

APLICACIÓN DEL TOOLBOX-MATLAB EN LA ESTIMACIÓN DE GESTIÓN TOTAL EFICIENTE DE ENERGÍA EN MOA (HOLGUÍN, CUBA)

(Application of the Toolbox-Matlab in the Estimation of Total Efficient Management of Energy in Moa, Holguín, Cuba)

Reineris Montero Laurencio, Ever Góngora Leyva

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM), Cuba
rmontero@ismm.edu.cu; egongora@ismm.edu.cu

(Recibido septiembre 7 de 2007 y aceptado mayo 29 de 2008)

<p>Resumen: Mediante la modelación paramétrica se demuestran las posibilidades del empleo del Toolbox de Identificación de Matlab para determinar expresiones que permitan pronosticar consumos e indicadores energéticos. Se presenta un resumen de la situación energética de los hoteles de la provincia de Holguín, en cuanto a la estructura de consumo de los portadores energéticos, y de las características operacionales que deciden el comportamiento de estos. Se escoge un hotel representativo como caso de estudio en el que se aplican las herramientas de la gestión energética.</p>	<p>Abstract: Using the parametric modeling it is demonstrated the possibilities of the employment of Identification Matlab Toolbox to predict consumptions and energy indicators. A summary of the Holguín's province hotels energetic situation is presented, regarding the energetic carriers' consumption structure and the operational characteristics which decide their behavior. A representative hotel is chosen, as case of study in which the tools of the energetic management are applied.</p>
<p>Palabras clave: Energía, Gestión energética, Hoteles, Modelación paramétrica.</p>	<p>Key Words: Energy, Energy Management, Hotels, Parametric Modeling.</p>

1. INTRODUCCIÓN

El sector de los servicios en la provincia de Holguín (Cuba) está compuesto, en gran medida, por instituciones de educación, salud y turismo, y tiene una demanda promedio de electricidad de alrededor del 8%, un 6% para los hoteles. Al terminar cada etapa inversionista en estas instalaciones, se inicia una utilización energética ilimitada en el tiempo. No hay ninguna preocupación por la caracterización de los problemas relacionados con la eficiencia energética, aspecto que debe ser considerado desde la propia concepción de los proyectos. En términos generales, se estiman comportamientos irracionales de los índices de consumo, incluso después de realizar trabajos especializados para determinar las potencialidades de ahorro.

La esfera del turismo se torna compleja en cuanto al uso de la energía, a pesar de no tener el mismo nivel de consumo que la industria. Esto se debe a las exigencias en cuanto a la calidad del suministro eléctrico, la necesidad de crear conciencia en el personal y la diversidad en las actividades que se realizan y que incluyen el empleo de otros portadores energéticos. Por ello el sector turístico es muy vulnerable en cuanto a costos y calidad del servicio.

En estas instituciones del sector servicios están presentes, entre otros, las instalaciones eléctricas, los accionamientos relacionados con la climatización, la refrigeración, el transporte de

cargas y fluidos y los generadores de vapor, entre otras tecnologías que influyen en la gestión empresarial.

Se han desarrollado un conjunto de acciones con un enfoque multidisciplinario para mejorar la eficiencia energética, donde los diagnósticos y las auditorías energéticas han empleado herramientas basadas fundamentalmente en la Gestión Total Eficiente de la Energía y el uso de nuevos algoritmos y procedimientos diseñados para estos fines.

El desconocimiento y la incompreensión de la alta dirección sobre lo que representa un sistema eficiente de gestión energética lleva a pérdidas considerables, al concluir de forma errónea que en la empresa resulta suficiente un plan de ahorro sin efectuar un estudio (diagnóstico) previo de las pérdidas y reservas energéticas que existen. Cuando hablamos de gestión energética, debemos comprenderla como un ciclo cerrado, para que el sistema asegure una mejora continua y esté integrado en la gestión empresarial.

2. DESARROLLO

El turismo en la provincia de Holguín ha pasado por diferentes etapas en su desarrollo, y hoy cuenta con una red de hoteles especializados con proyección internacional, pertenecientes a diferentes cadenas que se han insertado de forma competitiva en un mercado con exigente estándar de calidad. Para toda esta actividad se hace necesaria una estructura energética que

asegure cada uno de los servicios con niveles racionales de consumo de energía.

En las instalaciones hoteleras existe una gestión bastante responsable relacionada con los portadores energéticos. La experiencia indica, a partir de 8 Diagnósticos Energéticos realizados, que los principales portadores empleados son: electricidad (80-95%), gas licuado (5-9%), diésel combustible (3-7%) y gasolina (2-5%). A pesar de existir un control diario de los portadores energéticos, se carece de un sistema de gestión energética integral que permita disminuir los gastos por este concepto, es así como en las cadenas hoteleras de Cuba los energéticos sobrepasan en ocasiones el 10% de los costos totales.

También existen irregularidades que se presentan desde los proyectos de inversión hasta la puesta en explotación. No siempre se tienen en cuenta el empleo de tecnologías eficientes; lógicamente esto incrementa el valor de la inversión, pero el efecto en el aumento de la eficiencia es evidente. En varias ocasiones se sobrediseñan los sistemas, ocasionando regímenes irracionales.

La ejecución de diagnósticos energéticos favorece la toma de decisiones en inversiones y mejora la explotación de los sistemas. En trabajos realizados por el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM) se han determinado las características reales de explotación en diferentes subsistemas, donde los problemas energéticos han estado centrados en la calidad y eficiencia que tienen la explotación de la red de suministro, la operación de los diferentes accionamientos asociados principalmente al bombeo de agua, la climatización y la generación de agua caliente.

Mediante la aplicación del Diagrama de Pareto o Ley 80-20 en los hoteles, se define que la climatización genera entre el 60% y el 80% de los gastos en energéticos. El 40% de los 14 principales hoteles de la provincia de Holguín cuentan con climatización mediante aires de ventana, y el 60% restante, con la centralizada por agua helada.

3. COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO GENERAL DE UN HOTEL. CASO DE ESTUDIO

El hotel escogido tiene ocho años de explotación, tiempo en el que se ha mantenido entre los hoteles más eficientes energéticamente a nivel del país, a pesar del reciente incremento en el consumo de portadores energéticos. El deterioro tecnológico en lo fundamental del Sistema de Climatización y del Sistema de Control Automático agudiza el deterioro de los niveles de consumo, lo cual se puede observar en el desarrollo del trabajo.

El estudio inherente a la información energética del hotel se centra en 2 portadores energéticos: la electricidad y el GLP; por su grado de importancia, a estos portadores le siguen el diésel y la gasolina. En la figura 1 se puede observar, en el Gráfico de Pareto, el peso que tiene cada portador energético en el balance general. Los datos tomados para realizar este gráfico corres-

ponden a los valores acumulados desde enero del 2000 hasta septiembre del 2007.

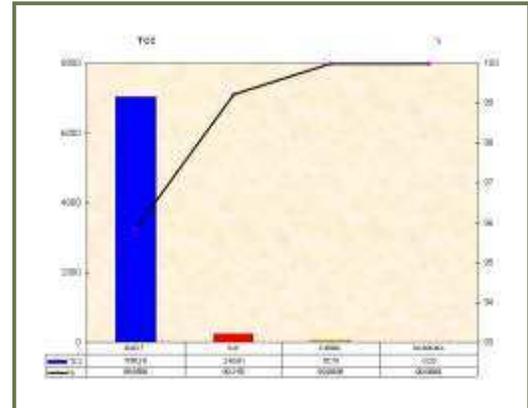


Figura 1. Estructura de consumo de portadores energéticos.

Como se confirma, la electricidad representa el 95,8599% del consumo, seguida de GLP, con un 3,3553%; el diésel representa el 0,7844% y la gasolina, el 0,0003% restante.

Teniendo en cuenta el importe que representan los portadores energéticos, se mantiene el mismo orden de importancia, pero el porcentaje varía, quedando como se muestra en la figura 2.

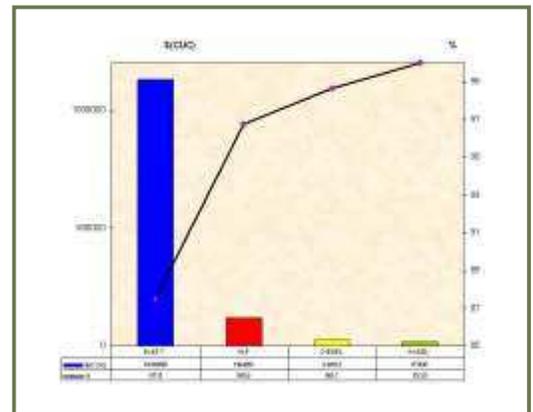


Figura 2. Estructura de los costos de los portadores energéticos 2004-2007.

Para el caso del pareto de los costos de los portadores energéticos se tomó la información desde enero de 2004 hasta septiembre 2007. Como se puede observar, la electricidad representa el 87,5% de los costos de los energéticos, seguida del GLP, con el 8.7%; el diésel, 1,9%, y la gasolina con el 1.3%.

Al realizar un balance entre gastos en energéticos y los demás gastos del hotel, se presenta la estructura de la figura 3, en la que se aprecia que los energéticos ocupan el quinto lugar dentro de todos los gastos, con un 6,1%.

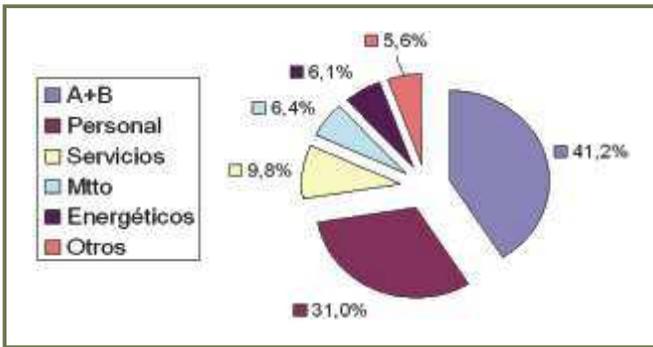


Figura 3. Estructura de los gastos generales del hotel.

El gráfico de pastel anterior se realizó con los datos económicos desde enero hasta septiembre de 2007. Comparando los gastos en energéticos con los ingresos totales del hotel, se determina que los energéticos representan el 5,3% de los ingresos.

Electricidad

Es muy difícil pronosticar el comportamiento de la electricidad en una instalación hotelera, teniendo en cuenta que el propio indicador establecido no es representativo (35-45 kWh/HDO). Para demostrarlo se determina la no correlación entre Habitaciones Días Ocupadas (HDO) y los kWh, con los valores desde enero de 2000 hasta septiembre 2007, resultando un $R^2 = 0,109$. En la figura 4 se aprecia la línea de tendencia y la expresión correspondiente.

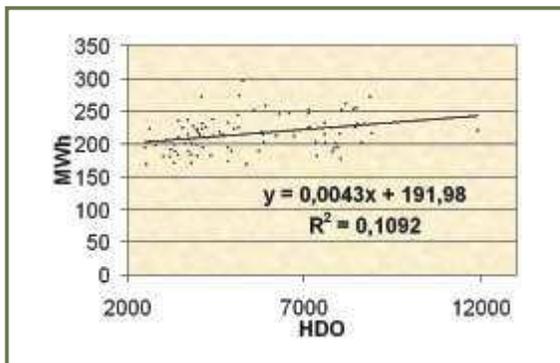


Figura 4. Gráfico de dispersión del consumo de kWh vs. HDO.

Estudios precedentes proponen mejores índices de consumo, y la tendencia ha ido a incorporar en los análisis las variables climatológicas y otros elementos como factores de carga térmica relacionados con los espacios climatizados en utilización. Todos estos elementos mejoran los pronósticos, pero no han sido implantados. Se incorporan a estas investigaciones el empleo de técnicas de inteligencia artificial que posibiliten encontrar índices de consumo más representativos y precisión en la estimación de ellos.

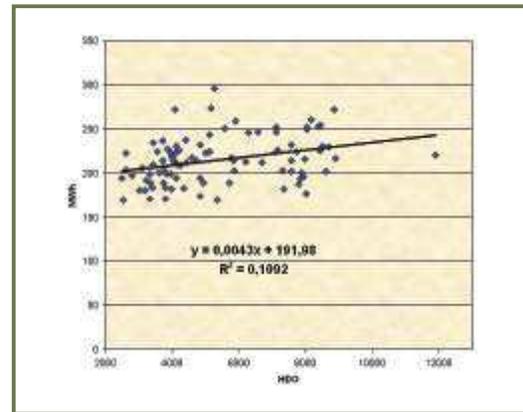


Figura 5. Gráfico de control del consumo de electricidad.

Los gráficos de control son diagramas lineales que permiten observar el comportamiento de una variable en función de ciertos límites establecidos. En la figura 5 se aprecia el gráfico de control de la electricidad desde enero de 2000 hasta septiembre de 2007.

En la figura 6 se aprecia que el valor medio o más probable de consumo mensual de energía eléctrica es de 215 MWh. Se destaca que durante todo el año 2007 los valores de consumo están todos por encima del valor promedio, con una tendencia a incrementarse. En el mes de julio de 2007 la electricidad alcanzó un valor fuera de control (296 MWh), superando en 1 MWh el valor máximo de desviación, lo que alerta en el sentido de continuar en la búsqueda de soluciones a las causas que originan el incremento del consumo. Otros meses significativos fueron mar-03, 259 MWh; ago-04, 259; abr-05, 255; abr-06, 261 y ene-07 con 272 MWh. Para que se tenga una idea de la tendencia al incremento del consumo de electricidad se presenta el siguiente gráfico en el que se compara la energía consumida en el 2007 con respecto a los valores medios mensuales.

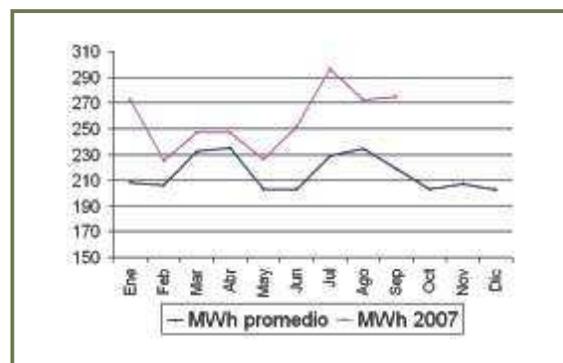


Figura 6. Consumo de electricidad 2007 y los valores medios mensuales.

También se confeccionó el gráfico de control para ver las desviaciones que ha sufrido el Índice de Consumo de Electricidad.

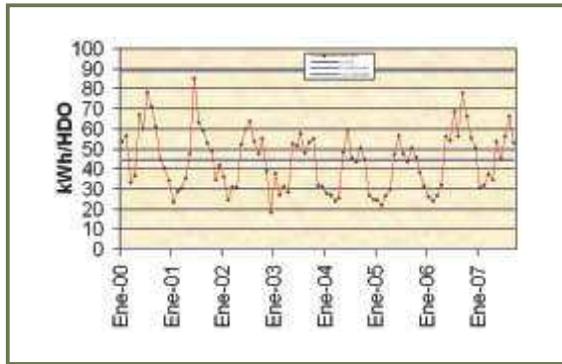


Figura 7. Gráfico de control del índice de consumo de electricidad.

En este gráfico de control se aprecian las variaciones del índice de consumo alrededor del valor promedio de 44 kWh/HDO. Este indicador sigue un comportamiento con tendencia a la periodicidad, en donde los meses de menor índice son enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre, con valores promedio por debajo de los 30 kWh/HDO, y los restantes meses por encima de este valor. Es por tanto que la vigilancia de este indicador debe reforzarse en los meses restantes del año (mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre).

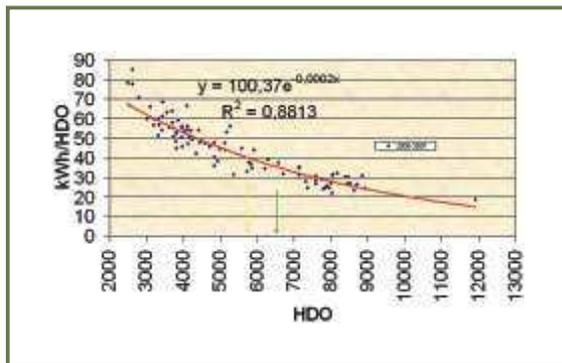


Figura 8. Gráfico de Índice de Consumo vs. HDO.

A pesar de que el gráfico de la figura 4 no expresa correlación entre los MWh y las HDO, se considera que se puede realizar un gráfico de IC vs. HDO para tener una idea aproximada de los niveles de ocupación a que se debe operar para mantener el Índice de Consumo de Electricidad dentro del límite establecido por la cadena (35 y 40 kWh/HDO). En la figura 8 se muestra cómo los HDO deben moverse entre las 5600 y 6650 habitaciones ocupadas en el mes para mantener el índice de consumo en sus parámetros.

GLP

También es apreciable el consumo de GLP en los hoteles, específicamente en la elaboración de alimentos y, en la mayoría de los casos, en el calentamiento auxiliar de los sistemas de

Agua Caliente Sanitaria (ACS); el hotel que se analiza, desde su apertura, utiliza como promedio anual el 18,7% del GLP para el calentamiento de agua. El valor promedio anual del consumo de este portador es de 66 540 litros. En el gráfico de la figura 9 se puede apreciar cómo el consumo total de GLP del hotel se ha mantenido por encima de los 50 000 litros anualmente, sin embargo, el consumo de GLP para el calentamiento del agua se mantuvo por debajo de los 10 000 litros desde el año 2000 hasta el año 2003. Para el año 2004 se produce un incremento hasta 13 453 litros, y al siguiente sube a unos 20 370 litros. En el último año analizado (2006) se alcanza la cifra de 24 114 litros.

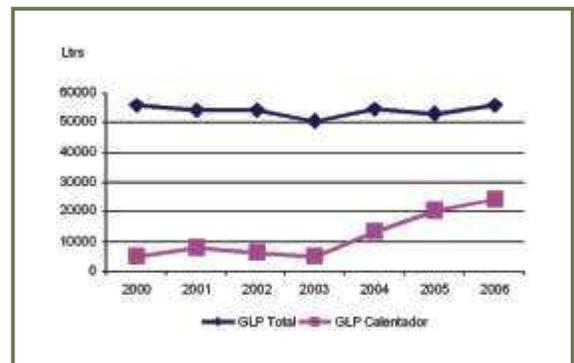


Figura 9. Gráfico del consumo de GLP total y del calentador.

Determinando el porcentaje que representa el consumo de GLP en el calentador con respecto al consumo total del hotel, resultó que en el año 2004 este indicador representó el 19,7%; en el año 2005, el 27,8%, y en el año 2006, el 30,2%. Por lo tanto, existe un notable incremento.

El calor que se necesita para el sistema ACS es el que se recupera en los condensadores de las enfriadoras del sistema de climatización. Este en muchas ocasiones es insuficiente, principalmente en los meses de invierno, cuando las unidades enfriadoras trabajan muy poco y la demanda de GLP por el calentador de incrementa.

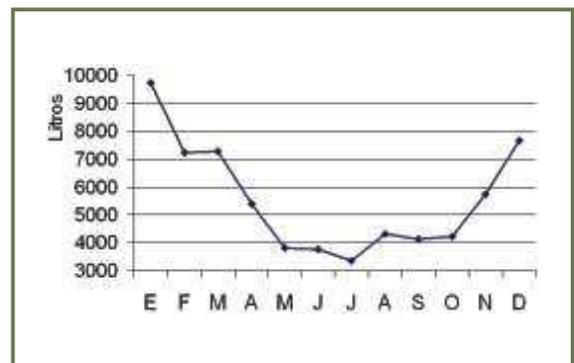


Figura 10. Gráfico del consumo promedio mensual de GLP del hotel

En el gráfico de la figura 10 se puede verificar, a partir de los valores promedios mensuales desde el año 2000 hasta el año 2006, cómo disminuye grandemente el consumo de GLP en los meses más calurosos del año (mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre), debido a que el calentamiento auxiliar del agua mediante calentador de GLP practicante no trabaja.

Es importante para la planificación energética en los hoteles contar con una herramienta que permita pronosticar el consumo de los portadores; es por esto que, tomando como base los promedios históricos mensuales del consumo de GLP total y los valores promedios mensuales de las Habitaciones Día Ocupadas (HDO), se llega a la ecuación polinómica correlacional de sexto orden (1) con $R^2=0.93$.

$$y=1*10^{-16}x^6-4*10^{-12}x^5+5*10^{-8}x^4-0.0004x^3+2900.6x+2*10^6 \quad (1)$$

En la figura 11 se aprecia el gráfico de correlación correspondiente.

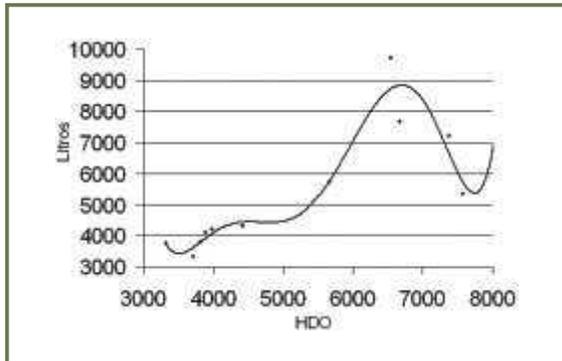


Figura 11. Gráfico de dispersión del consumo de GLP en el calentador vs. HDO.

Se destaca cómo existe una ecuación similar obtenida cuando se analiza el consumo de GLP para el calentamiento de agua en correspondencia con HDO (expresión 2) con $R^2=0.92$

$$y=7*10^{-17}x^6-2*10^{-12}x^5+3*10^{-8}x^4-0.0002x^3+0.759x^2-1487.7x+1*10^6 \quad (2)$$

Estimación del consumo de GLP mediante la modelación paramétrica empleando el Toolbox de Identificación del Matlab

Las técnicas de identificación de sistemas han cobrado gran relevancia en diversas áreas del conocimiento donde se requiere de un modelo para fines de análisis, predicción, simulación, diseño y control.

A partir de los valores de la figura 12 se obtuvo la modelación matemática del consumo del GLP del hotel caso de estudio, partiendo de los datos experimentales. Se tomaron como datos de entrada U1, los valores promedio de HDO, y como variable

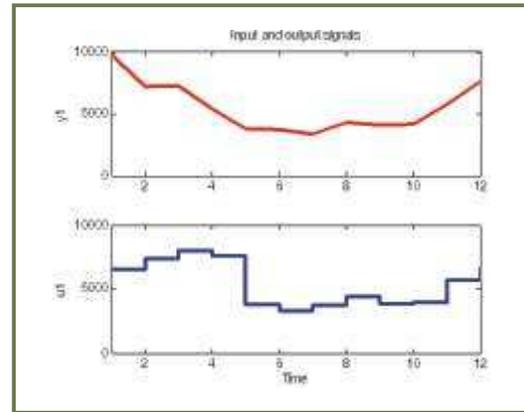


Figura 12. Datos de entrada y salida del sistema

de salida Y1, los valores promedio del consumo de GLP en litros. Para el análisis de este sistema SISO (Simple Entrada Simple Salida) se utilizó el Toolbox de Identificación del Matlab. El resultado que se expone es una muestra de que se puede utilizar esta técnica para la planificación energética.

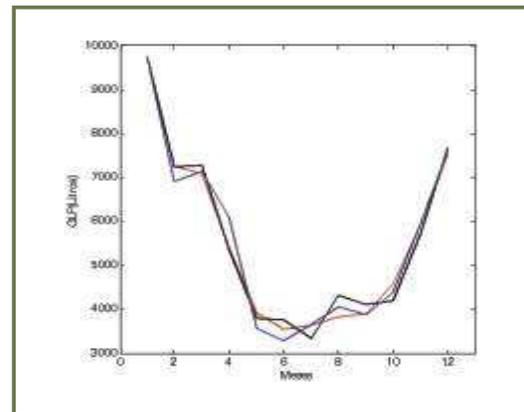


Figura 13. Datos de salida del sistema y de los modelos ARX 331 y ARMAX 2221.

Se empleó todo el set de modelos paramétricos. Las estructuras que reflejaron el mejor resultado fueron la ARX (autorregresión con variable exógena) y el modelo ARMAX, que ofrece mayor flexibilidad al modelo anterior, incorporando un término conocido como media en movimiento del ruido blanco. Los resultados de la modelación en comparación con la salida de sistema se pueden apreciar en la figura 13. En esta figura la línea negra refleja las salidas reales; la roja, la salida del modelo ARX 331 de tercer orden con un ajuste de 0,87, y la azul, la salida del modelo ARMAX 2221 de segundo orden con ajuste de 0,82.

El modelo de mayor orden brinda el mejor ajuste y se puede emplear para la planificación energética, pero se sugiere incorporar otras variables a la entrada del sistema para perfeccionarlo. La temperatura ambiente debe ser esta variable,

pero no se considera en la presente investigación por no tenerse los datos necesarios.

A continuación se exponen las estructuras de los modelos con sus respectivas funciones de transferencia.

ARMAX 2221

$$A(s)y(t) = B(s)u(t) + C(s)e(t)$$

$$A(s) = s^2 + 2.457s - 4.574$$

$$B(s) = -1.076s - 4.313$$

$$C(s) = s^2 + 4.58s + 0.05322$$

$$-1.0763s - 4.3131$$

$$s^2 + 2.4571s - 4.5743$$

ARX 331

$$A(s)y(t) = B(s)u(t) + C(s)e(t)$$

$$A(s) = s^3 + 0.3875s^2 - 0.5722s - 0.2667$$

$$B(s) = -0.517s^2 - 0.691s - 0.2244$$

$$C(s) = s^3 + 1.772s^2 + 1.241s + 0.317$$

$$-0.51698s^2 - 0.69102s - 0.22443$$

$$s^3 + 0.38754s^2 - 0.57221s - 0.26669$$

Luego se realizó la validación de los modelos, con datos correspondiente a 2 años característicos, y los resultados del ajuste estuvieron entre 0,81 y 0,9.

4. CONCLUSIONES

Con el diagnóstico energético realizado al hotel caso de estudio se presentaron 38 consideraciones finales, referidas en lo fundamental al sistema de suministro eléctrico, empleo de los portadores energéticos y sistema de climatización, con 19 recomendaciones precisas.

La electricidad representa el 95,8599 % del consumo de los portadores energéticos, seguida de GLP, con un 3,3553%; el diésel representa el 0,7844%, y la gasolina el 0,0003% restante. En la estructura de los costos energéticos la electricidad representa el 87.5%, seguida del GLP, con el 8.7%; el diésel, con el 9%, y la gasolina, con el 1.3%.

El gasto en energéticos del hotel analizado ocupa el quinto lugar dentro de los gastos generales, con el 6,1 %, después de los gastos en A+B, personal, servicios y mantenimiento. Comparando los gastos en energéticos con respecto a los ingresos totales del hotel, se determina que los energéticos representan el 5,3 % de los ingresos. El índice de consumo de electricidad promedio es de 44 kWh/HDO. Para mantener el índice de consumo entre 35 y 40 kWh/HDO, la ocupación mensual debe estar entre las 5600 y las 6650 HDO.

Se puede estimar el consumo de GLP en función de las HDO para los diferentes meses del año mediante un modelo paramétrico ARX 331.

5. REFERENCIAS

- Borroto, A. y colectivo de autores (2006). Gestión y economía energética. Editorial Universidad de Cienfuegos, Cuba. 98 p.
- Campos Avella, J. y R. Dorta (2001). La eficiencia energética en la gestión empresarial. Colombia, Editorial Contactos Mundiales. CEEMA. 91 p.
- Kunusch, C., (2003). Identificación de Sistemas Dinámicos. Universidad Nacional de la Plata. Cátedra de control y servomecanismos. 39 p.