

# Curvas de arranque de unidades de 100 MW

**J. L. Rodríguez Olivera**

Centro de Estudios de Combustión y Energía CECYEN.  
Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".  
Carretera a Varadero km 3. Matanzas. Cuba  
E-mail:jlrolive@cdict.umtz.edu.cu

(Recibido el 12 de octubre de 1999, aceptado el 14 de enero del 2000)

## Resumen

Se exponen las principales consideraciones para los arranques de las unidades de 100 MW en función del estado térmico y se establecen modelos de comportamiento de los principales parámetros a partir de cualquier estado térmico inicial. Para ello se parte de los métodos establecidos en las instrucciones de explotación vigentes y de las curvas de arranques del fabricante. Los modelos de variación de los parámetros fundamentales permiten obtener las curvas de arranque de estas unidades para cualquier estado térmico inicial, lo que reporta una disminución en los tiempos de puesta en servicio, ahorro de combustible en los arranques, el control y evaluación de los arranques y una mayor seguridad durante la explotación de las unidades. Se presenta un software para la obtención de estos gráficos y toda la información de los arranques.

**Palabras claves:** Gráficos de arranque, unidades térmicas, turbinas de vapor.

---

## 1. Introducción

La puesta en marcha de una unidad generadora agrupa diferentes procesos de gran complejidad constituyendo la operación más importante de su funcionamiento, y juega un papel fundamental en la explotación eficiente de las mismas, destacándose en ello los consumos por arranque, pérdidas durante el arranque, y una maniobrabilidad acorde con las exigencias del sistema electroenergético nacional.

Para la puesta en marcha de las unidades generadoras están normados los gráficos de arranque que recogen las principales operaciones del proceso y caracterizan el comportamiento de los principales parámetros del bloque desde el encendido de caldera hasta alcanzar los parámetros nominales, no obstante, estos gráficos están elaborados para condiciones iniciales específicas que caracterizan tres tipos de arranques fundamentales en función de la temperatura de los metales de la turbina y que son: arranque en estado frío, arranque en estado tibio, y arranque en estado caliente.

El estado térmico de los bloques en el momento de iniciar el arranque frecuentemente no se corresponde con lo reflejado en las curvas de arranque para los tres estados anteriormente señalados, lo que plantea la necesidad de obtener estos gráficos para cada condición en particular.

En este trabajo se analizan las particularidades de las curvas de variación de los parámetros que rigen el arranque en las unidades generadoras de 100 MW, con el objetivo de establecer los modelos y consideraciones que permitan disponer de los gráficos de arranque de estas unidades para cualquier condición.

## 2. Desarrollo

Los parámetros que inciden en los arranques y que se plasman en los gráficos de arranque son:

- Presión de vapor en el domo de caldera.
- Temperatura del vapor saturado a la presión del domo.
- Temperatura del vapor sobrecalentado a la salida de caldera.
- Temperatura del vapor recalentado a la salida de caldera.
- Temperatura del metal de la línea principal de vapor (LPV), válvula de cuello, líneas de paso y válvulas de admisión.
- Temperatura de los metales de los cilindros de alta y media presión.
- Temperatura del metal de la línea de vapor recalentado.
- Presión de vacío.
- Velocidad del turbogenerador.
- Carga del turbogenerador.

En este trabajo se considera el inicio del arranque el momento en que se enciende la caldera en el caso de los arranques fríos, o el momento de comenzar a hacer vacío en el caso de los arranques desde un estado no enfriado. En todos los casos se consideran realizadas las actividades del prearranque y la totalidad de los sistemas y equipos en óptimas condiciones.

En el arranque de estas unidades es necesario la existencia de vacío en el condensador desde el momento del encendido de caldera.

En este trabajo no se considera la variante de un arranque aislado por lo que se dispone de vapor en los cabezales de servicios propios y de sellos.

El proceso de hacer vacío esta en dependencia de las operaciones del personal, del estado técnico y funcionamiento de los eyectores y sistema de sellaje, de los parámetros del vapor de trabajo, y de la hermeticidad en el condensador y el sistema de tuberías. Según las normas de explotación, el proceso de hacer vacío hasta 500 mm Hg se obtiene en 30 minutos para condiciones herméticas en el condensador. Analizando estos factores y sobre la base de la experiencia del personal de explotación de las centrales termoeléctricas (CTE), se considera que el proceso de hacer vacío hasta 300 mm Hg, demora como promedio 20 minutos, lo que se corresponde con la norma de turbina que plantea se debe lograr un vacío de 540 mm Hg en 35-40 minutos.

En este trabajo se considera una variación del vacío promedio de 13.5 mm de Hg/min. El comportamiento del vacío se representa lineal hasta 540 mm de Hg, condición necesaria para el rodaje de turbina.

En el caso de un arranque desde el estado frío, coinciden los momentos de inicio de la toma de vacío y encendido de caldera, ya que el tiempo en que la caldera demora en calentar el agua y comenzar la evaporación, y evacuar los gases del sistema de cabezales y tuberías a la atmósfera, es suficiente para crear al menos 300 mm de Hg de vacío en el condensador, condición necesaria para comenzar a evacuar hacia el mismo la evaporación de la caldera a través de la reductora de presión y temperatura (RPT) 140/6.

En el caso de un arranque desde un estado no enfriado con presión aun en el domo de la caldera no es necesario evacuar los gases a la atmósfera, iniciándose el arranque con la subida de vacío y el posterior encendido de caldera con 300 mm de Hg de vacío en el condensador. Con esta presión de vacío ya es posible conectar la RPT 140/6 y apoyar la evaporación de la caldera.

A pesar de que las normas de operación [1,4] plantean la necesidad de 500 mm de Hg como vacío mínimo para el encendido de caldera y la puesta en servicio de la RPT 140/6, en la practica ello no se cumple debido a las dificultades con la creación del vacío en las unidades de 100 MW durante los arranques, lo que obliga a los

operadores a proceder con un vacío menor que en este caso es de 300 mm de Hg.

Una vez encendida la caldera la atención del arranque se centra en lograr los parámetros de presión y temperatura del vapor sobrecalentado para iniciar el rodaje de turbina.

La presión necesaria en el domo para el rodaje de la turbina en el caso de los arranques fríos es de 15 ata, lo cual garantiza una presión de 7-12 ata a la entrada de turbina. En el caso de los arranques no fríos la presión del vapor sobrecalentado para el rodaje de la turbina debe ser la mas baja posible, pero no menor de 15 ata. Con este valor mínimo se garantiza el funcionamiento de la RPT 140/12 y el suministro de vapor al cabezal de servicios propios.

De esta forma se establece que para una presión inicial menor de 15 ata, la presión de rodaje necesaria en caldera será de 15 ata, mientras que en un arranque con una presión inicial en el domo superior a 15 ata, se debe mantener esta constante hasta el final del rodaje de turbina. Una vez terminado el rodaje de turbina y la sincronización, el aumento de presión y la temperatura de saturación se realiza según el gráfico dado por el fabricante.

La velocidad de variación de la presión en el domo de la caldera y de la temperatura de saturación del vapor se muestra en la figura 1, donde la velocidad de aumento de la temperatura de saturación es de 1.5 °C/min.

Las expresiones que relacionan la dependencia entre latemperatura de saturación y la presión del vapor de agua son las propuestas por Irvine Thomas F. y Liley Peter E en [5].

Al igual que la presión a la entrada de turbina y un vacío de al menos 540 mm Hg, para el inicio del rodaje de turbina es necesario determinado valor de temperatura en el vapor sobrecalentado.

La temperatura del vapor sobrecalentado para iniciar el rodaje y la temperatura del vapor recalentado para completar el mismo, dependen del estado térmico de la turbina, es decir, de la temperatura de los metales de los puntos mas calientes de los cilindros de alta y media presión como se aprecia en la Fig. 2.

De forma general se cumple que la temperatura de los vapores sobrecalentado y recalentado deben ser entre 80 y 100 grados mayores que las temperaturas de los cilindros de alta presión y media presión respectivamente.

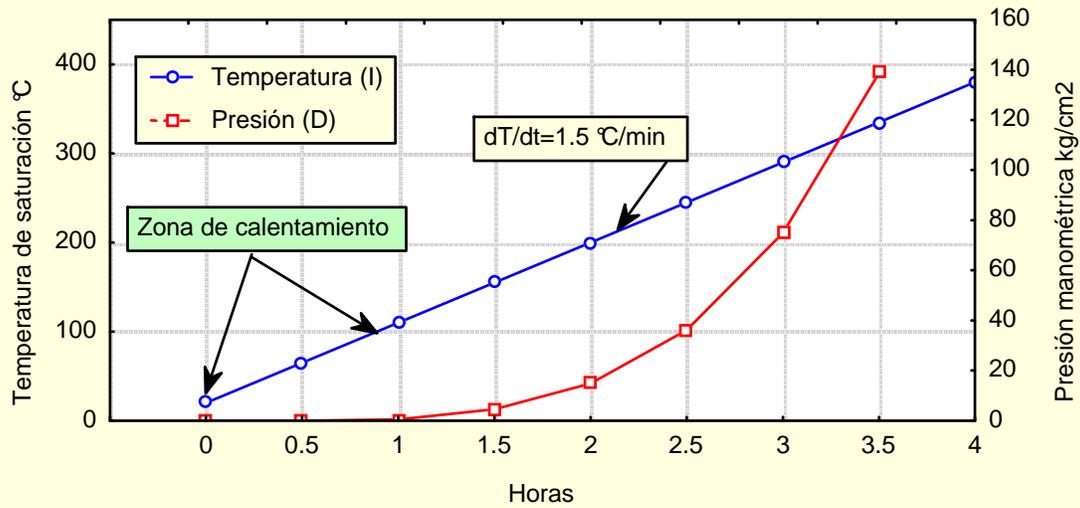
Los modelos obtenidos a partir del gráfico anterior son:

$$T_{vv} = 98.696 + 1.009 \cdot TCAP$$

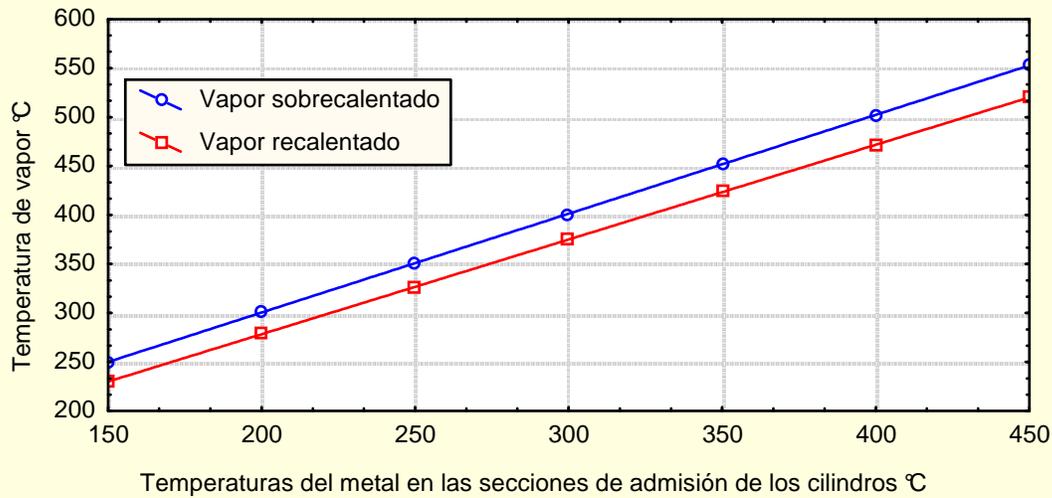
$$T_{vr} = 84.957 + 0.967 \cdot TCMP$$

Donde,  $T_{vv}$  y  $T_{vr}$ , son las temperaturas de vapor vivo o sobrecalentado y recalentado;  $TCAP$  y  $TCMP$ , son las temperaturas de los cuerpos de alta y media presión respectivamente.

**Figura 1. Gráfico de elevación de la presión en el domo de la caldera durante el encendido.**



**Figura 2. Dependencia de las temperaturas de vapor a los cilindros de turbina en función de la temperatura de los metales.**



Para el caso del vapor sobrecalentado se debe considerar un tiempo de respuesta entre el encendido de caldera y la variación de temperatura del vapor de 5 minutos aproximadamente.

Una vez encendida la caldera en el caso de un arranque no enfriado o al inicio de la evaporación durante un arranque frío, las velocidades de incremento de la temperatura del vapor sobrecalentado a la salida de caldera, según se plantea en [2], son:

★ 9 °C/min. para temperaturas inferiores de 400 °C.

★ 6 °C/min. para temperaturas entre 400 y 500 °C.

★ 4 °C/min. para temperaturas mayores de 500 °C.

La elevación de temperatura del vapor sobrecalentado se realiza controlando la carga térmica del horno.

En caso de un arranque frío el momento de inicio del aumento de temperatura del vapor sobrecalentado coincide con el inicio de la evaporación donde el vapor parte de 100 °C con presión manométrica de 0 atm. En caso de un arranque desde un estado no enfriado, el aumento de la temperatura del vapor sobrecalentado se

produce con cierto retraso con relación al encendido de caldera y a partir de la temperatura de saturación que tenga la caldera.

La subida de temperatura se realiza hasta la temperatura de rodaje de turbina donde debe estabilizarse hasta el momento del sincronismo para después continuar subiendo hasta los parámetros nominales (540 C).

Para poder realizar el rodaje de turbina no solo es necesario una temperatura de vapor sobrecalentado a la entrada de turbina, sino, es preciso calentar la línea principal de vapor, la válvula de cuello, las líneas de paso y las válvulas de regulación. El comienzo del calentamiento de la línea principal de vapor (LPV) ocurre posterior al aumento de temperatura del vapor sobrecalentado a la salida de caldera. En caso de arranques con presión en el domo menor de 15 ata, 5 minutos después del encendido e iniciación del vacío,

comienza a subir la temperatura del vapor vivo y posteriormente la temperatura de la línea principal de vapor con un retraso de 5 minutos con relación a la temperatura del vapor. El calentamiento de la línea principal de vapor se realiza con el paso del vapor y la apertura de los vents y drenajes. En el momento de tener 300 mm de Hg de vacío en el condensador, se pone en servicio la reductora de presión y temperatura (RPT) 140/6 aumentando el flujo a través de la línea y la evaporación de la caldera.

Las pendientes de incremento de temperatura del vapor sobrecalentado y los metales de la línea principal de vapor son similares por lo que ambas se grafican casi paralelas con un retraso en el caso de la temperatura de la línea de vapor.

Las pendientes de subida de temperatura de las diferentes partes durante el proceso de arranque del bloque aparecen en la tabla No. 1

**Tabla 1** Incrementos de temperatura admisibles en °C/min

Elementos	Intervalos de temperatura en °C				
	hasta 200	200-300	300-400	400-500	más de 500
Línea principal de vapor.	10	8	6	4	3
Válvulas de cuello	3	2	1.5	1	0.6
Tuberías de paso	12	10	8	6	3
Válvulas de admisión	10	8	6	4	3
Válvulas vapor recalentado	12	10	8	6	3
Cuerpo de alta presión	3	2	1.5	1	0.6
Cuerpo de media presión	3	2	1.5	1	0.6

Una vez que la temperatura del vapor sobrecalentado, o mejor, la temperatura de la línea principal de vapor se iguale a la temperatura del metal de la válvula de cuello, se procede al calentamiento de esta.

El calentamiento de la línea principal de vapor, válvula de cuello, tuberías de paso y válvulas de admisión, en un arranque frío se realiza al unísono, con todos los drenajes abiertos y controlando las pendientes de subida de temperatura en cada elemento.

En todos los casos el calentamiento de la válvula de cuello se realiza conjuntamente con las tuberías de paso y las válvulas de regulación.

La temperatura mínima del vapor sobrecalentado para el rodaje de turbina es de 250 °C en los arranques fríos con temperaturas en los metales de turbina menores de 150 °C y con una presión a la entrada de turbina de 7-12 ata.

En todos los casos la temperatura del metal de la válvula de cuello y las tuberías de paso debe ser mayor en 15 - 20 °C a la temperatura de saturación del vapor a la presión dada. Esta condición obliga a mantener un valor de temperatura en los metales de la válvula de cuello y tuberías de paso para el rodaje de turbina superior a la temperatura de saturación a la presión de rodaje en al menos 20 °C. La temperatura del vapor

recalentado necesaria para completar el rodaje de turbina, se comienza a buscar desde el momento de inicio del rodaje. Esta temperatura es la que debe tener el vapor recalentado antes de abrir las válvulas de admisión del cuerpo de media presión de turbina.

Este calentamiento se efectúa con el paso del propio vapor por las líneas de recalentamiento intermedio y la acción de los drenajes y válvulas de desvaporización de estas líneas, siendo necesario además su aceleración por parte de los operadores de la CTE, lo cual se realiza variando las r.p.m. de la máquina para lograr un mayor flujo de vapor a turbina y propiciar el calentamiento del vapor recalentado. Las variaciones de r.p.m. de turbina se realizan entre 1000 y 2500 r.p.m. sin estabilizar dicha velocidad, además se varía la presión de este vapor. El tiempo mínimo de incremento de la temperatura del vapor recalentado hasta los parámetros de rodaje se logra siguiendo las pendientes de calentamiento de las tuberías y válvulas de admisión del cuerpo de media presión.

El momento de inicio del rodaje de turbina es aquel en el cual se tienen todas las condiciones creadas, específicamente un vacío mayor de 540 mm de Hg, presión y temperatura de rodaje en el vapor

sobrecalentado, y temperatura adecuada en la válvula de Estos procesos de incremento de vacío, subida de presión y temperatura en el vapor sobrecalentado, y calentamiento de válvula de cuello y tubos de paso, tienen diferente duración por lo que el de mayor duración será quien defina el momento de inicio del rodaje.

Como se observa en la figura 3, existe una dependencia del tiempo de aumento de velocidad de rotación de los rotores de la turbina hasta 3600 r.p.m. en función de la temperatura del metal del cilindro de alta presión (CAP) en la sección de admisión del vapor, sin

cuello y tuberías de paso del cuerpo de alta presión. considerar el tiempo de calentamiento de las tuberías de recalentamiento.

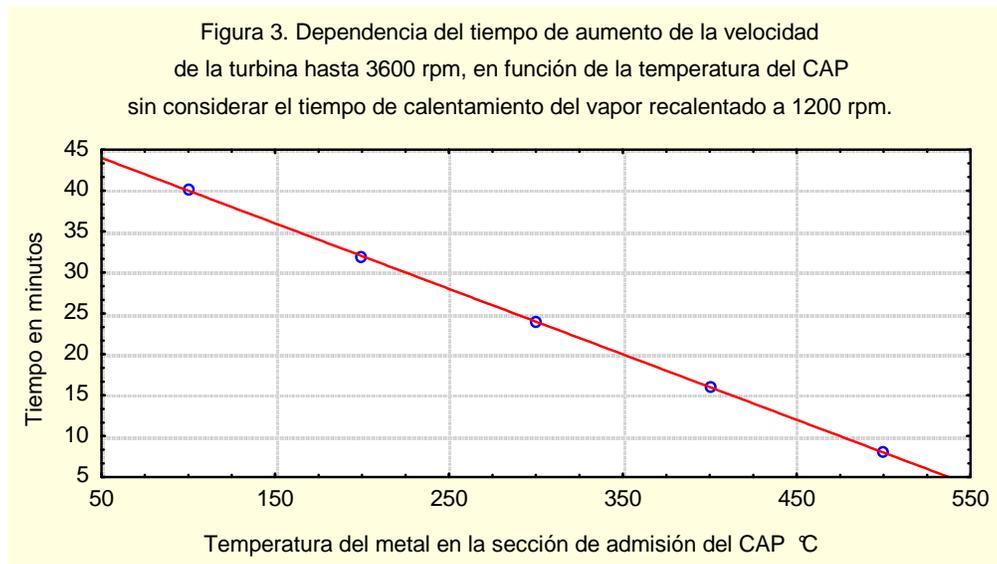
El modelo matemático que muestra esta relación es:

$$Tr = 48 - 0.08 \cdot TCAP$$

válido para temperaturas entre 100 y 500°C.

Donde, Tr es el tiempo de rodaje de turbina hasta 3600 r.p.m., en minutos.

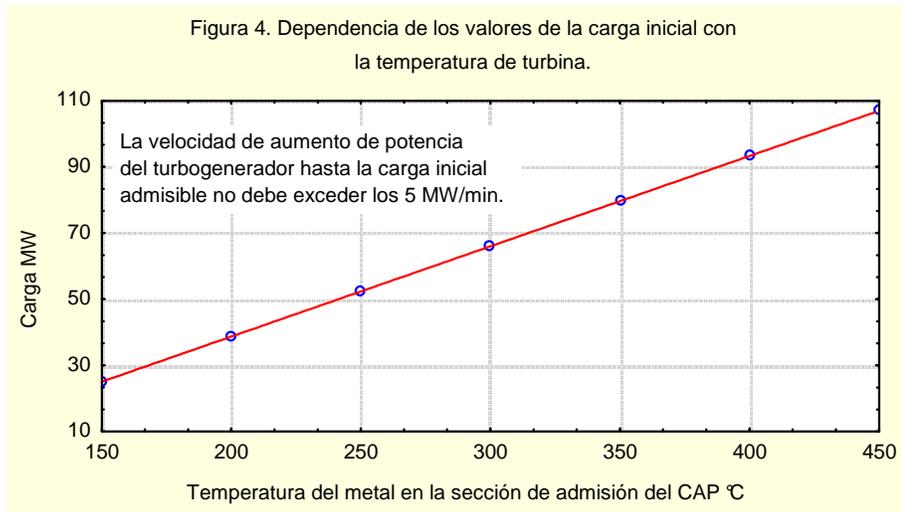
De esta manera se determina, a partir de la temperatura mayor del metal del cuerpo de alta presión, la razón de incremento de velocidad en r.p.m. que admite la turbina.



Durante el rodaje de turbina se realiza una parada en 500 r.p.m. y otra en 1000 r.p.m. El tiempo de subida de 0 a 500 r.p.m. se determina en función de la razón de incremento obtenida por el modelo anterior, al igual que el tiempo de subida de 500 a 1000 r.p.m. En 500 r.p.m. se realiza un chequeo del funcionamiento de turbina de aproximadamente 5 minutos y en 1000 r.p.m. se comienza el proceso de búsqueda de la temperatura del vapor sobrecalentado para el rodaje por el cuerpo de media presión. Este proceso está en dependencia de las velocidades admisibles de calentamiento de las líneas de vapor recalentado y de la temperatura del metal del cuerpo.

Una vez lograda la temperatura del vapor recalentado necesaria, se abren las válvulas de admisión del cuerpo de media presión y se sube hasta 3600 r.p.m. con la misma razón de incremento de velocidad de rotación. En 3600 r.p.m. se procede al sincronismo de la máquina con el sistema electroenergético nacional.

La temperatura de los metales de los cuerpos de alta y media presión durante el proceso de sellaje de turbina no sufre variaciones considerables, siendo el inicio del rodaje, con la apertura de las válvulas de admisión y la entrada del flujo de vapor, el momento en que se comienzan a incrementar las temperaturas en todos los puntos de turbina, debido al calor aportado por el vapor.



Estas pendientes de temperatura garantizan el comportamiento adecuado de las expansiones relativas de turbina y son una guía para el incremento de potencia en el turbogenerador durante el arranque. El control de estas pendientes se realiza desde el rodaje de la máquina, actuando sobre la velocidad de la turbina, los tiempos de rodaje y toma de carga, y los parámetros del vapor.

Existe una dependencia entre los valores de la carga inicial a tomar en el momento del sincronismo con la temperatura del metal del CAP como se muestra en la figura 4.

El modelo que refleja esta relación es:

$C_i = -15.909 + 0.273 \cdot TCAP$ , válido para temperaturas entre 150 y 450 °C;

Donde  $C_i$ , es la carga inicial que puede tomar la turbina en función de la temperatura de los metales, con una velocidad no mayor de 5 mw/min.

Esta relación permite determinar el valor de la carga inicial a tomar en dependencia de la temperatura del metal del CAP. La toma de carga se realiza a razón de 2.5 MW/min. que es la pendiente recomendada, y posteriormente se continua la subida de carga en función de las temperaturas de los cilindros que determinan las expansiones relativas y los esfuerzos admisibles durante la carga del turbogenerador.

Este análisis se realiza de forma independiente para cada parámetro, no obstante en modo alguno se descuida la lógica dependencia e interacción entre ellos, y se tiene en cuenta las condiciones necesarias para las diferentes operaciones.

Debido a que el tiempo es variable, es necesario la determinación de un factor de escala, el cual se calcula teniendo en cuenta el tiempo total de subida de temperatura en los metales de turbina hasta su valor

nominal, lo que se considera determinante para llevar el proceso a la escala de trabajo a utilizar en la pantalla de la computadora.

En la pantalla, como resultado de la ejecución del programa, aparece finalmente el gráfico de arranque para el estado térmico particular analizado, compuesto de un sistema de ejes coordenados que relacionan los parámetros de temperatura en °C, presión en ata, vacío en mm de mercurio, velocidad en r.p.m. y potencia activa en MW, todo ello en el eje y, mientras en el eje x se pone la escala de tiempo con divisiones cada 10, 30, y 60 minutos para una mejor interpretación del esquema.

El programa de computación permite conocer la secuencia lógica de aumento de los distintos parámetros del bloque, a partir de cualquier estado térmico inicial de la unidad como se muestra en las siguientes figuras, 5, 6, y 7, ejemplos de corridas del programa.

### 3. Conclusiones

El análisis de las instrucciones de explotación y gráficos de arranques de las unidades de 100 MW permite diferenciar los arranques en dos situaciones generales, arranque desde el estado frío y arranque desde un estado no enfriado, donde la existencia de presión en caldera es determinante en el inicio del arranque.

Los gráficos de arranque constituyen una ayuda importante para la operación de las unidades obteniéndose, de esta forma, una guía segura y cómoda para el trabajo del personal durante la puesta en servicio desde cualquier estado térmico inicial. El programa ofrece los parámetros óptimos del vapor para el rodaje de turbina (presión y temperatura) y, para una hora

inicial dada se obtienen las horas de encendido de caldera, inicio de rodaje, sincronismo y completamiento de carga, lo que permite pronosticar la hora en que se debe comenzar a preparar el esquema de arranque de la unidad y realizar el encendido de la caldera, conociendo para ello la hora de sincronización de la máquina al sistema electroenergético nacional solicitada por el despacho, u otra hora de referencia. Además, muestra al operador las pendientes de subida de parámetros y los tiempos según los modelos teóricos, y finalmente permite chequear los arranques y el comportamiento de los parámetros reales.

La implementación de este programa en las unidades de 100 MW reporta una mayor seguridad en la operación, la disminución de los tiempos de arranque y consumos de combustible, la reducción del peligro de averías por mala operación, y una mejor planificación de la labor del despacho nacional de cargas.

## 4. Bibliografía

- 1.- Instrucción de Operación y Explotación. Instrucción de Explotación de Turbina K-100-130-3600/2, INE 1-02-61, 1987.
- 2.- A. Carbonell, B. Basiuk: Instrucción Provisional para el Arranque y Parada de los Bloques de 100 MW, TECENERGO, Ciudad de la Habana, 1990.
- 3.- M. Mons Pérez: Modelación Matemática de los Regímenes de Arranque de las Unidades de 100 MW de la CTE "Máximo Gómez", Trabajo de Diploma, Universidad de Matanzas, 1990.
- 4.- Norma de Empresa. Explotación de Turbina K-100-130-3600/2. NEIB 1091:070, Empresa de Generación "Máximo Gómez", 1987.
- 5.- Irvine Thomas F., Liley Peter E: Steam and Gas Tables with Computer Ecuations, Orlando Academic Press, 1984.

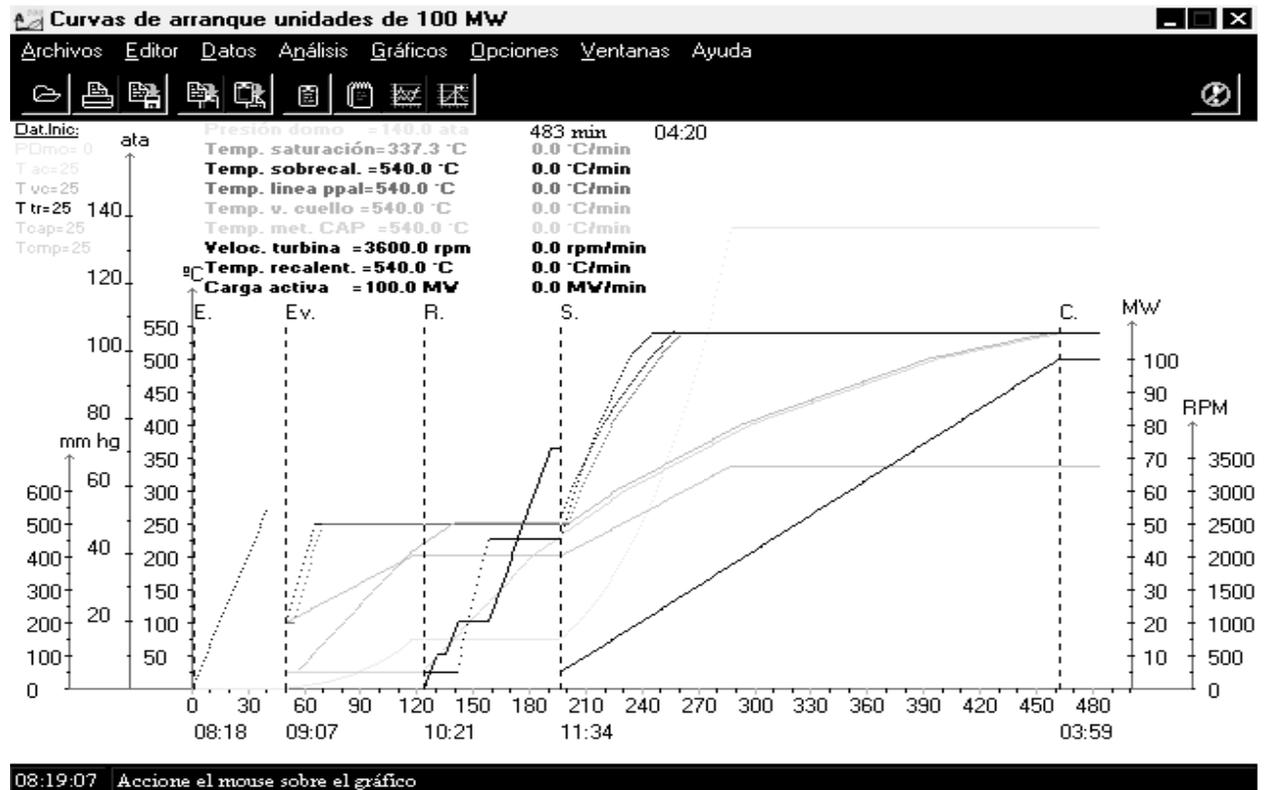


Fig.5. Gráfico de arranque frío de un bloque de 100 MW.

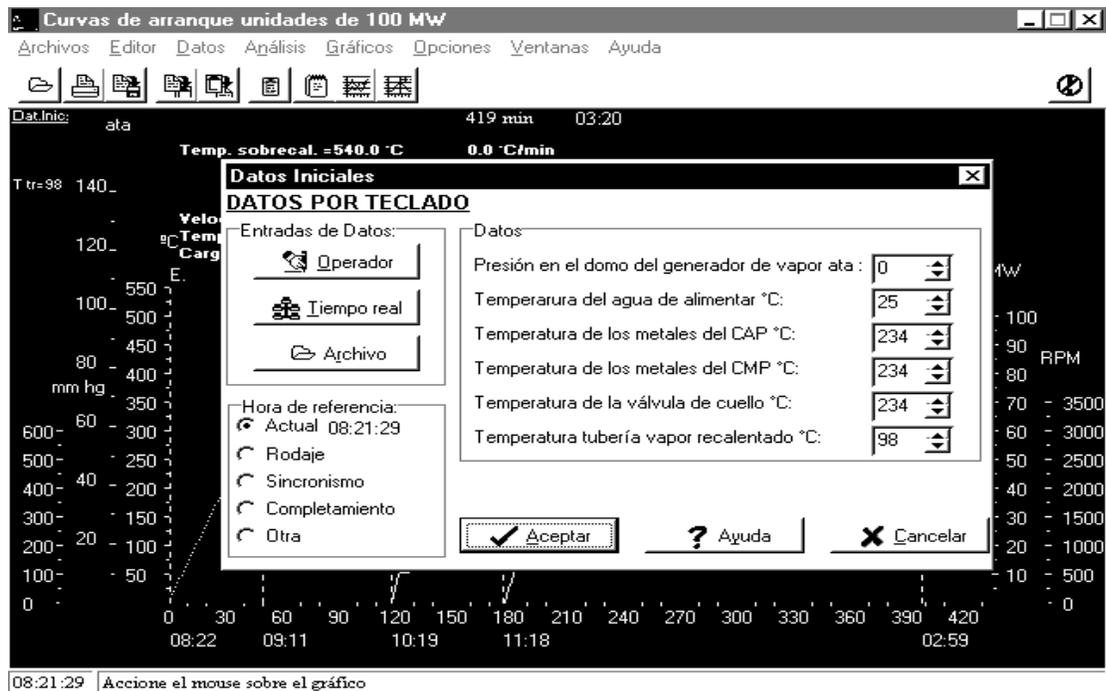


Fig. 6. Pantalla de datos iniciales para el arranque.

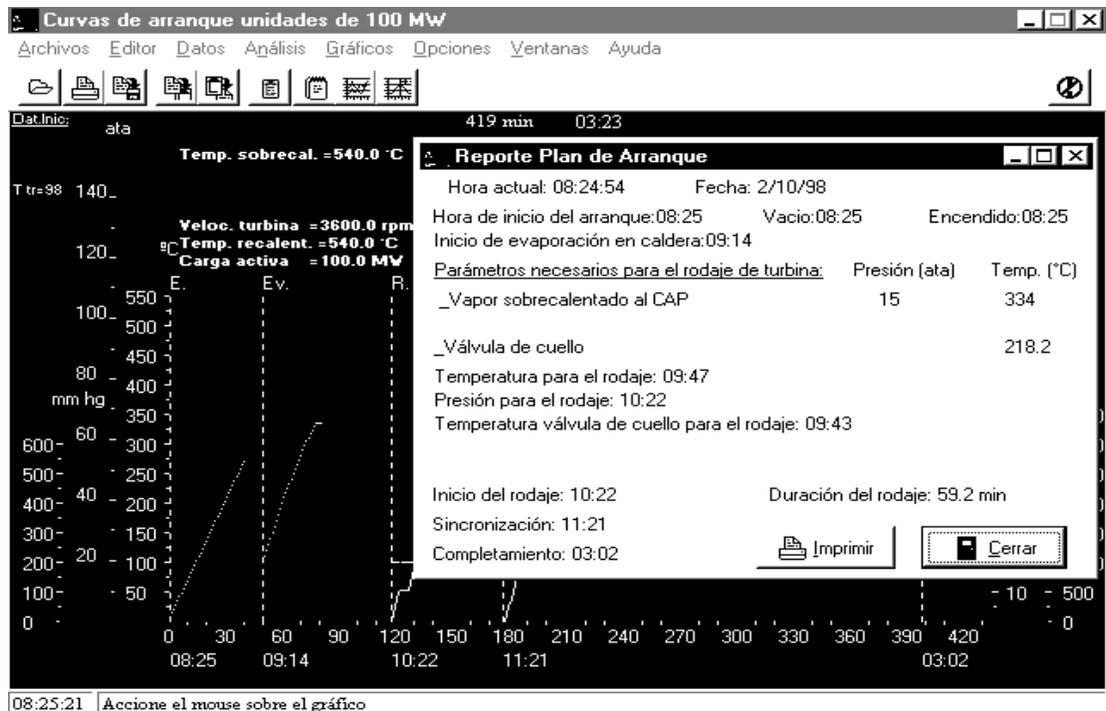


Fig.7. Pantalla de resultados.

## Starting Graphs of generating units of 100 MW.

### Abstract

The principal considerations for the starting of the 100 MW units are exposed in function of thermal state and behavior models are established of principal parameters from any thermal initial state are established.

The work is based on the performance instructions of stablished methods and starting graphs supply by the manufacturer. The variation models of fundamental parameters allow us to obtain the base curves of these units for any thermal initial state. Also allow: a diminution in the set times of put on line, saving fuel, evaluation and control of the starting stage and a great security during the service of these generating units. A software that allowed to obtain all the starting information and the suitable graphs is exposed.

**Key words:** Starting graphs, thermal generating units, steam turbine, power plants.

---

# II Encuentro Internacional de Informática, Matemática y Dibujo para la Ingeniería Mecánica



Septiembre 12 – 15, 2000, La Habana, Cuba

---

### TEMAS PRINCIPALES

---

Didáctica de la Ingeniería Mecánica, Matemática Aplicada, Informática, Dibujo y Técnicas de CAD, Relación entre la Universidad y la Empresa, Creación de Valores en el Estudiantado.

---

### Para enviar trabajos o solicitar información adicional

---

Comité Organizador CCIM'2000  
Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba  
Teléfono: (537) 20 2267 Fax: (537) 27 1208  
E-mail: Grafica@mecanica.ispjae.edu.cu  
ccim@mecanica.ispjae.edu.cu  
lucy@mecanica.ispjae.edu.cu

---