

OBTENCIÓN DE UN MODELO DINÁMICO PARA SIMULACIÓN DE UNA CALDERA DE VAPOR INDUSTRIAL

Susana Pelayo Díaz

Centro de Tecnología Azucarera, Universidad de Valladolid
C/Real de Burgos. Edificio Alfonso VIII. Planta baja s/n 47011 Valladolid - España
Tfno: 983 42 35 63. FAX: 983 42 36 16. Email: susana@cta.uva.es

Resumen

Las calderas de vapor, presentes en gran número de industrias, están formadas por una serie de elementos interrelacionados entre sí que constituyen un sistema complejo. La simulación es, en este caso, una técnica muy útil para el estudio de su funcionamiento. Como referencia para la obtención del modelo se ha tomado caldera de vapor industrial real de una industria azucarera.

Palabras Clave: Modelado, simulación, calderas de vapor, sistemas de control.

1 INTRODUCCIÓN

Una caldera de vapor es una unidad de proceso de gran importancia en todo tipo de industrias. En general, en una industria, el vapor se utiliza como:

- medio de calefacción directa o indirecta.
- materia prima.
- medio de obtención de energía eléctrica en procesos de cogeneración.

Controlar de forma eficaz las condiciones de operación de una caldera es una necesidad obvia si se tiene en cuenta que las condiciones de trabajo (presiones y temperaturas elevadas) constituyen la causa principal de peligros por riesgo de explosiones. También debe tenerse en cuenta el aspecto económico, considerando no sólo los costes de construcción, sino también los elevados costes de operación (grandes cantidades de combustibles quemados) y de mantenimiento relacionados con las condiciones de operación ya mencionadas.

La búsqueda de esas condiciones óptimas de operación y el control de las mismas no es una tarea sencilla, ya que una caldera de vapor es un sistema muy complejo en el que todas las variables están interrelacionadas. Además, la realización de pruebas de forma directa sobre una caldera es inviable, tanto desde el punto de vista técnico, (por los peligros derivados de la manipulación de las condiciones de operación), como económico (tiempo y dinero necesario).

Teniendo todo esto en cuenta, la búsqueda de un método alternativo de análisis es una necesidad palpable. Este método alternativo de análisis es la simulación.

La simulación puede definirse como una representación del comportamiento de un proceso real mediante la resolución de un modelo matemático. Las ventajas que presenta la utilización de modelos matemáticos se resumen en:

- Posibilidad de analizar un proceso en profundidad, determinando qué variables o parámetros son críticos e influyen de manera decisiva en el funcionamiento del sistema global.
- Facilidad en la búsqueda de las condiciones óptimas de operación.
- Posibilidad de estudiar de una forma segura condiciones límite o extremas, muy alejadas de las normales de operación, para analizar sus consecuencias.
- Posibilidad de utilizar la simulación con finalidad didáctica: entrenamiento de operarios.

2 OBJETIVO

Los objetivos que se han fijado a la hora de desarrollar este trabajo pueden resumirse en:

- estudio la unidad de proceso y los elementos que la componen.
- desarrollo un modelo matemático dinámico que represente el comportamiento de una caldera.
- simulación del modelo obtenido con una programa de simulación
- estimación parámetros y validación del modelo por comparación con datos reales de operación.
- diseño del sistema de control completo.

3 FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE VAPOR

El objetivo de funcionamiento de una caldera es la obtención de vapor de agua y su posterior sobrecalentamiento utilizando como medio calefactor la energía liberada en una reacción de combustión. En concreto, la caldera de vapor elegida como base para el modelado funciona de la siguiente manera: (ver Figura 1)

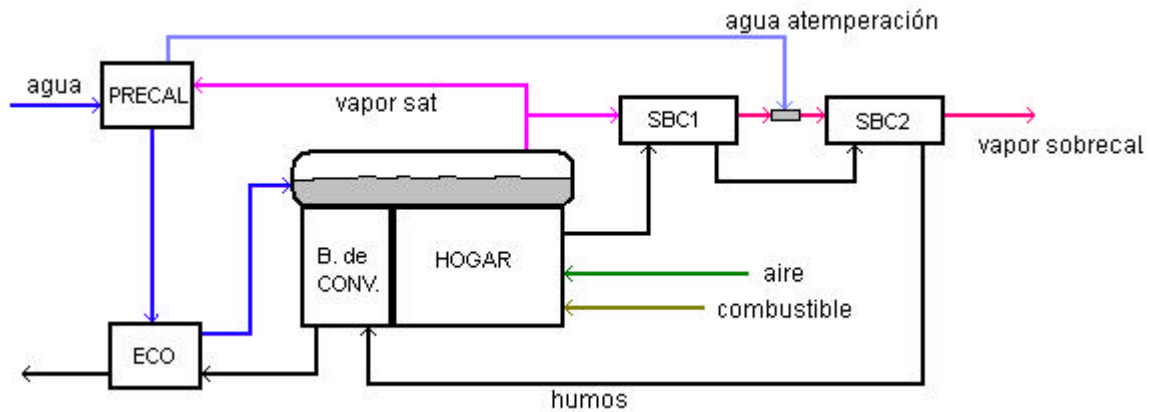


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la caldera de vapor industrial

Según se aprecia en el esquema de la figura 1, el agua de alimentación pasa inicialmente por un intercambiador de calor cuyo objetivo es el precalentamiento de dicho agua antes de que ésta entre en el economizador. Como medio calefactor se utiliza vapor de agua saturado que se obtiene en la propia caldera.

En el economizador el agua se sigue calentando, aunque sin llegar a vaporizarse, utilizando ahora los gases generados en la reacción de combustión como fluido calefactor.

Después del economizador el agua llega al calderín superior (también llamado calderín de vapor), y desde allí, mediante los tubos bajantes accede al calderín inferior (o calderín de agua), desde dónde se reparte entre los distintos circuitos de evaporación de agua, situados en la cámara de combustión y el banco de convección.

Los mecanismos principales de transmisión de calor en cada sección son respectivamente la radiación y la convección.

El agua, al ascender por los tubos (por circulación natural) se va vaporizando en parte, formando una mezcla de vapor y agua al llegar de nuevo al calderín superior. Este calderín dispone de un sistema de separadores ciclónicos para recoger el agua que puede ser arrastrada por el vapor.

El vapor seco que sale del calderín llega la sección de sobrecalentamiento, formada por dos cuerpos separados por un atemperador. Al salir del sobrecalentador secundario, el vapor llega a un colector desde donde se pasa a proceso.

La caldera que se ha elegido como base para la obtención del modelo matemático, obtiene vapor sobrecalentado a 40 bares y 380°C a partir de agua a 120°C y utilizando como combustible un gas natural de poder calorífico inferior igual a 9100 kcal/m³N.

4 MODELO FÍSICO – MATEMÁTICO

Para llevar a cabo el modelado de la caldera de vapor de forma sencilla se la ha dividido en los distintos elementos que la componen, modelándose cada uno de ellos por separado; de tal forma que su posterior unión nos permita simular el comportamiento global de la caldera.

Los elementos principales considerados son:

- Hogar de combustión
- Banco de convección
- Sobrecalentador primario y secundario
- Atemperador
- Economizador
- Precalentador de agua
- Calderín de vapor y calderín de agua
- Conductos y tuberías
- Chimenea
- Ventilador

El modelado de cada unidad está basado en leyes de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento, buscando siempre un compromiso entre la representación fidedigna del proceso real y la complejidad matemática derivada de la misma. Compromiso que puede traducirse en la consideración de determinadas suposiciones y cálculo de ciertos parámetros.

De forma genérica, las leyes de conservación pueden traducirse matemáticamente como:

Balance de materia:

$$\frac{dM}{dt} = W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}} + W_{\text{generación}} - W_{\text{consumo}} \quad (1)$$

Balance de energía

$$\frac{d(M \cdot H)}{dt} = W \cdot H_{\text{entrada}} - W \cdot H_{\text{salida}} + Q_{\text{absorbido}} - Q_{\text{cedido}} \quad (2)$$

Transmisión de calor

$$Q = U \cdot S \cdot (\Delta T_m) \quad (3)$$

Balance cantidad de movimiento (Ec. Bernouilli)

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{u_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + hf \quad (4)$$

donde: ΔT_m (diferencia media de temperaturas), H(entalpía específica), hf (pérdida de carga), P (presión), Q (flujo de calor), S (superficie efectiva de intercambio de calor), U (coef. global de transmisión de calor), W (flujo másico), z (altura), ρ (densidad).

Estas ecuaciones se utilizan para el modelado de todas las unidades que componen la caldera, particularizándolas para cada caso concreto.

Las unidades más complejas desde el punto de vista del modelado son el hogar de combustión y el calderín de vapor, por lo que se ha considerado necesario describirlas de forma más detallada:

4.1 HOGAR DE COMBUSTIÓN

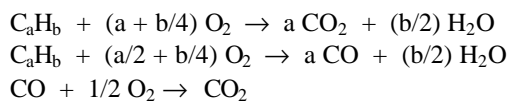
El hogar de combustión es una de las partes de mayor importancia en una caldera de vapor, en él se produce la reacción entre el combustible (en este caso, gas natural) y el comburente (el aire). Estas reacciones de combustión son muy exotérmicas, y provocan la aparición de una llama.

La existencia de la llama, y las altas temperaturas alcanzadas resultantes de la combustión, tienen como consecuencia que la mayor parte del calor hacia los tubos donde se evapora el agua se transmita por radiación.

A continuación se presenta una pequeña descripción de las ecuaciones utilizadas para el modelado de esta unidad, así como de las suposiciones q se han considerado.

4.1.1. Reacción de Combustión

La combustión se ha considerado instantánea e incompleta, las ecuaciones que tienen lugar pueden resumirse de forma genérica como:



Según esas reacciones, la composición de los gases de combustión vendrá dada por la ecuación:

$$0 = W_i_{\text{entrada}} - W_i_{\text{salida}} + W_i_{\text{generado}} - W_i_{\text{consumido}} \quad (5)$$

donde W_i sería el flujo másico de cada especie i' presente en los gases. La suma de todos los flujos de salida nos dará la cantidad total de humos que se producen.

4.1.2. Intercambio de Flujos de Calor

Para una construcción de un modelo fiable del hogar de combustión es necesario analizar todos y cada uno de los intercambios de energía entre los elementos que lo componen. De esta forma, deben considerarse:

Flujos de radiación [1] entre superficies y llamas luminosas:

$$Q_{LL \rightarrow S} = A_s \cdot \mathbf{s} \cdot \frac{\mathbf{e}_s + 1}{2} \cdot \mathbf{e}_{LL} \cdot [T_{LLAMA}^4 - T_s^4] \quad (6)$$

Flujos de radiación entre superficies y gases de combustión [1]:

$$Q_{G \rightarrow S} = A_s \cdot \mathbf{s} \cdot \frac{\mathbf{e}_s + 1}{2} \cdot [\mathbf{e}_G T_G^4 - a_G T_s^4] \quad (7)$$

El suelo del hogar está recubierto de una capa de ladrillo refractario (para evitar contacto directo de los tubos con los gases). El flujo de radiación intercambiado entre esta pared y los tubos vendrá dado por [1]:

$$Q_3 = \mathbf{s} \cdot A \cdot \frac{1}{(1/\mathbf{e}_{\text{pared}} + 1/\mathbf{e}_{\text{tubo}} - 1)} \cdot (T_{\text{pared}}^4 - T_{\text{tubo}}^4) \quad (8)$$

en estas ecuaciones: A (superficie de intercambio), Q (flujo de calor), T (temperatura), σ (cte. Stefan-Boltzmann), ϵ (emisividad), a (absortancia),

Para el calculo del flujo de calor intercambiado por radiación y convección entre los gases de combustión y los tubos por los que circula el agua se ha utilizado el método de Lobo-Evans [3]:

$$\begin{aligned} Q = 0.173 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_T}{100} \right)^4 \right] \cdot \mathbf{a} \cdot A_{cp} + \\ + h_c \cdot A \cdot (T_{Gas} - T_{Tubo}) \end{aligned} \quad (9)$$

donde A (superficie total de los tubos), A_{cp} (superficie plana equivalente de los tubos), F (factor global de radiación), h_c (coef. transmisión de calor por

convección), Q (flujo de calor), T (temperatura), α (factor de eficiencia de absorción).

El calor transmitido desde los tubos al agua que circula por su interior se puede calcular a partir de la ecuación [2]:

$$Q_w = h_i \cdot S_{TUBO} \cdot (T_i - T_w_{HOG}) \quad (10)$$

donde: h_i (coef. transmisión de calor), S_{TUBO} (superficie interior total promediada de los tubos), T (temperatura)

4.1.3. Balances de Materia y Energía: cálculo de temperaturas

A la hora de realizar los balances de materia y energía del hogar de combustión, habrá que considerar de nuevo por separado cada uno de los elementos que lo componen: llama, paredes, gases, tubos, agua.

4.1.3.1. Temperatura de la Llama

Para calcular la temperatura que alcanza la llama, debe hacerse un balance de energía a la misma, considerando que todo el calor desprendido en la combustión del gas natural con el aire se transmite a las paredes y los tubos que forman la cámara de combustión y a los propios gases generados en la reacción.

$$W_{comb} \cdot H_{comb} + W_{air} \cdot H_{aire} + H_{reac}^{\circ} = W_{Humo} \cdot H_{Humo} + Q_{LL} \quad (11)$$

4.1.3.2. Paredes del hogar

Las paredes, de ladrillo refractario, se han considerado como superficies grises con una emisividad elevada, con capacidad por tanto para absorber y emitir energía [1].

$$M_{Pared} \cdot C_{pP} \cdot \frac{dT_{Pared}}{dt} = Q_{absorbido} - (s \cdot A_p \cdot e_p \cdot T_{Pared}^4) \quad (12)$$

El calor absorbido es la suma del calor de radiación proveniente de la llama y el calor de radiación proveniente de los humos.

4.1.3.3. Gases de combustión

Los gases de combustión, al atravesar el hogar, se ven implicados en varios procesos de intercambio de energía, que modifican su temperatura de salida de la cámara de combustión.

$$\frac{d(M_H \cdot H_H)}{dt} = W_H \cdot H_{H llama} - W_H \cdot H_{H out} + Q_{Humos} \quad (13)$$

El término Q_{humos} representa el *flujo neto de calor* que los humos intercambian con el resto de elementos, en él se incluye: calor absorbido por los humos procedente de la llama, calor intercambiado con las paredes de ladrillo refractario, calor transmitido desde los humos a los tubos de la sección radiante por un mecanismo conjunto de radiación y convección.

4.1.3.4. Tubos de la Sección Radiante

Los tubos que forman el hogar de la caldera están expuestos a temperaturas muy elevadas, y en presencia de gases secos que pueden resultar corrosivos. El control de la temperatura de los tubos es un punto importante a estudiar para evitar posibles roturas por sobrepasar la resistencia térmica del material. El análisis de esa temperatura puede hacerse aplicando un balance de energía a los mismos:

$$M_T \cdot C_{pT} \cdot \frac{dT_T}{dt} = Q_{TUBOS} - Q_w \quad (14)$$

El calor total que absorben (Q_{TUBOS}) los tubos incluye: calor de radiación procedente de la llama, calor de radiación y de convección de los humos, calor procedente de una capa de ladrillos refractarios que cubre el suelo del hogar, pérdidas de calor a través de los aislantes.

4.1.3.5. Agua que se evapora

Por el interior de los tubos circula agua procedente del calderín inferior que gracias al calor recibido a través de las paredes de los tubos va a evaporarse en parte.

Para simplificar el modelo no se ha modelado el perfil de temperaturas y presiones existente a lo largo de la longitud de los tubos de ascenso del agua.

$$\frac{d(M_w \cdot H_w)}{dt} = W_{w in} \cdot h_{w in} - W_{w out} \cdot H_{w out} - W_{v out} \cdot H_{v out} + Q_w \quad (15)$$

$$W_{w in} = W_{w out} + W_{v sal} \quad (16)$$

En todas estas ecuaciones: C_p (calor específico), M (masa), h_w (entalpía específica del agua), H (entalpía específica), H_v (entalpía específica del vapor), H_{reac}° (flujo de calor desprendido en la reacción de combustión), Q (flujo de calor), T (temperatura), W (flujo másico).

4.2 CALDERÍN DE VAPOR

Desde el punto de vista de modelado, el objetivo buscado es la representación de los fenómenos de

esponjamiento y contracción del nivel de líquido en el calderín como consecuencia de aumentos o disminuciones en la demanda de vapor de la caldera, y que provocan una variación del nivel en el sentido opuesto al que intuitivamente se esperaría.

Si aumenta repentinamente la demanda de vapor: el nivel, en lugar de disminuir, al extraerse más vapor, aumenta temporalmente debido a una caída momentánea de la presión del vapor causada por el aumento de consumo. Esta disminución de presión inicial provoca una mayor evaporación y un aumento en el tamaño de las burbujas de vapor (*esponjamiento*) que hace aumentar el nivel en el calderín, hasta que el flujo de calor pueda incrementarse lo suficiente como para restaurar el valor de presión.

Por el contrario, si disminuye repentinamente la demanda de vapor, se producirá una disminución temporal del nivel en el calderín (*contracción*). Un fenómeno parecido ocurre con el cambio de agua de alimentación.

Para modelar estos fenómenos, se ha considerado que en el interior del calderín coexisten en todo momento tres fases diferenciadas, agua, vapor de agua y burbujas, que deben estudiarse por separado. (ver Figura 2)

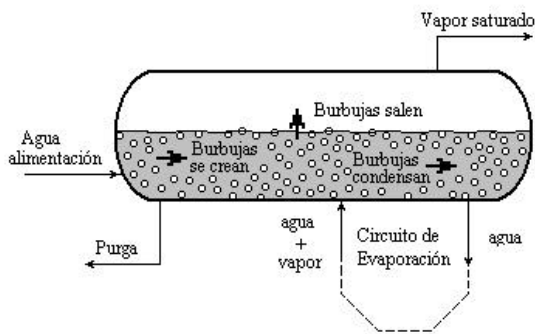


Figura 2. Esquema de corrientes en calderín de vapor

4.2.1. Balances de Materia

$$\frac{dMw}{dt} = Ww_{feed} - Ww_{purga} - Ww_{in\ c.evap} + Ww_{out\ c.evap} + Wb_{cond} - Wb_{crean} \quad (17)$$

$$\frac{dMv}{dt} = Wb_{salen} - Wv_{out} \quad (18)$$

$$\frac{dMb}{dt} = Wv_{in\ c.evap} - Wb_{cond} + Wb_{crean} - Wb_{salen} \quad (19)$$

Los términos de burbujas que condensan, se crean y pasan de la fase líquido a vapor, se han considerado proporcionales a la masa de burbujas o de líquido y a la diferencia de presiones de las fases que relacionan. Las constantes de proporcionalidad son parámetros del sistema que deben calcularse a partir de datos experimentales.

El flujo de agua que circula a través del circuito de evaporación (calderín, tubos bajantes, calderín de agua y tubos de evaporación) se puede calcular a partir del principio que rige la circulación natural: "la suma algebraica de todas las presiones a lo largo de un camino cerrado de un sistema en equilibrio debe ser nula" o lo que es lo mismo "el peso del fluido en los bajantes debe ser igual al peso del fluido en los tubos de subida". (ver figura 3)

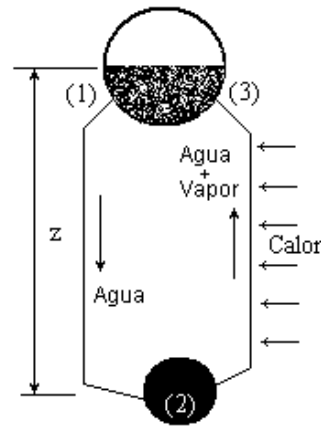


Figura 3. Circuito cerrado de evaporación

$$\frac{P_1}{r_d \cdot g} + z = \frac{P_2}{r_d \cdot g} + hf_d \quad (20)$$

$$\frac{P_2}{r_r \cdot g} = \frac{P_3}{r_r \cdot g} + z + hf_r \quad (21)$$

Teniendo en cuenta que P_1 y P_3 son la misma, entonces queda que:

$$z \cdot (r_d - r_r) = hf_d \cdot r_d + hf_r \cdot r_r \quad (22)$$

En estas ecuaciones: g (fuerza de gravedad); h_f (pérdida de carga total en cada sección en metros de fluido); P (presión); ρ (densidad), z (altura) y los subíndices: d (tubos bajantes); r (tubos de subida)

4.2.2. Balances de Energía

$$\begin{aligned} \frac{d(Mw \cdot h w)}{dt} = & Ww_{feed} \cdot h w_{feed} - Ww_{purga} \cdot h w - \\ & - Ww_{in\ c.evap} \cdot h w + Ww_{out\ c.evap} \cdot h w_{out\ c.evap} + \\ & + Wb_{cond} \cdot H b - Wb_{crean} \cdot H b_{crean} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\frac{d(Mv \cdot Hv)}{dt} = Wb_{salen} \cdot Hb_{salen} - Wv_{out} \cdot Hv \quad (24)$$

$$\frac{d(Mb \cdot Hb)}{dt} = Wv_{in.c.evap} \cdot Hv_{in.c.evap} - Wb_{cond} \cdot Hb + Wb_{crean} \cdot Hb_{crean} - Wb_{salen} \cdot Hb_{salen} \quad (25)$$

en estas ecuaciones: M (masa), W (flujo másico), H (entalpía específica) y los subíndices w (agua), v (vapor), b (burbujas)

4.3 SISTEMA DE CONTROL

Para que los resultados obtenidos con el modelo desarrollado es necesario incluir en el mismo el modelado de un sistema de control mínimo. Este sistema de control asegura el funcionamiento correcto de la caldera al mantener las variables críticas del proceso dentro de unos límites razonables. La introducción de este sistema de control se justifica si se tiene en cuenta la gran interacción que existe entre todas las variables de proceso.

El sistema de control incluye:

1. control de la presión en el colector de vapor, mediante la manipulación del flujo de entrada de combustible al hogar.
2. control del nivel de líquido en el calderín de vapor, mediante la manipulación del flujo de agua de alimentación a la caldera.
3. control de la temperatura del vapor sobrecalentado, mediante la manipulación del flujo de agua de entrada al atemperador.

5 SIMULACIÓN

Una vez que se tiene el modelo matemático, se traduce a un lenguaje de simulación. En este caso se ha elegido un lenguaje de simulación orientado a objetos, Ecosim-Pro, ya que permite la encapsulación y reutilización del código, así como la unión de pequeños componentes para formar otros más complejos.

De esta forma se han desarrollado una serie de componentes sencillos, que representarán cada una de las unidades de proceso que componen la caldera, de tal forma, que su conexión junto con otra serie de componentes auxiliares nos permita simular el comportamiento de la caldera completa.

El componente final 'CALDERA' obtenido por unión de los distintos componentes simples desarrollados contiene toda la información de dichos componentes. Esta unión de componentes se ha hecho de tal forma que el usuario final no tenga necesidad de conocer a fondo el modelo matemático que hay por debajo. Así mismo, y para facilitar su uso, únicamente se han dejado visibles como variables de contorno aquellas de mayor interés desde el punto de vista de estudio del comportamiento del sistema.

Los parámetros que debe introducir el usuario como datos en este componente global serían los correspondientes a las fuentes de combustible, aire y agua de alimentación (presión, temperatura y composición de la corriente), los parámetros de los reguladores (ganancia, tiempo integral, valor de la señal de control en manual,...), y los valores de algunas dimensiones características de la geometría de la caldera. A la mayoría de estos datos ya se les ha dado un valor por defecto en los componentes individuales para que en principio el usuario no tenga que preocuparse de darles un valor.

Las variables que deben fijarse como condiciones de contorno serían únicamente las consignas de los reguladores, y la demanda de vapor.

Una vez que se ha construido este componente total CALDERA, los pasos siguientes han ido encaminados a:

- diseño de un sistema de control completo adecuado al sistema.
- estudio y diseño de distintas políticas de distribución de la carga de varias calderas unidas en paralelo en función de la demanda total de vapor.
- modificación del modelo para introducción de fallos que permitan simular mal funcionamientos del sistema para su posterior utilización con fines didácticos y en el entrenamiento de operarios.

6 RESULTADOS

Como ejemplo de los resultados que se obtienen de la simulación, se ha representado en la Figura 4 y 5 el comportamiento típico de una caldera frente a variaciones en la demanda de vapor (efectos de contracción y esponjamiento)

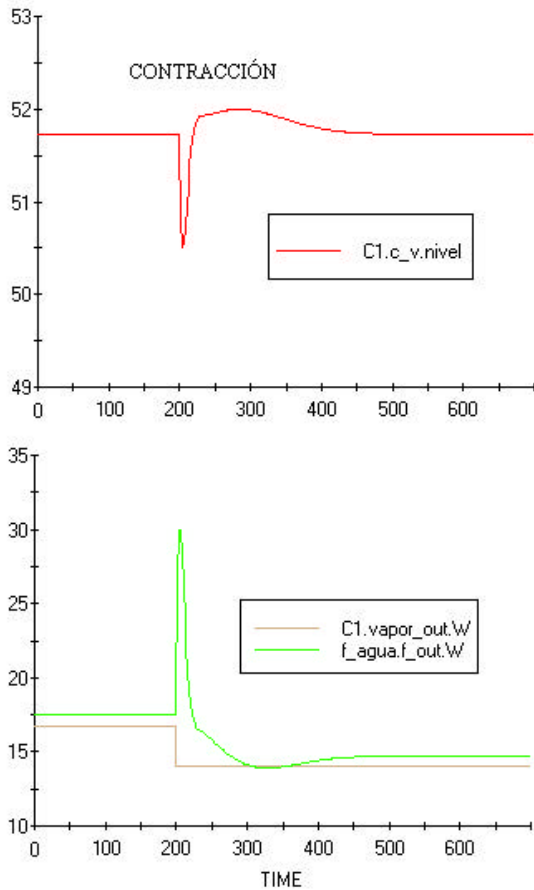


Figura 4. Contracción en el nivel del calderín al disminuir la demanda de vapor

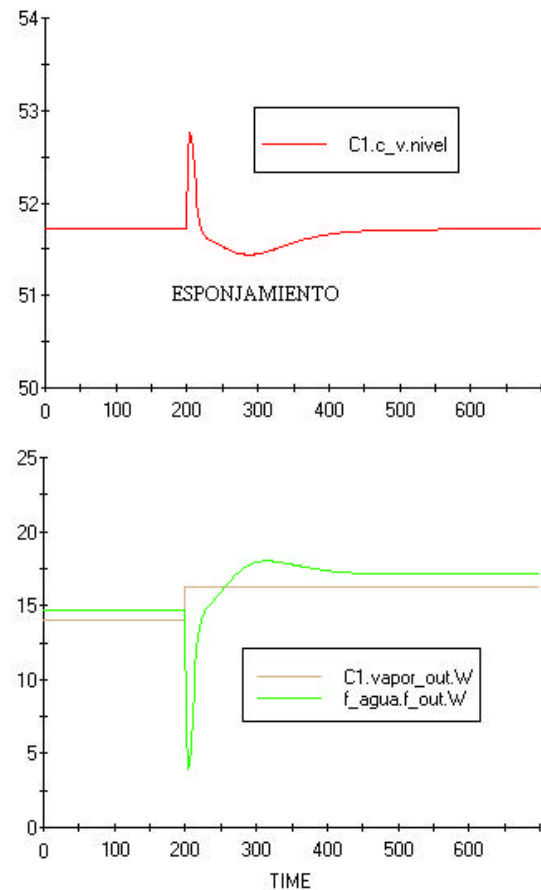


Figura 5. Esponjamiento en el nivel del calderín al aumentar la demanda de vapor

En las gráficas correspondientes a la figura 6 aparecen los resultados que se obtendrían si se produce un aumento en la cantidad de aire que entra al hogar de combustión.

Como se puede apreciar en las gráficas, un aumento en la cantidad de aire que entra, provocará una disminución en la temperatura de la llama, y por tanto una menor evaporación de agua en los tubos, que a su vez causará una disminución momentánea de la presión de vapor en el calderín hasta que el sistema e control actúe para restablecer su posición de equilibrio aumentando el flujo de combustible.

La consecuencia final de esta perturbación es una disminución en el rendimiento de la caldera.

8 CONCLUSIONES

El modelo construido cumple los requisitos fijados y representa correctamente el comportamiento real del sistema.

La herramienta de simulación utilizada, Ecosimpro, ha facilitado el modelado por elementos más simples cuya unión nos permite simular un sistema complejo.

El componente final obtenido puede ser reutilizado siempre que se cumplan unos requisitos mínimos fijados por la propia realización del modelo

El uso de estos modelos en el entrenamiento de operarios se ve facilitado al no ser necesario el conocimiento del código con que se han desarrollado dichos modelos.

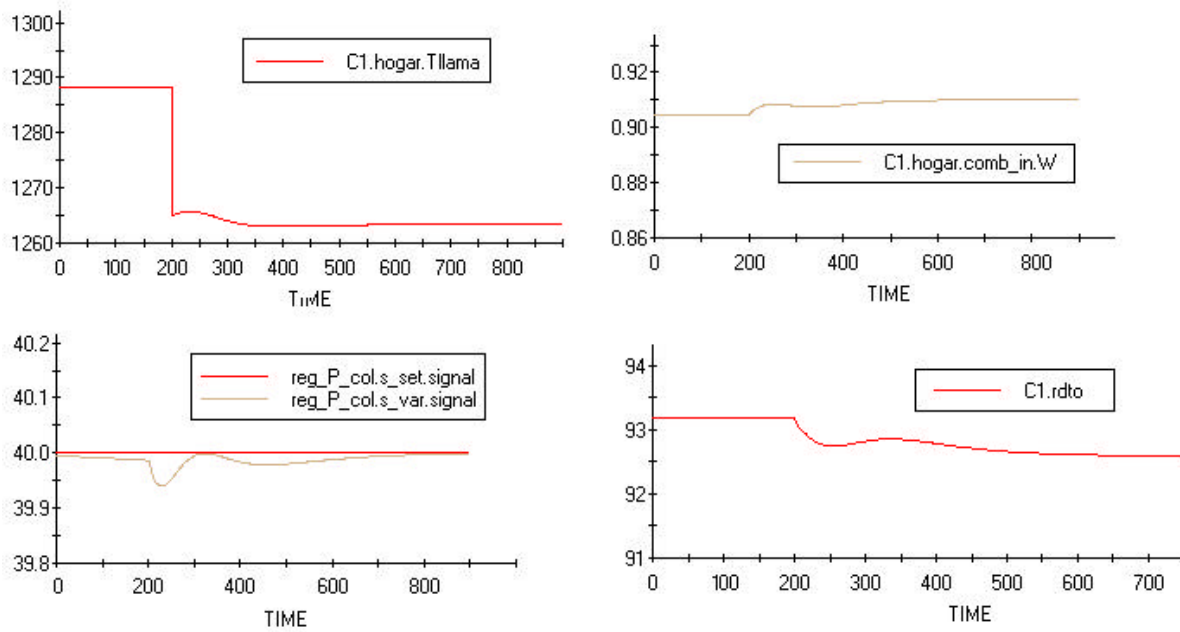


Figura 6. Resultados de la simulación ante un aumento en el flujo de aire que entra al hogar de combustión

Agradecimientos

Al profesor D. Cesar de Prada Moraga por sus orientaciones y ayuda en la realización del modelo matemático.

Referencias

- [1] Costa Novella E. (1996) "Transmisión de Calor". Vol 4. Ed. Alhambra, España.
- [2] Coulson & Richardson. (1994) "Chemical Engineering" Vol 1,6. Pergamon Press. England.
- [3] Kern D.Q. (1950) "Process Heat Transfer", McGraw-Hill
- [4] Modular Modeling System. B&W Nuclear Technologies