción	Como se determina el Ahorro	Aplicaciones comunes
A) Verificación aislada de la MMEE: medición del parámetro clave.	Medición del consumo de energía de forma continua del periodo demostrativo.	Iluminación
B) Verificación aislada de la MMEE: medición de todos los parámetros	Medición continua o puntual del consumo de energía en el periodo demostrativo, aplicar ajuste rutinarios y no rutinarios.	Bombeos
C) Verificación de toda la instalación	Análisis del consumo de todos los equipos de acuerdo al periodo de referencia y al periodo demostrativo.	Instalaciones complejas
D) Simulación calibrada	El ahorro se determina simulando el consumo de energía en el periodo demostrativo.	Instalaciones complejas

Para realizar un proceso de M&V hay que realizar las siguientes actividades:

- Medida. La medida requiere: instalar equipos, calibrarlos y mantenerlos.
- Recogida. Los datos deben ser: recogidos, analizados, tratados y almacenados.
- Modelado. Se debe realizar un modelo que permita obtener la línea base de consumos sin MMEE y que se ajuste con la variación de las condiciones del periodo de estudio.
- Cálculos. Se trata de determinar los ahorros reales, como la diferencia entre el valor estimado por el modelo a partir de las variables explicativas del período a analizar (que describe el comportamiento de la instalación antes de la MMEE) y el valor real medido para dicho período.
- Informe. Elaboración de un informe donde se indica: los ahorros, el periodo de estudio, las condiciones de funcionamiento y las incidencias si las hubiera.

¹² www.evo-world.org.

¹³ <http://resourcecenter.ashrae.org/store/ashrae/>.

¹⁴ Ww.ghgprotocol.org.

¹⁵ EVO; PIMV, Conceptos y Opciones para Determinar el Ahorro de Energía y Agua Volumen 1, Septiembre 2010.

En este trabajo se aplica la opción C y se centra, en la determinación del modelo que permita obtener la línea base de consumo de gas de hospitales de Castilla y León.

Consumos de gas natural en los centros hospitalarios

El consumo de Gas Natural en los centros hospitalarios de Castilla y León se destina a diversos usos, tales como:

- Calefacción de espacios.
- Preparación de agua caliente sanitaria.
- Cocinas y cafeterías.
- Laboratorios.
- Preparación de vapor.
- Lavandería.
- Etc.

De los anteriores, el consumo más importante (más del 95%) es el destinado a la calefacción de espacios. Por lo tanto, el modelo que defina el consumo de Gas Natural de cada centro dependerá de las variables que influyan sobre el consumo de Gas Natural destinado a calefacción.

En el presente estudio, se ha considerado como variable explicativa los Grados día en base 20 de cada período (un mes) ya que es una variable que recoge las variaciones de las condiciones climatológicas exteriores y como variables estáticas todas aquellas que se recogen en los modelos de toma de datos de cada centro tales como: modelos de calderas, superficies, sistema de control, etc...

Es importante destacar, que los modelos son válidos siempre y cuando se mantengan las variables estáticas y que si por ejemplo un centro ampliara sus superficies de uso, se debería adaptar o rehacer su modelo para recoger la influencia de dicha variación sobre el consumo.

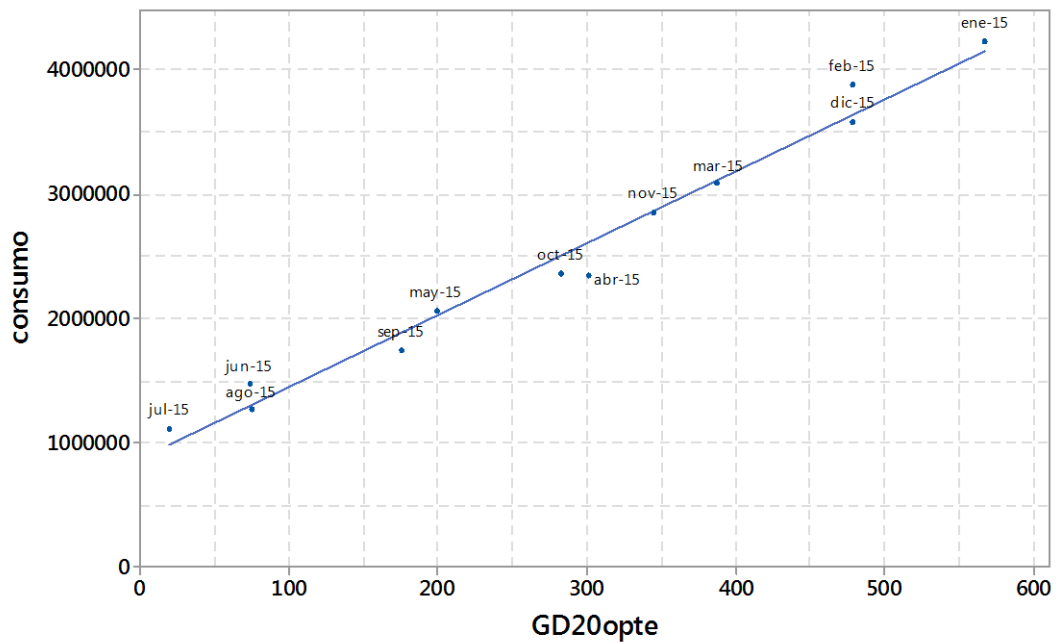
Conceptos estadísticos

Para la obtención de los modelos se ha empleado la técnica de regresión lineal simple mediante el método de mínimos cuadrados.

El método de mínimos cuadrados permite obtener aquella recta o función lineal que mejor ajusta la relación entre dos datos, en este caso el consumo energético y los grados-día, minimizando la suma de los cuadrados de las distancias entre el valor estimado y el valor observado, es decir los residuos.

El proceso se inicia mediante la construcción de la gráfica de dispersión, es decir, aquella que representa los consumos energéticos mensuales frente a los GD mensuales para cada una de las observaciones que se considerarán para la elaboración del modelo.

Esta gráfica permite definir la forma (lineal, cuadrática, por tramos, etc...) que tendrá el modelo, como se muestra en la gráfica 1.



Gráfica 1: Gráfica de dispersión de consumo vs GD20.

Si representamos como:

Y_i :el valor observado del consumo energético un mes dado

\hat{Y}_i :el valor del consumo energético estimado por el modelo, donde

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot X_i$$

La recta de mínimos cuadrados será aquella cuyos coeficientes β_0 y β_1 minimizan la suma de los residuos e_i :

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 \cdot x_i)^2$$

Definiéndose los residuos como la diferencia entre el valor real y el valor estimado por el modelo, en este caso, del consumo energético mensual.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

Validación de los modelos

Cuando se obtiene un modelo mediante el método de mínimos cuadrados, se obtiene una Función de Regresión Muestral (FRM), ya que dicha función se obtiene a partir de un número determinado de observaciones (en este caso 12 observaciones correspondientes a los 12 meses de un año completo de funcionamiento).

Para poder utilizar esta función muestral para inferir valores acerca del proceso estudiado, evaluar su precisión, etc... se han de comprobar que esta FRM cumple los siguientes requisitos¹⁶:

1. Linealidad del modelo: la función definida como modelo debe ser lineal en los parámetros, es decir, éstos solo pueden aparecer elevados a la potencia unidad.

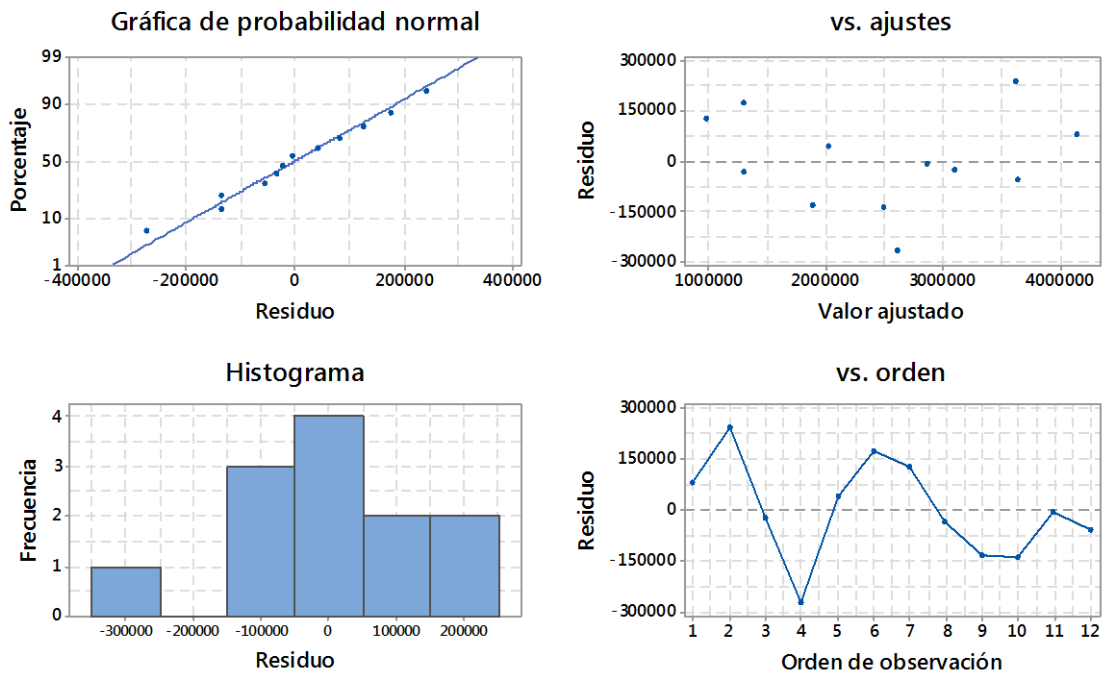
2. Normalidad: los residuos deben presentar una distribución normal con media cero, de forma que se garantiza que el modelo está bien especificado, ya que los valores de los residuos no afectan de forma sistemática al valor esperado de Y. Este supuesto garantiza que no se ha dejado de considerar alguna variable que sería significativa para explicar el comportamiento de la variable respuesta.

3. Homocedasticidad: la varianza de los residuos del modelo es constante para todos los valores de la variable explicativa. Este supuesto permite admitir que todos los valores estimados son igual de confiables.

4. Independencia: los valores de los residuos no pueden estar autorrelacionados, es decir no pueden presentar ningún tipo de tendencia a lo largo del tiempo. Si no fuera así, es decir si existiera algún tipo de tendencia de los residuos en el tiempo, se podría incluir el tiempo como variable explicativa en el modelo para mejorar las estimaciones, lo cual significa que el modelo original no está bien planteado.

Habitualmente el cumplimiento de los supuestos se verifica mediante el análisis gráfico de las gráficas de los residuos, tal y como se muestra en la gráfica 2.

¹⁶ R Poquet, J. Sastre, Eficiencia energética: Como evitar errores estadísticos en la Medida y Verificación, Emin Ingeniería Multidisciplinar, Valencia 2014.



Gráfica 2: Grafica de residuos para consumo.

En los análisis con un número reducido de observaciones, como es este caso, es difícil determinar con seguridad el cumplimiento de los supuestos anteriores a partir del análisis gráfico descrito anteriormente. Para comprobar con mayor seguridad el cumplimiento de los supuestos 2 a 4 (el primer supuesto se garantiza en la propia formulación del modelo) se han utilizado diversos test estadísticos que ofrecen un resultado numérico más fácil de interpretar.

Para el cumplimiento de cada supuesto se han empleado los test siguientes:

- Normalidad: Test de Shapiro – Wilk.
- Homocedasticidad: Test de Breusch – Pagan, Test de Goldfeld – Quandt y Test de Harrison McCabe.
- Independencia: Test de Durbin – Watson, Prueba de las rachas y Test de Breusch – Godfrey.

Criterios de calidad de los modelos

El cumplimiento de los supuestos anteriores, implica que el modelo está bien formulado y puede utilizarse para llevar a cabo técnicas de inferencia estadística.

Adicionalmente es necesario evaluar si la calidad del modelo es suficiente para los fines para los cuales se desea utilizar, EVO establece los siguientes criterios de calidad:

a. Coeficiente de determinación: mide la bondad del ajuste del modelo y representa que parte de la variación de la variable respuesta es explicada por el modelo de regresión.

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$$

Según los documentos anteriormente citados, un modelo destinado para uso en el ámbito energético debe presentar un coeficiente de determinación igual o superior a 0,75.

b. Coeficiente de Variación: mide como es el error introducido por el modelo respecto a la media de los valores estimados.

$$CV = \frac{SE_{\hat{Y}}}{\bar{Y}}$$

Donde $SE_{\hat{Y}}$ es el error estándar del modelo, definido como:

$$SE_{\hat{Y}} = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - k - 1}}$$

Siendo n el número de observaciones empleadas en el modelo y k el número de variables incorporadas al modelo.

El coeficiente de variación de los modelos debe ser igual o inferior a 0,20

c. Sesgo: mide la desviación que introduce el modelo debido al redondeo de los coeficientes obtenidos por el método de mínimos cuadrados

$$sesgo = \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)}{\sum Y_i}$$

Los modelos deben presentar un sesgo menor o igual al 0,005%.

Resultados obtenidos

Los resultados que se han obtenido para cada centro hospitalario son los siguientes:

1. Modelo

El modelo permite estimar los valores de consumo de Gas Natural para cada mes en función de la variable explicativa Grados-día del mes considerado.

Se recuerda que el modelo es válido siempre y cuando se mantengan constantes las variables estáticas, tales como superficies, horarios, equipos, etc.

Junto con el modelo, se indican los valores de los criterios de calidad que justifican su uso en el ámbito energético.

$$\hat{Y}_i = 871.901 + 5.766 \cdot GD_i$$

- Coeficiente de correlación: $R^2=0,9807 > 0,75$ ✓
- Coeficiente de variación: $CV=0,06 < 0,2$ ✓
- Sesgo del modelo: $SESGO=0,001\% < 0,005\%$ ✓

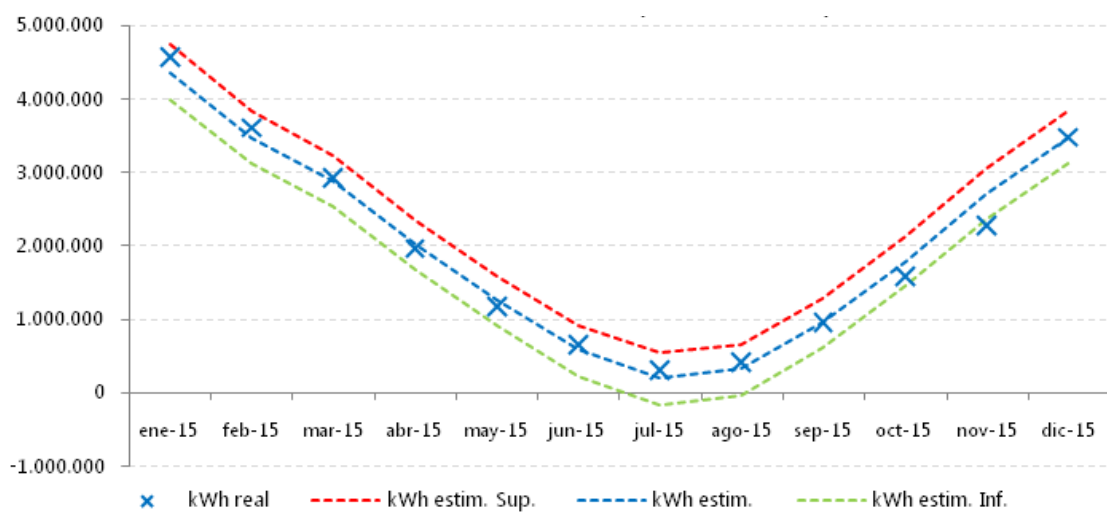
Modelo obtenido para un Hospital y comprobación de los criterios de calidad

2. Intervalo de predicción

El intervalo de predicción establece los umbrales máximo y mínimo, asociados a un determinado nivel de confianza (90%) previamente fijado, entre los cuales se debería encontrar el valor observado.

Si en un mes, el valor observado se encuentra fuera de dicho intervalo, significa que por algún motivo el comportamiento energético del edificio no es el esperado y por tanto se han de emprender las actuaciones necesarias que se estimen necesarias, especialmente cuando el valor observado se encuentre por encima del umbral máximo.

El intervalo de predicción permite obtener una señal de alarma ante comportamientos energéticos extraños del edificio.

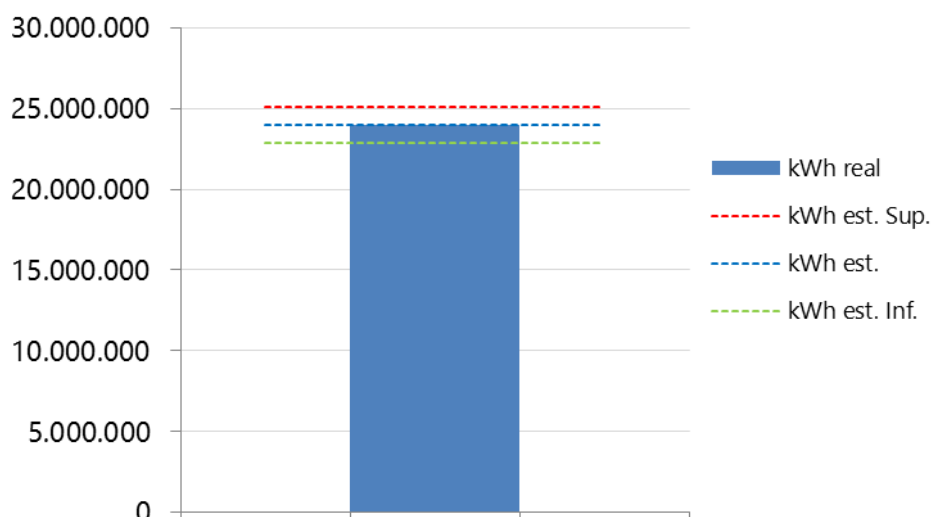


Gráfica 3: Consumo mensual (kWh/mes).

3. Precisión del modelo

La precisión del modelo es el valor que representa el efecto combinado del error que puede introducir el modelo en un número determinado de estimaciones (en este caso se muestra su valor para el cómputo anual, es decir, 12 observaciones) considerando un valor de confianza del 90%.

La precisión del modelo indica el rango de valores entre los que debería encontrarse el consumo anual del edificio con una confianza del 90%. De nuevo, permite generar una señal de alarma si dicho consumo anual se encuentra por fuera del intervalo, especialmente si se encuentra por encima del nivel superior, lo que significaría que el edificio ha sido menos eficiente de lo que venía siendo anteriormente.



Gráfica 4: Consumo anual 2015 (kWh/año).

Software empleado

Para el análisis de los datos y la obtención de los modelos de regresión lineal simple mediante el método de mínimos cuadrados, se ha empleado el software estadístico Minitab (www.minitab.com).

Dichos modelos se han verificado posteriormente mediante el software estadístico R (www.r-project.org), el cual se ha empleado también para la realización de los test estadísticos citados en el apartado 3.4.

Conclusiones

En aquellos centros que disponen de más de un CUPS se ha observado que el suministro del GN más importante es el destinado a la sala de calderas. Este es el motivo por el que en los centros con diversos puntos de suministro únicamente se han tenido en cuenta los que dan servicio a la sala de calderas.

Adicionalmente, se ha observado que dentro del consumo de GN que se produce en las salas de calderas, el principal uso es el destinado a la producción de calor para calefacción (>95% del total). Se puede comprobar que el consumo de GN destinado a la producción de ACS tan sólo representa el 2,5% del total. Por este motivo los modelos obtenidos no necesitan incorporar alguna variable que represente el consumo de ACS del centro (A este hecho contribuye también que el consumo de ACS en los centros sea uniforme).

En todos los casos se han obtenido resultados aceptables empleando como variable explicativa los Grados Día de calefacción en Base 20. Si bien es cierto que existen muchas otras variables que influyen sobre el consumo de calefacción, tales como la Humedad Relativa, horarios, grados de ocupación, etc... se ha comprobado que el uso de los GD como variable explicativa única es suficiente, lo cual queda patente si se observan los elevados coeficientes de

determinación R^2 obtenidos para cada modelo. La ventaja de emplear esta variable como única variable explicativa es que resulta fácilmente medible.

No obstante, si se necesitaran modelos con una mayor precisión se debería analizar la posibilidad de incorporar nuevas variables al modelo o emplear distintas bases para el cálculo de los GD.

Los centros con un consumo anual mayor a los 10 MWh representan casi el 70% del consumo total en Castilla y León. Si se considera además a aquellos centros con consumos anuales entre 5 y 10 MWh/año el consumo acumulado asciende hasta casi el 90%.

Por lo tanto, de cara a implementar medidas de ahorro y eficiencia energética, se debería empezar por aquellos centros con un mayor consumo energético, ya que el posible impacto sobre el coste energético global anual sería previsiblemente mayor.

Lo anterior, no significa en ningún caso, que aquellos centros con un consumo energético bajo no deban intentar implementar medidas de ahorro energético o al menos hacer un seguimiento de sus consumos.