



APLICACIONES INDUSTRIALES

VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE LA CARACTERÍSTICA ENERGÉTICA DE LOS BLOQUES

Juan Luis Rodríguez Olivera
Alberto E. Calvo González

Recibido: Septiembre del 2003
Aprobado: Noviembre del 2003

Resumen / Abstract

En el trabajo se valida el procedimiento vigente de actualización de la característica energética (curvas consumo-entrega) de los bloques, evidenciándose la no correspondencia de los modelos obtenidos con el comportamiento real. Se proponen tres vías posibles de obtención de la información para un nuevo método de actualización a partir de la instrumentación existente que incluye el empleo de la información de los sistemas SCADA instalados.

Palabras clave: Centrales termoeléctricas, turbina de vapor, curva de arranque, rodaje, preparación para la sincronización

This paper deals with the validation of the now in use, updating procedure of fuel rate curves (energy characteristic) of units, it shows no correspondence with the actual (situation) behavior. Three possible ways to obtain the information to update models are proposed based on the monitoring installed equipment data which include the use of information of installed SCADA systems.

Key words: Power stations, steam turbine, starting curves starting diagrams, synchronization, arrangement, runnig, steam turbine

INTRODUCCIÓN

Los modelos de la característica energética de los bloques son de vital importancia para la distribución óptima de la carga eléctrica entre las diferentes unidades generadoras acopladas al sistema electro-energético.¹⁻¹¹

Estas características energéticas constituyen la información principal para el proceso de optimización, por cuanto reflejan los gastos de combustible de cada unidad en el rango de trabajo de las mismas y estos representan el peso fundamental dentro de los gastos de explotación.

La metodología para la confección de las características consumo-entrega e insumo de las

unidades termomecánicas, según norma de la Unión de Empresas de Generación,¹ tiene como objetivo: "...mantener los niveles necesarios la información que permita una operación económica del Sistema Electroenergético Nacional de forma sistemática, así como, conocer periódicamente las condiciones tecnológicas en que se encuentra cada unidad". Las pruebas se realizarán con intervalos de 6 meses $\pm$ 15 días de acuerdo con un cronograma o "cada vez que cambien de forma importante las condiciones de operación en las que se haya realizado la última característica", es decir, después de un mantenimiento o reparación por avería, "que afecte de forma importante la eficiencia del ciclo".

La determinación de los "cambios de forma importante en las condiciones de operación", constituye un criterio que no está definido adecuadamente en el sentido de cuáles cambios y cuán importantes, pudiendo ser muy relativo en la situación actual de funcionamiento de las unidades generadoras de 100 MW.

Desafortunadamente, ante las grandes dificultades presentadas en la operación, la inestabilidad de la generación y de las condiciones técnicas, las CTE han dejado de realizar pruebas de consumo-entrega para obtener estos modelos y no se considera de forma general la dinámica de estas características, empeorándose el proceso de despacho económico de cargas. Solo en el Departamento de Regímenes del Despacho Central de Carga se realiza un chequeo y reajuste de los modelos disponibles utilizando para ello los reportes mensuales promedio de las unidades lo que resta veracidad y actualidad a estos resultados.

La situación actual del Sistema Electroenergético en recuperación plantea la necesidad de atender rigurosamente la problemática de la actualización continua de las curvas de consumo-entrega y el Despacho Económico de Cargas por los ahorros considerables de combustible que reporta esta actividad, tanto a nivel de Sistema Electroenergético como a nivel de cada Central Termoeléctrica (CTE). Si bien es poco realista establecer un programa de pruebas con resultados confiables y duraderos, es necesario pensar en nuevos mecanismos para la actualización continua de las características de consumo-entrega.

La introducción de Sistemas SCADAS en unidades de 100 MW modernizadas permite realizar esta tarea,

actualizar la información para el Despacho Económico de Cargas del sistema y utilizar modelos de consumo-entrega más complejos en su formulación matemática e inclusión de otras variables relacionadas con la operación conjunta de los bloques dentro de la CTE.

SITUACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE AJUSTE DE LOS MODELOS DE CONSUMO-ENTREGA

En la figura 1 se muestra un gráfico de la disponibilidad y las causas de sus limitaciones,¹² y las salidas de servicio de las unidades 5, 6, 7 y 8, de 100 MW de capacidad de la termoeléctrica objeto de estudio, durante el mes de abril del 2003. (Ver tabla 1.)

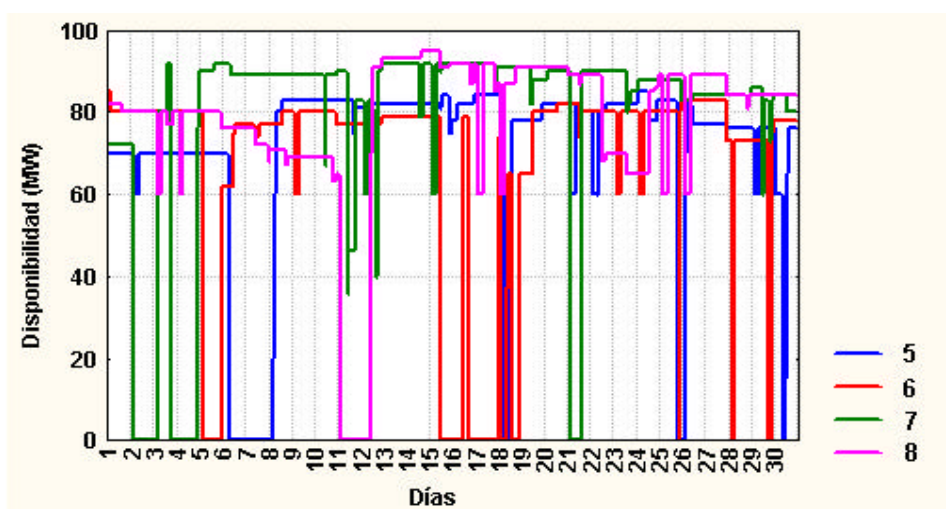
Causas de las limitaciones por unidades

Unidad 8

- Falta de tiro por suciedad en el eje convectivo de caldera, sopleteo de quemadores, limpieza de condensadores, falta de tiro por ensuciamiento general de caldera, vapor para usos varios (cabezal), poros en el horno, indisponible por quemadores.

Unidad 7

- Falta de tiro por suciedad en el eje convectivo de caldera, limitación por turbina (rotor modificado), indisponible por quemadores, sopleteo de quemadores, falta de tiro por suciedad general de caldera, fugas de hidrógeno, poros en el sobrecalentador convectivo, F/ S VTF-B (explosión caja de conexiones), VTI-B en 1ra. velocidad (tierra en el motor. limpieza de condensadores, F/S VTI-B (invertir estrella: tierra), computadora sin señalización, reparación del salidero en drenaje de caldera, vapor para usos varios (cabezal servicio de planta), VTI-A en 1ra. velocidad (alta temperatura rodamientos del motor).



Disponibilidad de unidades de 100 MW en la CTE objeto de estudio durante el mes de abril del 2003.

Tabla 1
Disponibilidad (MW)

Unidad	Máxima	Mínima	Promedio
MG5	85	0,00	70,55
MG6	85	0,00	67,59
MG7	92	0,00	78,96
MG8	95	0,00	78,17

Unidad 6

Falta de tiro por suciedad en el eje convectivo de caldera, poros en el horno, indisponible por quemadores, falta de tiro por suciedad general de caldera, vapor para usos varios (cabezal), limpieza de condensadores, poro en economizador, disparos de ambos tiros VTI (por sobrecarga), cable ponchado del sistema de excitación, reparación del cable ponchado del sistema excitación, disparo por BMS (variación de voltaje).

Unidad 5

Falta de tiro por suciedad general de caldera, limpieza de condensadores, avería del instrumento de desplazamiento axial, sopleteo de quemadores, falta de tiro por suciedad en el eje convectivo de caldera, disparo por BMS, mala combustión (ajuste quemadores), salidero en estación atemperar (cheque), disparo VTI-A (al pasar de 1ra. a 2da.).

Actualmente en el Despacho Central de Carga Eléctrica es donde se realiza la actualización de los modelos de consumo-entrega a partir de la información mensual con el promedio de la generación y el consumo del mes, con lo que se tiene un punto de carga contra consumo que se fija como referencia con lo que se calcula un factor de corrección con respecto al modelo anterior y con ello se corrige dicha curva.

Entre las desventajas de este método se encuentran las siguientes:

- La actualización de las curvas de consumo-entrega se realizan una vez al mes con la información del mes anterior y se utilizan durante todo el mes posterior por lo que el modelo puede presentar hasta casi 2 meses de atraso.
- La utilización de un solo punto para un mes de trabajo y la forma de obtenerlo, así como la corrección por un mismo factor para todo el rango de cargas, no hacen confiable el nuevo modelo fundamentalmente en cuanto a su pendiente (coeficiente de consumo incremental).

- La corrección de los modelos de todas las unidades del sistema es un trabajo grande y tedioso por lo que se realiza solo en aquellas donde se aprecian variaciones significativas, quedando otras sin modificar. Además, el criterio para la decisión de actualizar las curvas depende de los especialistas del despacho.
- Los metros de combustible tomados cada 24 h recogen los gastos de arranque, lo cual no se considera en consumo-entrega y en el caso de unidades en régimen pico alteran grandemente los resultados.

En la figura 2 se muestran los reportes de operación tomados en los cambios de turno mediante los metros de carga, combustible e insumo en los bloques 5, 6, 7 y 8 de la CTE objeto de estudio, durante la primera decena del mes de mayo¹³, y los modelos de consumo-entrega e insumo vigentes en el despacho en este período,¹⁴ los límites superior e inferior de control se fijan para un nivel de confianza de 95 %, es decir, $\pm 2 \sigma$ (error estándar de la estimación o desviación típica).

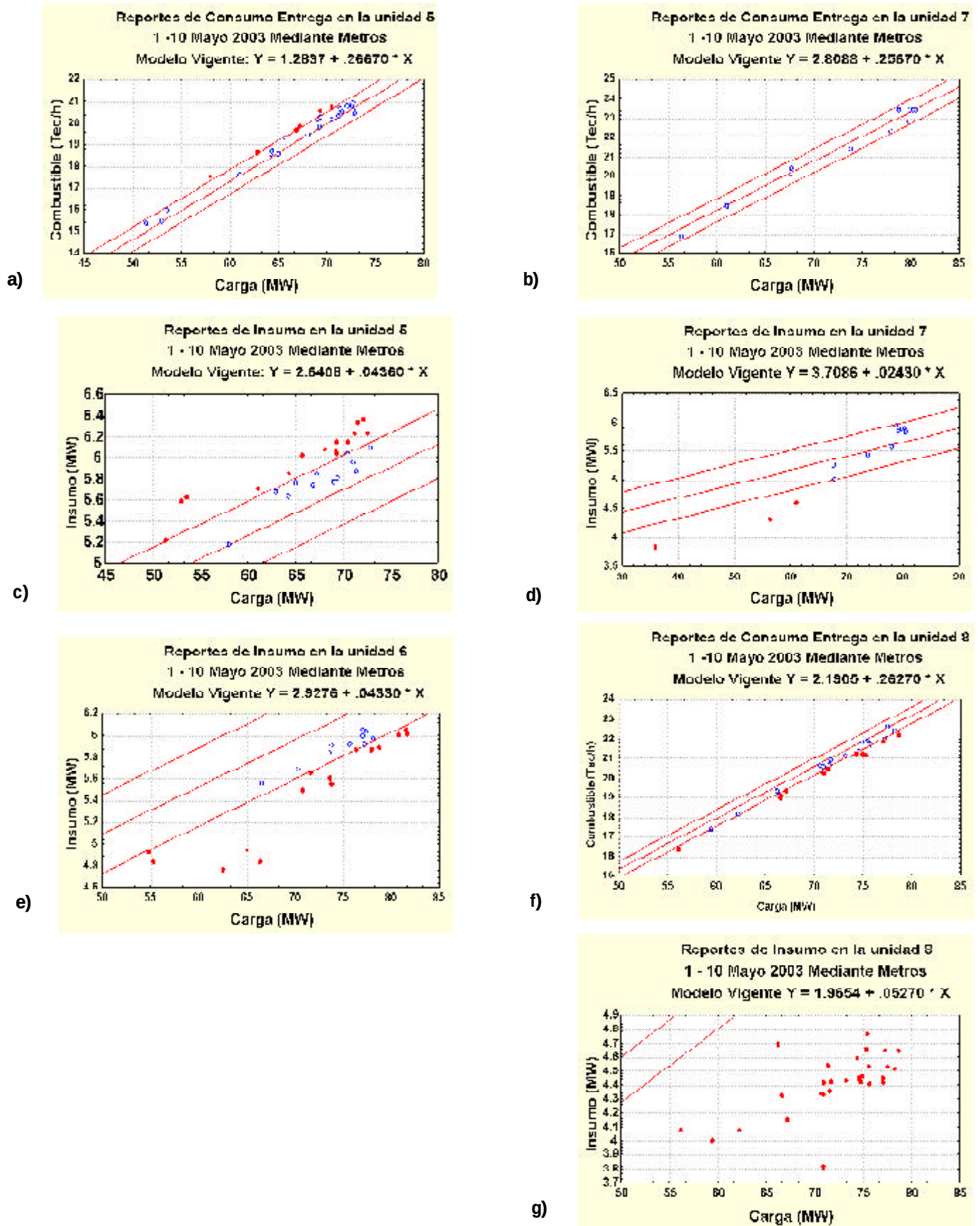
Como se observa existen diferencias significativas entre los modelos de consumo-entrega fijados por el despacho y las mediciones obtenidas mediante los metros de carga, combustible e insumo durante la primera decena del mes de mayo .

En las tablas 2 y 3 se muestra la calidad de estos modelos frente a las mediciones.

Las últimas columnas muestran el número de mediciones fuera de las especificaciones de control del modelo y su porcentaje frente al total.

En la tabla 2 se aprecia que en las unidades 5 y 8 existen 7 y 11 mediciones desplazadas todas por encima y por debajo respectivamente de los límites de control, lo que indica que el 24,14 % y 36,36 % respectivamente de ellas están fuera de control o que el modelo no es representativo. Si se consideran confiables las mediciones es evidente que estos modelos no son correctos, además, su agrupación en un solo sentido confirma esto.⁶ En el caso de la unidad 6 existen 2 mediciones fuera de rango para un 11,11%, lo que obliga a considerar la calidad de las mismas frente a la validez del modelo.

Con relación al comportamiento del insumo de los bloques, en la tabla 3 se aprecia que en todos los casos existe más del 50 % de las mediciones fuera del control de los modelos, lo que indica la necesidad de actualizar los mismos.



Gráficos de calidad de los modelos vigentes en el Despacho de Carga.

Tabla 2
Calidad de los modelos de consumo-entrega

Unidad	No. de Mediciones	Coef. de Correlación	Error Estándar	< LCI*	%	> LCS**	%	Total	%
MG5	29	0,9853	0,2808	0	0	7	24,14	7	24,14
MG6	18	0,9922	0,2214	2	11,11	0	0	2	11,11
MG7	11	0,9917	0,3086	0	0	0	0	0	0
MG8	30	0,9907	0,2107	11	36,66	0	0	11	36,66

* Límite de control inferior.

** Límite de control superior.

Tabla 3
Calidad de los modelos de insumo

Unidad	No. de Mediciones	Coef. de Correlación	Error Estándar	< LCI*	%	> LCS**	%	Total	%
MG5	29	0,8393	0,1637	0	0	16	55,17	16	55,17
MG6	28	0,9051	0,1815	15	53	0	0	15	53,57
MG7	11	0,9841	0,1058	3	27,27	4	36,36	7	63,63
MG8	30	0,6564	0,1632	30	100	0	0	30	100

* Límite de control inferior.

** Límite de control superior.

Es evidente del análisis de las figuras anteriores que la información utilizada para ajustar los modelos en el Departamento de Regímenes del Despacho Nacional de Cargas, y la forma del ajuste, no se corresponden con la situación real de las unidades ya en la primera decena del siguiente mes.

PROPUESTA DE ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS DE CARACTERÍSTICA ENERGÉTICA (CONSUMO-ENTREGA) DE LAS UNIDADES (BLOQUES)

La información necesaria para el control de las curvas de consumo-entrega y su actualización periódica se puede obtener de las mediciones de los consumos de combustible, la carga activa generada y los insumos de cada bloque. La instrumentación existente y utilizada tradicionalmente por ser la más confiable en los bloques para la determinación de estos parámetros son los flujómetros volumétricos de petróleo, metros

de carga e insumo respectivamente. Las lecturas de estos equipos son tomadas por el personal de operación cada 2 horas y en los cambios de turno, es decir, cada 8 horas.

PARTICULARIDADES DE LAS MEDICIONES CON METROS

La determinación del consumo de combustible equivalente utilizando los flujómetros volumétricos integradores en las unidades 3, 4 y 6, se realiza a través de la expresión:

$$B_{eq} = \frac{\left(\frac{LMF - LMI}{1000} \right) \cdot r \cdot Fc \cdot \frac{Vcs}{10000}}{t} \left[\frac{teq}{h} \right]$$

...(1)

donde:

LMF y LMI: Lecturas final e inicial del metro de combustible, en litros.

ρ : Densidad del petróleo a 60 °F, en t/m³.

Vcs: Valor calórico superior del petróleo en kcal/kg.

t: Tiempo entre las lecturas, en horas.

Fc, Factor de corrección del flujo de petróleo que se determina como:

$$F_c = 1,032\,402 - 0,000\,389 \cdot T_c - 0,000\,644 \cdot$$

$$API + 9,422\,568 \cdot 10^{-8} \cdot (T_c)^2 - 4,148\,619 \cdot 10^{-7} \cdot (API)^2$$

siendo T_c y API , la temperatura del petróleo en el cabezal de quemadores en grados fahrenheit (°F) y la densidad en grados API respectivamente.

La expresión anterior fue obtenida por Valdés y Gázquez¹⁵ a partir de un análisis regresional tomando como fuente la referencia 16.

En el caso de las unidades 5, 7 y 8 están instalados flujómetros integradores máscicos por lo que se simplifica la ecuación.

El cálculo de la potencia generada se realiza como:

$$W = \frac{(LMCF - LMCI) \cdot 0.16}{t} [MW] \quad \dots(2)$$

donde:

LMCF y LMCI: Lecturas final e inicial del metro de carga respectivamente, en megawatt hora (MWh).

El cálculo de la potencia gastada en las necesidades propias de cada unidad se realiza como:

$$Wi = \frac{[(LMIFA - LMIIA) + (LMIFB - LMIIB)] \cdot 0,012}{t} [MW] \quad \dots(3)$$

donde:

LMIFA, LMIIA, LMIFB, LMIIB, son las lecturas finales e iniciales de los metros de insumo de las secciones A y B respectivamente en megawatt hora (MWh).

Por la forma de determinar los consumos de combustible en teg/h y la potencia generada en MW, a través de los metros integradores, estas mediciones constituyen promedios de los diferentes flujos y cargas a lo largo del tiempo de duración del experimento.

$$B_{eq} = \frac{\sum (B_i \cdot \Delta t)}{t} \left[\frac{teg}{g} \right] \quad \dots(4)$$

$$W = \frac{\sum (W_i \cdot \Delta t)}{t} [MW] \quad \dots(5)$$

$$Wi = \frac{\sum (W_i \cdot \Delta t)}{t} [MW] \quad \dots(6)$$

donde:

B1, W1, y Wi1: Diferentes valores de consumo de combustible, potencia generada e insumida, mantenidos un tiempo Δt en el intervalo total t .

Con esta forma de medición, si una unidad trabaja todo el tiempo con una carga fija, el valor de consumo de combustible y de potencia generada coinciden con los valores instantáneos de consumo de combustible para la carga señalada, por lo que estos valores coincidirán sobre la curva de consumo entrega de la unidad, que como se sabe, representa los valores instantáneos de consumo-entrega. Si una unidad trabaja en dos o más niveles de carga durante diferentes períodos, siendo además estos períodos variables como se muestra en la figura 3a, los resultados de las mediciones a través de los metros, no reportan valores sobre la curva de consumo-entrega. Esta situación es la que se presenta normalmente en las unidades.

Si por ejemplo, en el transcurso de 8 h de una medición, un bloque trabaja con dos niveles de carga Wa y Wb , el tiempo total de trabajo sería:

$$t = ta + tb \quad \dots(7)$$

donde:

ta y tb: Tiempos en horas que trabajó la unidad a las cargas Wa y Wb respectivamente.

Los valores promedio de consumo de combustible y potencia generada en todo el período son:

$$B = \frac{Ba \cdot ta + Bb \cdot tb}{t} \quad \dots(8)$$

$$W = \frac{Wa \cdot ta + Wb \cdot tb}{t} \quad \dots(9)$$

despejando ta en la ecuación (7) y sustituyendo en (8) se tiene:

$$B = \frac{Ba \cdot (t - tb) + Bb \cdot tb}{t} \quad \dots(10)$$

donde se despeja t como:

$$t = \frac{tb \cdot (Bb - Ba)}{B - Ba} \quad \dots(11)$$

sustituyendo ta en (9) se tiene:

$$W = \frac{Wa \cdot (t - tb) + Wb \cdot tb}{t} \quad \dots(12)$$

de donde se despeja t como:

$$t = \frac{tb \cdot (Wb - Wa)}{W - Wa} \quad \dots(13)$$

igualando 11 y 13

$$\frac{tb \cdot (Bb - Ba)}{B - Ba} = \frac{tb \cdot (Wb - Wa)}{W - Wa} \quad \dots(14)$$

de donde finalmente:

$$B = \left[Ba - \frac{Wa \cdot (Bb - Ba)}{Wb - Wa} \right] + \left[\frac{Bb - Ba}{Wb - Wa} \right] \cdot W \quad \dots(15)$$

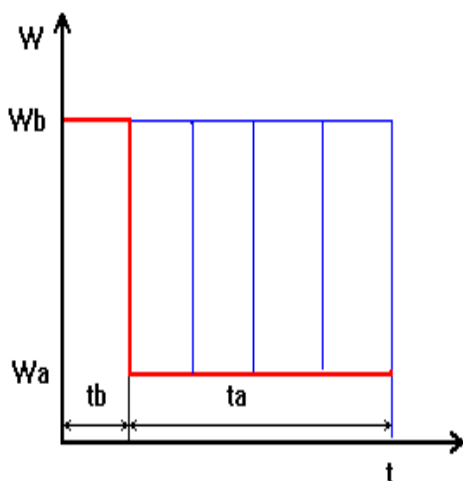
En esta expresión todos los parámetros son constantes y su forma general es: $B = a + b \cdot W$, donde B y W son los valores promedio obtenidos por los metros.

Ello indica que los valores promedio de consumo de combustible y carga, para estos dos valores de cargas en dos intervalos de tiempo, están ubicados sobre una línea recta que une estos puntos sobre la curva de consumo entrega como se muestra en la figura 3b.

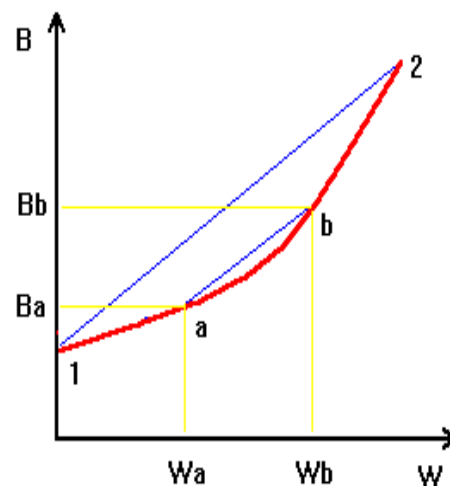
De esta forma, para valores de cargas extremos (máximo y mínimo) en diferentes intervalos de tiempo, la línea recta que une los puntos 1 y 2, extremos de la curva de consumo-entrega, (figura 3 b), es el límite superior de la zona donde se ubican los reportes de consumo-entrega obtenidos por el método explicado. En dependencia del grado de curvatura del modelo de consumo entrega será la amplitud de la zona donde se ubican los valores obtenidos de los metros.

CONCLUSIONES

Esta particularidad del método de medición, obliga a eliminar aquellas mediciones con carga cero, es decir, solo se consideran válidas aquellas lecturas de los metros estando en servicio normal la unidad, lo cual eleva los promedios reduciendo los intervalos de carga,



a)



b)

Trabajo del bloque en dos niveles de cargas: a) Curvas de duración de la carga en diferentes proporciones de tiempo con cargas Wa y Wb ; b) Zona de puntos de consumo-entrega promedios.

además, de esta forma se eliminan los gastos de combustible por arranque, que son tomados por el metro y no se incluyen en los modelos de consumo entrega.

La introducción del sistema SCADA instalado en las unidades 5, 7 y 8 durante el proceso de modernización permite disponer en estas unidades de las facilidades de las interfase con el usuario que brinda este sistema, destacándose la manipulación de ficheros históricos y el registro de todas las variables medidas cada 10 s. Ello permite disponer de un gran volumen de información para la obtención de los modelos de consumo-entrega a partir de la medición automática de las variables. En este sentido se dispone en los ficheros históricos de las mediciones de carga activa y flujo másico de combustible consumido. Desafortunadamente el sistema SCADA no contempla, dentro de sus variables, la medición de carga insumida en el bloque.

Lo anterior deja tres posibles vías de obtención de la información para los modelos de consumo-entrega e insumo mediante mediciones partiendo del sistema actual de mediciones implementado en la CTE, con diferentes particularidades que influyen en el diseño de experimento aplicado:

1. Mediciones efectuadas cada 2 horas utilizando los metros de combustible, carga e insumo.

2. Mediciones efectuadas cada 8 horas utilizando los metros de combustible, carga e insumo durante los cambios de turno.

3. Análisis continuo de la información a partir del fichero histórico del sistema instalado.

Trabajos ulteriores deberán evaluar este problema desde el punto de vista estadístico-matemático.

REFERENCIAS

1. *Metodología para la confección de las características de consumo entrega e insumo de las unidades termomecánicas*, UEG, INA 1-4-13, 1981.
2. Bilbao, B.: "Programa para características técnico-económicas de plantas termoeléctricas", *Rev. Control Cibernética y Automatización*, enero-julio, 1972.
3. Orero, S. O. y M. R. Irving: "Economic Dispatch of Generators with Prohibited: Operating Zones: a Genetic Algorithm Approach", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 143, No. 6, Nov., 1996.

4. Rivero, E.; L.Srapionovich and S. Ashotovich: "Aumento de la efectividad de las centrales termoeléctricas", Camagüey, 1984.
5. Rizhkin, V. Ya.: *Centrales Termoeléctricas*, Ed. Mir, Moscu, 1979.
6. Rodríguez J. L. y L.Sanchez: "Distribución óptima de carga activa en una CTE utilizando el método de la programación dinámica", *Ingeniería Energética*, Vol. XIII, No. 2, 1992.
7. Rodríguez J. L. y otros: "Distribución óptima de cargas en la CTE "Máximo Gómez", *Ingeniería Energética*, Vol. XVI, 1995.
8. Sarkisian, S. M.: "Distribución óptima de la carga entre los agregados de las termoeléctricas", *Revista Energética* No. 1, 1965, (en ruso).
9. Srinivasan, D. y A. Tettamanzi: "Heuristics-Guided Evolutionary Approach to Multiobjective Generation Scheduling", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* Vol. 143, No. 6, Nov., 1996.
10. Yang, P. C. y otros: "Scheduling Short-Term Hydrothermal Generation Using Evolutionary Programming Techniques", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* Vol. 143, No. 4, July, 1996.
11. Zhu J. Z. and Irving M. R.: "Combined Active and Reactive Dispatch With Multiple Objectives Using an Analytic Hierarchical Process", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* Vol. 143, No. 4, July, 1996.
12. *Control de Energía Indisponible. Grupo de Índices*, Grupo Técnico de Explotación (GTP), mayo, 2003.
13. *Comportamiento de los Indicadores de Emulación. Grupo de Índices*, Grupo Técnico de Explotación (GTP), mayo 11, 2003.
14. Peñalver, Jorge: "Curvas de consumo-entrega de las unidades de Mariel", Valores Actuales en el DNC, Mayo 13, 2003,
15. VALDÉS, A. Y K. GÁZQUEZ: " Balance energético y evaluación de la limpieza de los condensadores para unidades de 100 MW", Trabajo de Diploma, ISAICC, Matanzas, 1999.
16. "Tabla de correcciones", *Cuba Minbas*, Ciudad de La Habana, 1986.

AUTORES

Juan Luis Rodríguez Olivera

Ingeniero Mecánico, Máster en Energía Térmica, Asistente, Centro de Estudios de Combustión y Energía (CECYEN), Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos" , Matanzas, Cuba
e-mail:jlrolivera@cdict.umtz.cu

Alberto E. Calvo González

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:aegcalvo@mecanica.cujae.edu.cu