

# DETERMINACIÓN ANALÍTICA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA TOTAL AL FLUIDO EN LA DINÁMICA DEL MOVIMIENTO DE LA CIRCULACIÓN NATURAL DE GENERADOR DE VAPOR

Luis Vázquez Seisdedos\*, Luis Oliva Ruiz\*, Edward E. Madariaga Santaló\*\*, Antonio Pons Hernández\*, Pedro Pacheco Bertot\*

\*Universidad de Oriente, \*\*Central Termoeléctrica "Antonio Maceo" (Renté)

*Se formula analíticamente la determinación del coeficiente de resistencia total al fluido en la dinámica del movimiento de la circulación natural de generador de vapor en función de los parámetros constructivos del circuito hidráulico y los valores de las variables fundamentales de operación. Los resultados mostrados responden a datos reales de la Central Termoeléctrica "Antonio Maceo" de la ciudad de Santiago de Cuba. Los cálculos son automatizadamente ejecutados mediante funciones desarrolladas sobre Matlab.*

**Palabras clave:** modelos para procesos, hidrodinámica del generador de vapor de circulación natural.

*It is formulated analytically the determination of the coefficient of total resistance to the fluid in the dynamics of the movement of the natural circulation of generator of vapor in function of the constructive parameters of the hydraulic circuit and the values of the fundamental variables of operation. The discussed results correspond to real data of the Thermoelectric Power Station "Antonio Maceo" of Santiago de Cuba city. The calculations are executed automatically by means of functions developed on Matlab.*

**Key words:** process modeling, hydrodynamics of the generator of vapor of natural circulation.

## Introducción

El generador de vapor con domo de circulación natural es ampliamente empleado en Cuba y en el mundo. La constante necesidad de ahorrar los recursos energéticos del planeta promueve la dedicación y el interés de mejorar su operación eficiente. /1/

Para fines de ingeniería en control automático, en /2-3/ se aborda la dinámica de generadores de vapor en variables de estado. Dos reflexiones realizadas por expertos del campo del control de procesos motivaron esta ponencia. De un lado /4/ afirma que "las interrelaciones entre variables en estado de régimen estacionario son las más importantes, porque ellas determinan la estabilidad fundamental de los modos de operación del proceso. El conocimiento del proceso es un pre-requisito para el diseño efectivo de un sistema de control". De otro lado /5/ reconoce que aunque existe una evidente contradicción entre la práctica corriente del control de termoeléctricas y

la literatura científica, que propone estructuras de control para esas plantas, el uso de modelos interpretados como el desarrollado por /2/ deviene en una herramienta importante para explicar la dinámica fundamental. Acerca del control de centrales termoeléctricas basado en modelo existe vasta experiencia; entre ellas en /6/.

En particular, el artículo se propone formular analíticamente la determinación del coeficiente de resistencia total al fluido en la dinámica del movimiento de la circulación natural de generador de vapor, en función de los parámetros constructivos del circuito hidráulico y los valores de las variables fundamentales de operación. Esta formulación es evaluada para valores reales de la Central Termoeléctrica "Antonio Maceo" de la ciudad de Santiago de Cuba.

## Fundamentación teórica

El generador de vapor con domo de circulación natural es representado en la figura 1, la cual

muestra de modo gráfico a las variables posteriormente empleadas. El flujo de agua  $q_{dc}$  baja del

domo por varias secciones de tubos descendentes hasta los cabezales inferiores sin recibir calor.

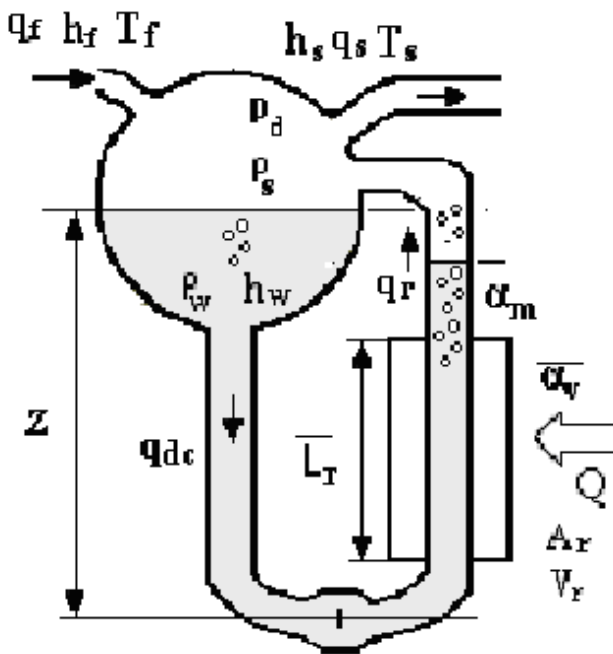


Fig. 1 Sistema de referencia general.

El calor irradiado  $Q$  por el medio que envuelve al volumen del hogar es recibido por el agua a través de las paredes, para elevarle su temperatura hasta saturación y posteriormente formar la mezcla agua-vapor. El proceso de transferencia de calor se lleva a cabo en los haces de tuberías ascendentes. Este flujo de masa de la mezcla  $q_r$  ascenderá debido a la diferencia de densidades del líquido que desciende con dicha mezcla ascendente que resulta.

La entrada al domo del flujo de mezcla agua-vapor proveniente de los tubos de ascenso se efectúa a través de una batería de ciclones que actúan como separadores de la humedad del vapor de agua. Este vapor pasará por otros tipos de separadores de modo que a la salida del domo se entregue vapor saturado seco.

La dinámica del generador de vapor considerada está en /2/. El modelo de cuarto orden obtenido está expresado mediante las siguientes variables de estado:

- $V_{wt}$ : volumen total de agua;
- $P_d$ : presión en el domo;

- $a_m$ : fracción en masa del vapor en la mezcla a la salida de los tubos de ascenso;
- $V_{sd}$ : volumen de vapor en el domo por debajo de la superficie mojada.

### Dinámica del movimiento de fluido en la circulación natural

La dinámica del flujo de circulación natural establecida en /2/ como resultado de un balance de *momentum* es como sigue:

$$\left( L_T + L_{dc} \right) \frac{dq_{dc}}{dt} = \left( \rho_w - \rho_s \right) \alpha_v V_r g - \frac{K}{2} \frac{q_{dc}^2}{\rho_w A_{dc}} \quad (1)$$

siendo:

$\rho_w$  y  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>]: densidad del agua y vapor saturado respectivamente.

Los parámetros constructivos están descritos en la tabla 1.

La fracción media en volumen del vapor en la mezcla de los tubos elevadores,  $\alpha_v$ , se determina mediante:

$$\bar{\alpha}_v = \frac{\alpha_m}{\eta} \left[ 1 - \frac{1}{\eta} \ln(1 + \eta) \right] \quad (2)$$

donde:

$$\eta = \frac{(\rho_w - \rho_s) \alpha_m}{\rho_w} \quad (3)$$

El problema fundamental es deducir la dependencia del coeficiente 'K' en función de los parámetros constructivos del circuito hidráulico, donde se establece la circulación natural. La sensibilidad que sobre su cálculo le ocasionan la presión ( $P_d$ ) y la demanda ( $q_s$ ) durante operación y la correspondiente influencia de su variabilidad sobre la relación estática entre demanda y coeficiente de fracción en masa ( $\alpha_m$ ) de vapor en la mezcla.

## Métodos utilizados

Existen dos formas de formalizar la causa de la circulación natural:

- Considerando la diferencia entre la densidad del agua que llega de los tubos de alimentación a los tubos elevadores y la densidad media de la mezcla que resulta del calor recibido,  $\rho_w$  y  $\rho_M$  respectivamente. Está en /7/, y es dedicada al diseño y operación de generadores de vapor.
- Asumiendo que en los tubos de ascenso el agua y el vapor quedan distribuidos de modo separado según  $\alpha_v$  (coeficiente de fracción volumétrica media), la fuerza ascensional que rige la circulación natural se estima a partir de la diferencia de las densidades del agua ( $\rho_s$ ) y del vapor ( $\rho_w$ ) que resulta de Q. Es la considerada en esta ponencia, y la vía propuesta para deducir su método de cálculo es como sigue:

El balance de energía tiene dos términos básicos:

- De origen por energía potencial,  $E_z$ : explica el momento de ascenso,  $F_a$ , generado por el gradiente de densidades y descrito mediante la ecuación (4).
- De origen por energía cinética,  $E_c$ : explica el momento de fricción  $F_p$ , el cual es descrito mediante la ecuación (8).

$$F_a = (\rho_w - \rho_s) g \alpha_v V$$

Las pérdidas por fricción expresadas en altura de la columna de agua,  $h_p$ :

$$h_p = f \frac{Lv^2}{D2g} \quad (5)$$

siendo la velocidad:

$$v = \frac{q_{dc}}{A_{dc} \rho_w} \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) se obtiene:

$$h_p = f \frac{L}{D} \frac{q_{dc}^2}{2gA_{dc}^2 \rho_w^2} \quad (7)$$

$$F_p = h_p A_{dc} \rho_w g \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (8) se obtiene:

$$F = f \frac{L q_{dc}^2}{D 2A_{dc} \rho_w} \quad (9)$$

Comparando el resultado obtenido en la ecuación (9) con el segundo término de la ecuación (1) se concluye que:

$$K = f \frac{L}{D} \quad (10)$$

La estimación del coeficiente de fricción  $f$  se realiza mediante la ecuación de Blasius /8/:

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,24}} \quad (11)$$

El número de Reynold,  $Re$ , es:

$$Re = \frac{q_{dc} \sqrt{\frac{4A_{dc}}{\pi N_{dc}}}}{A_{dc} \mu_w} \quad (12)$$

Los términos  $A_{dc}$  y  $N_{dc}$  son la sección transversal y el número de tubos alimentación respectivamente;  $\mu_w$  es la viscosidad del agua.

De la ecuación (10), el cociente ( $L/D$ ) se estima considerando los efectos individuales de

cada parte del circuito hidráulico a través de sus longitudes equivalentes.

Tomando las condiciones en régimen estacionario de la ecuación (1) ha de cumplirse que el coeficiente 'K' es:

$$K = \frac{2\rho_w A_{dc} (\rho_w - \rho_s) g \alpha_v V_r}{q_{dc}^2} \quad (13)$$

El flujo de vapor  $q_{cd}$  requerido para elevarle la temperatura al flujo de agua de alimentación  $q_f$  hasta la temperatura de saturación es:

$$q_{cd} = \frac{h_w - h_f}{h_c} q_f \quad (14)$$

siendo  $h_w$ ,  $h_f$  y  $h_c$  las entalpías del agua líquida en saturación, del agua sub-enfriada y del calor latente del vapor a la presión correspondiente expresado en [kJ/kg].

El flujo de vapor  $q_{sr}$  obtenido en los tubos de ascenso:

$$q_{sr} = q_s + q_{cd} \quad (15)$$

El flujo de vapor saturado a la salida del domo es  $q_s$ .

El flujo de agua que recicla, que es  $q_{dc}$ , se determina como sigue:

$$q_{dc} = q_{sr} \frac{(1 - \alpha_m)}{\alpha_m} \quad (16)$$

El coeficiente de fracción de vapor en la mezcla  $\alpha_m$  es el de operación.

Para la determinación unívoca de  $\alpha_m$ , hay que iterar a las ecuaciones (14), (15), (16) y (2) hasta que se cumpla la igualdad en K de las ecuaciones (10) y (13).

A modo de chequeo automatizado de rangos permisibles para  $\alpha_m$ , se emplea un criterio cuantitativo para determinar la presión máxima de operación, a partir de la cual se corre el riesgo de producirse ampollamiento de tuberías por razones de la destrucción de la película de agua, y en su lugar todo sería vapor. El coeficiente máximo de fracción volumétrica del vapor en la mezcla,

$\alpha_{vM}$ , queda definido // por la presión de operación en el domo según:

$$\alpha_{vM} = 0,80 - 0,00013(P_d - 250) \quad (17)$$

$P_d$ : está comprendida entre 250–2 500 lb/pulg<sup>2</sup> (absoluta).

En términos de fracción en masa (en lugar de volumétrica como anteriormente) de vapor en la mezcla máximo  $\alpha_{mM}$  podrá ser estimado mediante:

$$\alpha_{mM} = \frac{\rho_s \alpha_{vM}}{\alpha_{vM} (\rho_s - \rho_w) + \rho_w} \quad (18)$$

La tabla 1 sugiere la toma de datos de la instalación real.

Tabla 1  
Guía para la colección de datos de entrada

| Dato                       | Significado                             |
|----------------------------|---|
| <b>CIRCUITO HIDRAÚLICO</b> |   |
| $N_{dc}$                   | Número de tubos que bajan.              |
| $A_{dc}$                   | Sección transversal de tubos que bajan. |
| $d_{dc}$                   | Diámetro interior de un tubo que baja   |
| $L_{dc}$                   | Longitud media de los tubos que bajan.  |
| $V_{dc}$                   | Volumen total de los tubos que bajan.   |
| $V_r$                      | Volumen total de los tubos que suben.   |
| $L_r$                      | Longitud media de los tubos que bajan.  |
| $d_r$                      | Diámetro interior de un tubo que sube.  |
| <b>DATOS DE OPERACIÓN</b>  |   |
| $P_d$                      | Presión en el domo.                     |
| $q_s$                      | Flujo másico del vapor saturado.        |
| $T_f$                      | Temperatura del agua de alimentación.   |

Las propiedades termodinámica:  $\rho_w$ ,  $\rho_s$ ,  $h_c$ ,  $h_w$ ,  $h_s$ ,  $T_s$ ,  $\mu_w$ ,  $h_f$  se introducen mediante curvas de ajuste.

## Resultados y su evaluación

Un conjunto de aplicaciones fueron desarrolladas sobre MatLab 5.3. Aprovechando el entorno de conectividad con el 'Excel – link' se listan:  
- 'polyfitone'.m': ajusta data simple variada mediante aproximación polinomial. Permite la aproximación de cada propiedad termodinámica del agua en saturación que exige la función siguiente:

- Funatodi.m': Determina analíticamente a K para cada punto de operación establecido por  $T_f, q_s, P_d$ .

Los datos constructivos y del fabricante correspondientes a un generador de vapor de 100 MW son los siguientes:  $N_{dc}=25, A_{dc}=0,658 \text{ m}^2, d_{dc}=0,183 \text{ m}, L_{dc}=27 \text{ m}, V_{dc}=18 \text{ m}^3, V_r=24,3 \text{ m}^3, L_r=20 \text{ m}, d_r=0,183, P_d=145,0 \text{ kg/cm}^2, q_s=340 \text{ t/h}, T_f=220 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La sensibilidad que sobre su cálculo le produce la presión ( $P_d$ ) se muestra en la figura 2.

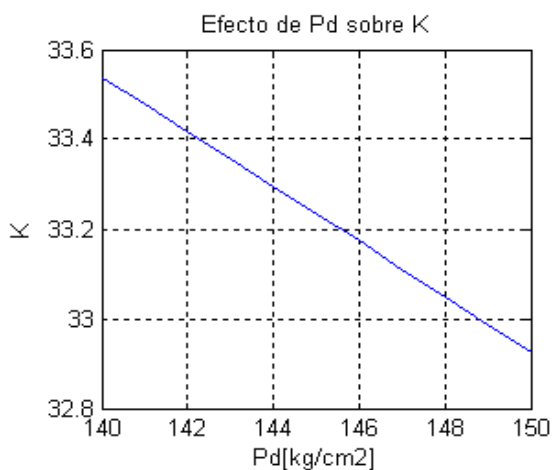


Fig. 2 Efecto de  $P_d$  sobre K.

La sensibilidad que sobre su cálculo le produce la demanda ( $q_s$ ) se muestra en la figura 3.

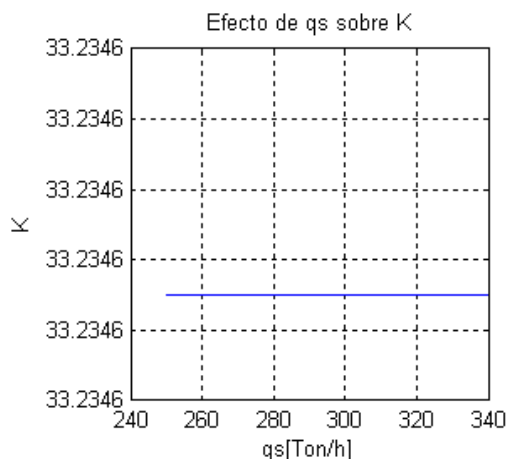


Fig. 3 Efecto de  $q_s$  sobre K.

La influencia de su variabilidad sobre la relación estática entre demanda ( $q_s$ ) y coeficiente de fracción en masa ( $\alpha_m$ ) de vapor en la mezcla, se muestra en la figura 4. La corrida se realizó para los valores de operación siguientes;  $P_d=145 \text{ kg/cm}^2$  y  $T_f=220 \text{ }^\circ\text{C}$ . La aproximación polinomial es  $\alpha_m(q_s)=0,00016q_s - 0,02138$ .

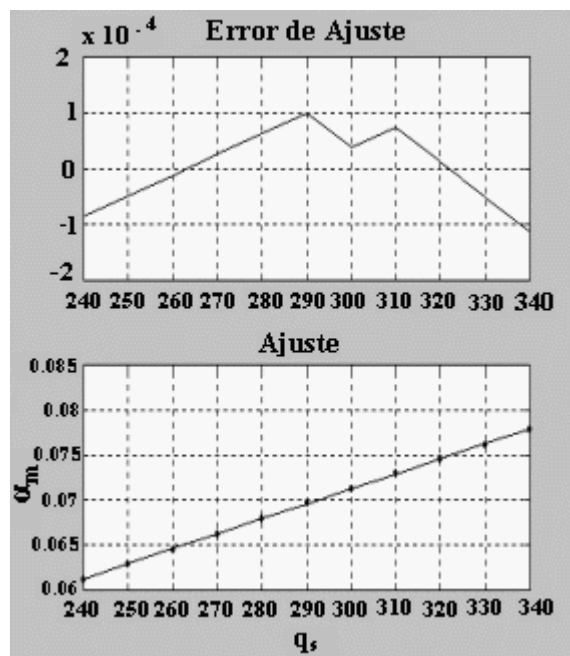


Fig. 4 Relación entre  $a_m$  y  $q_s$  [t/h].

## Conclusiones

Se establecen las fórmulas para el cálculo del coeficiente de resistencia total al fluido en la dinámica del movimiento de la circulación natural de generador de vapor en función de los parámetros constructivos del circuito hidráulico y los valores de las variables fundamentales de operación. Desde el punto de vista de la ingeniería en control automático, se concluye que el efecto de cambios en la demanda y la presión de operación sobre la variación de K son prácticamente despreciables, y no es significativo en la variación de la dinámica global. Este resultado no es fácilmente reconocible por simple inspección, por cuanto la determinación de K resulta de la solución de un sistema de ecuaciones no lineales.

---

## Reconocimiento

A la cooperación de los especialistas de la Central Termoeléctrica "Antonio Maceo" de Santiago de Cuba, en particular al Ing. Edward Madariaga, quien siempre de manera muy dedicada examina la compleja y extensa documentación del fabricante y su actualización correspondiente a cada mantenimiento capital. A la memoria del profesor y doctor en ciencias técnicas José Alberto Tur Quintero, quien durante muchos años fue un entusiasta investigador y formador de ingenieros de control automático en el campo aplicado de generadores de vapor.

## Bibliografía

1. Vázquez, L.; Sudriá A. *et al.*, "Educational Recommendations to Modernize Electric Power Plants Considering Economy, Technology and Control, IFAC

- Symposium on Power Plants & Power Systems Control 2003, Pre-prints, P41\_145.PDF, 2003.
2. Aström, K. J.; Bell, R. D., "Drum – Boiler Dynamics", *Automatica*, vol. XXXVI, No. 7, 2003, págs. 363–378, Elsevier Science Ltd.
3. Balchen, J.; Larsen, G., "Control of a Steam Boiler by Elementary Nonlinear Decoupling (END)", in *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Nonlinear Model Based Process Control*, Antalya, Turkey, 1997, págs. 749–779. Kluwer Academic Publishers.
4. Shinskey, F. G., *Controlling Multivariable Processes*, ISA, 1981, pág. 10.
5. Maffezzoni, C., "Boiler–Turbine Dynamics in Power – Plant Control", *Control Eng. Practice*, vol. V, No. 3, 1997, págs. 301–312, Elsevier Science Ltd.
6. Chien, K. L.; Ergin, E. I.; Ling, C.; Lee, A., "Dynamic Analysis of a Boiler", *Transactions ASME*, vol. LXXX, No. 7, 1958, págs. 1809-1819.
7. Potter, P. J., *Power Plant, Theory and Design*, McGraw–Hill Book Co. Inc., 1959.
8. Pacheco, P., *Hidráulica para ingenieros industriales*, Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1988.