

C5

## MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA CALDERA DE VAPOR INDUSTRIAL USANDO ECOSIMPRO

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

*Una caldera de vapor es un sistema complejo formado por numerosos elementos. Con Ecosimpro se ha modelado cada elemento de forma individual, de tal forma que la unión de dichos elementos permita la simulación de la caldera total. Para realizar el modelo se ha tomado como referencia una caldera de vapor industrial real.*

**Palabras Clave:** Simulación, EcosimPro, modelado orientado a objetos, 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. Las necesidades de vapor de agua de una industria en general pueden resumirse en:

- vapor como medio de calefacción directa o indirecta
- vapor como materia prima
- vapor como medio de obtención de energía eléctrica

Controlar de forma efectiva las condiciones de operación de una caldera es una necesidad obvia si se tiene en cuenta que: las elevadas presiones y temperaturas de trabajo son las principales responsables de los problemas de peligrosidad por riesgo de explosiones. Tampoco debe olvidarse el aspecto económico, considerando no sólo los costes de construcción, sino también los elevados costes de operación (grandes cantidades de combustibles quemados) y los costes 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 fácil, 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 son difíciles de llevar a cabo, 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 esto en cuenta, es

necesario buscar un método alternativo de análisis: la simulación.

La simulación es la 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:

- Se puede analizar un proceso en profundidad, determinando qué variables o parámetros son críticos e influyen de manera decisiva en el funcionamiento del sistema global.
- Se facilita enormemente la búsqueda de las condiciones óptimas de operación.
- Se pueden estudiar de una forma segura condiciones límite o extremas, muy alejadas de las normales de operación para analizar sus consecuencias.
- Se puede utilizar 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 y su simulación con Ecosimpro.
- estimación parámetros y validación del modelo por comparación con datos reales de operación
- diseño del sistema de control completo.

Este trabajo forma parte de un proyecto cuyo objetivo final es el desarrollo de un simulador completo de una planta de obtención de azúcar para el entrenamiento de operarios

## 3 FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE VAPOR

El principio de funcionamiento de una caldera es sencillo: se pretende evaporar agua y sobrecalentar el vapor obtenido mediante 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)

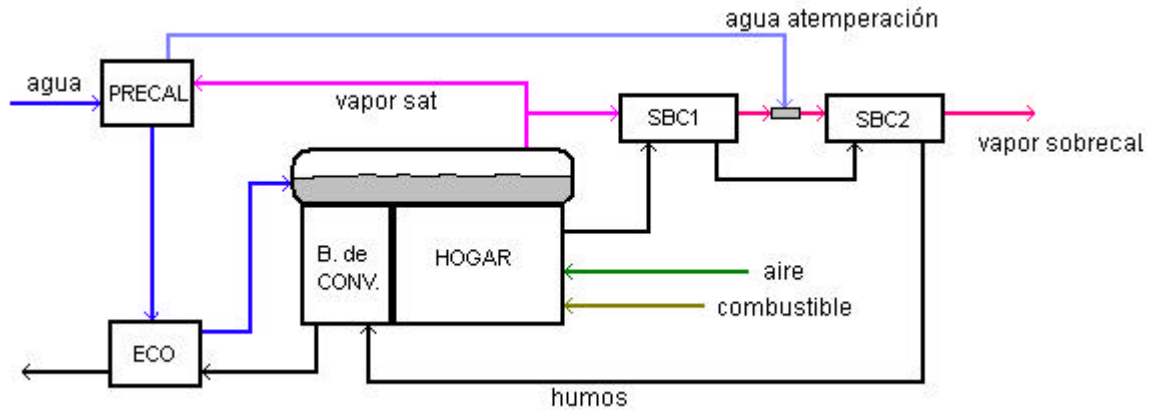


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la caldera de vapor industrial

El agua de alimentación, antes de entrar en el sistema generador de vapor propiamente dicho pasa 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 el calderín.

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

Después del economizador el agua llega al calderín superior, y desde allí, mediante los tubos bajantes accede al calderín inferior, desde donde se reparte entre los distintos circuitos de generación de vapor, correspondientes a la cámara de combustión y el banco de 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. En este, el vapor generado debe separarse del agua, para lo cual se dispone de un sistema de separadores ciclónicos.

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 va a proceso.

Esta caldera, que se ha elegido como base para el modelo, 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/m<sup>3</sup>N.

#### 4 MODELO FÍSICO – MATEMÁTICO

Para llevar a cabo el modelado de la caldera de vapor 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:  $\Delta T_m$  (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),  $\rho$  (densidad).

Estas ecuaciones se utilizan para el modelado de todas las unidades que componen la caldera, ajustándolas a 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:

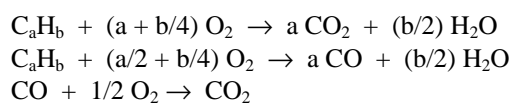
## 4.1 HOGAR DE COMBUSTIÓN

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



Teniendo en cuenta estas reacciones, la composición de los gases de combustión vendrá dada por:

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

donde  $W_i$  sería el flujo másico de la 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 correcta del modelo 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:

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

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

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

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]:

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

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

Para el cálculo 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]:

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

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),  $\alpha$  (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]:

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

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].

$$M_{Pared} \cdot Cp_P \cdot \frac{dT_{Pared}}{dt} = Q_{absorbido} - (s \cdot A_P \cdot e_P \cdot T_{Pared}^4) \quad (12)$$

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:

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

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),  $H_{reac}^{\circ}$  (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)

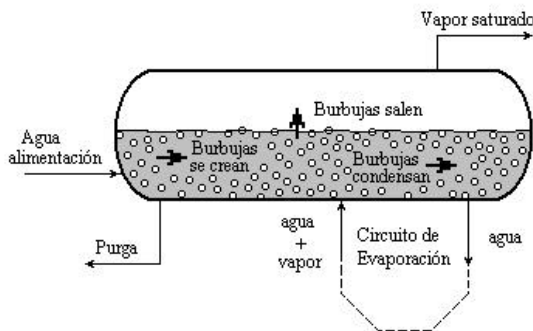


Figura2. Esquema de corrientes en el calderín de vapor

#### 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”.

#### 4.2.2. Balances de Energía

$$\frac{d(Mw \cdot hw)}{dt} = Ww_{feed} \cdot hw_{feed} - Ww_{purga} \cdot hw - Ww_{in\ c.evap} \cdot hw + Ww_{out\ c.evap} \cdot hw_{out\ c.evap} + Wb_{cond} \cdot Hb - Wb_{crean} \cdot Hb_{crean} \quad (20)$$

$$\frac{d(Mv \cdot Hv)}{dt} = Wb_{salen} \cdot Hb_{salen} - Wv_{out} \cdot Hv \quad (21)$$

$$\frac{d(Mb \cdot Hb)}{dt} = Wv_{in\ c.evap} \cdot Hv_{in\ c.evap} - Wb_{cond} \cdot Hb + Wb_{crean} \cdot Hb_{crean} - Wb_{salen} \cdot Hb_{salen} \quad (22)$$

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

## 5 DESARROLLO DEL MODELO EN ECOSIM

Una vez que se tiene el modelo matemático, hay que traspararlo a Ecosim. Para ello se crean una serie de componentes sencillos, que representarán cada una de las unidades de proceso que componen la caldera, de tal forma, que su conexión nos permita simular el comportamiento de la caldera completa.

Además de los componentes que representan las unidades de proceso que forman la caldera, se han tenido que desarrollar una serie de librerías generales, que incluirían:

- librería de especies químicas y sus propiedades físicas y químicas
- librería de puertos (gas, vapor, fluido,...)
- librería de elementos de flujo: tuberías (fluido compresible e incompresible), bombas, válvulas, ...
- librería de control: reguladores, medidores, ...

En principio, los componentes individuales correspondientes a la caldera no serían reutilizables, al estar desarrollados muy en detalle. Esto se debe a que el objetivo de este trabajo es la obtención de un único componente caldera (este sí ya sería general) que pasaría a formar parte de una librería general de elementos de una azucarera. Estos componentes son excesivamente extensos como para reproducirlos en este documento, por lo que a modo de ejemplo se incluye alguno de esos otros componentes generales que también se han desarrollado.

Se presentan a continuación los componentes correspondientes a un puerto gas, una válvula para

gases, y un sistema de control en cascada para el nivel del calderín:

```

-----
-- Definición de un puerto gaseoso
-----
PORT gas (SET_OF(Chemical)Mix)

SUM REAL W RANGE 0.,Inf "Flujo másico (Kg/s)"

SUM IN REAL Wi[Mix] RANGE 0.,Inf
    "Flujo másico individual (Kg/s)"
EQUAL OUT REAL C[Mix] RANGE 0.,1.
    "Concentraciones (%1 en peso)"
REAL x[Mix] RANGE 0.,1.
    "Concentración (frac molar:%1 moles)"
EQUAL REAL P RANGE 0.,Inf "Presión (bar)"
EQUAL OUT REAL T RANGE -273.,Inf "Temperat.(°C)"
REAL H "Entalpía específica (KJ/Kg)"
SUM IN REAL f_energ "Flujo de entalpía (KJ/s)"
REAL Rho_g RANGE 0.,Inf "Densidad (Kg/m^3)"
REAL F RANGE 0.,Inf "Flujo volumétrico"

CONTINUOUS

1 = SUM (j IN Mix; C[j])
EXPAND(j IN Mix EXCEPT setofElem(Mix,1)) Wi[j]=C[j]*W
W = SUM(j IN Mix;Wi[j])
H = entalp_gas (Mix, T, x)
f_energ = W * H
Rho_g = dens_gas (Mix, T, P, x)
F = W/Rho_g
-- relación entre concentración en peso(C) y en fracción molar(x)
EXPAND (j IN Mix) x[j] = (C[j]/Mmolec[j]) \
    / SUM (i IN Mix; (C[i]/Mmolec[i]))

END PORT

-----
-- Nombre del componente: Valvula_gas
-- Descripción: representación válvula LINEAL para gases
-- Datos: coef de caudal(Kv),intervalo para flujo laminar(dplam)
-- Autor: Susana Pelayo Díaz
-----
COMPONENT Valvula_gas (SET_OF(Chemical)gas_mix)

PORTS
IN gas (Mix = gas_mix) f_in
OUT gas (Mix = gas_mix) f_out
IN analog_signal Ap -- apertura de válvula (%)

DATA
REAL Kv "coef. de caudal"

DECLS
REAL coef "coeficiente interno calculo"
REAL caidaP "caída de presión en esa válvula (bar)"

INIT
IF(f_in.W == 0)THEN
    f_out.T = 0.
    f_out.Rho_g = 0.
    f_out.H = 0.
END IF

CONTINUOUS
f_out.W = f_in.W
EXPAND (j IN gas_mix) f_out.C[j] = f_in.C[j]
f_in.T = f_out.T
f_out.P = f_in.P - caidaP
<eqn3> coef = Kv * Ap.signal/100.
0.05*f_in.W' = (coef*sqrt(max(1.e-8,(f_in.P**2 \
    - f_out.P**2)))) - f_in.W

END COMPONENT

```

```

-----
---- SIST. CONTROL NIVEL EN EL CALDERÍN -----
-----
-- Nombre del componente: control_nivel
-- Descripción: cascada para el control del nivel en el calderín
-- Datos necesarios: ninguno
-- Autor: Susana Pelayo Díaz.
-----
COMPONENT control_nivel

PORTS
IN analog_signal nivel -- nivel en el calderín de vapor
IN liquido (agua) agua_in
OUT liquido (agua) agua_out

TOPOLOGY
Medidor_W_liquido (fluido_mix=agua) m_W_agua
Valvula_liq(fluido_mix=agua) v_AGUA (Kv=293.2048)
Cntrl_pi reg_L_cv(k=10.,Ti=100.,Tr=0.007,u_min=0.001, \
    u_max=40.,man=17.5333192)
Cntrl_pi reg_W_feed (k=15,Ti=10.,Tr=0.007,u_min=0.001, \
    u_max=100.,man=50.)

CONNECT agua_in TO m_W_agua.f_in
CONNECT reg_L_cv.s_out TO reg_W_feed.s_set
CONNECT m_W_agua.flujo TO reg_W_feed.s_var
CONNECT reg_W_feed.s_out TO v_AGUA.Ap
CONNECT m_W_agua.f_out TO v_AGUA.f_in
CONNECT v_AGUA.f_out TO agua_out

CONTINUOUS
nivel.signal = reg_L_cv.s_var.signal
v_AGUA.f_in.P - v_AGUA.f_out.P = 0.00132

END COMPONENT

```

## 6 COMPONENTE CALDERA

El componente final 'CALDERA' obtenido por unión de los distintos componentes simples desarrollados contiene toda la información de dichos componentes. Esta unión 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.

Para que el funcionamiento del componente global caldera sea correcto ha sido necesario introducir un sistema de control mínimo que permita 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 el flujo de entrada de combustible al hogar.
2. control del nivel de líquido en el calderín de vapor, mediante el flujo de agua de alimentación a la caldera.
3. control de la temperatura del vapor sobrecalentado, mediante el flujo de agua de entrada al atemperador.

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 las dimensiones de la tubería de salida del vapor (longitud y diámetro interno). 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.

A modo de resumen, se ha incluido un apéndice al final del artículo en el que se enumeran todos los componentes que se han desarrollado.

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.
- unión de este componente con el resto de modelos desarrollados para otras unidades de proceso azucarero.

Como ejemplo incluimos un componente que representaría la unión de dos calderas en paralelo con un único colector de vapor, una única chimenea de salida de humos y una distribución uniforme de la carga.

```

----- CALDERAS EN PARALELO -----
COMPONENT C2_paralelo

TOPOLOGY
fuente_gas(gas_mix=aire) f_aire(T=30.,P=1.01325, \
C={0.233, 0.767, 0.00})
fuente_gas(gas_mix=gas_natural) f_comb(T=30.,P=1.001325, \
C={0.815, 0.16, 0.016, 0.009})
fuente_liq(fluido_mix=agua) f_agua(T=120.,P=45.72,C={1.})

c1_nueva C1
c2_nueva C2
Tubo_vapor tuberia1(D=0.20272,L=14.6)
Tubo_vapor tuberia1(D=0.20272,L=14.6)
colector_vapor colector
chimenea chim
Cntrl_pi reg_P_col(k=0.05,Ti=100.,Tr=0.007,u_min=0.001, \
u_max=7.,man=1.00508557)
Medidor_P_vapor m_P_col
    
```

```

CONNECT f_aire.f_out TO C1.aire_in, C2.aire_in
CONNECT f_comb.f_out TO C1.comb_in, C2.comb_in
CONNECT f_agua.f_out TO C1.agua_in, C2.agua_in
CONNECT C1.vapor_out TO tuberia1.f_in
CONNECT C2.vapor_out TO tuberia2.f_in
CONNECT tuberia1.f_out,tuberia2.f_out TO colector.f_in
CONNECT colector.f_out TO m_P_col.f_in
CONNECT m_P_col.presion TO reg_P_col.s_var
CONNECT reg_P_col.s_out TO C1.s_regP,C2.s_regP
CONNECT C1.humos_out, C2.humos_out TO chim.f_in
    
```

END COMPONENT

## 7 RESULTADOS

Como ejemplo de los resultados que se obtienen de la simulación, se ha representado en la Figura 3 y 4 el comportamiento típico de una caldera frente a variaciones en la demanda de vapor (efectos de contracción y esponjamiento)

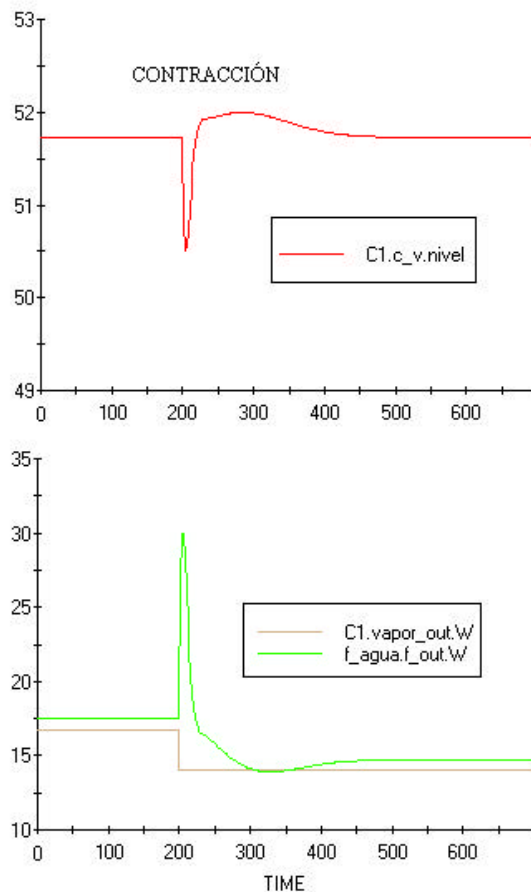


Figura 3. Contracción en el nivel del calderín al disminuir la demanda de vapor

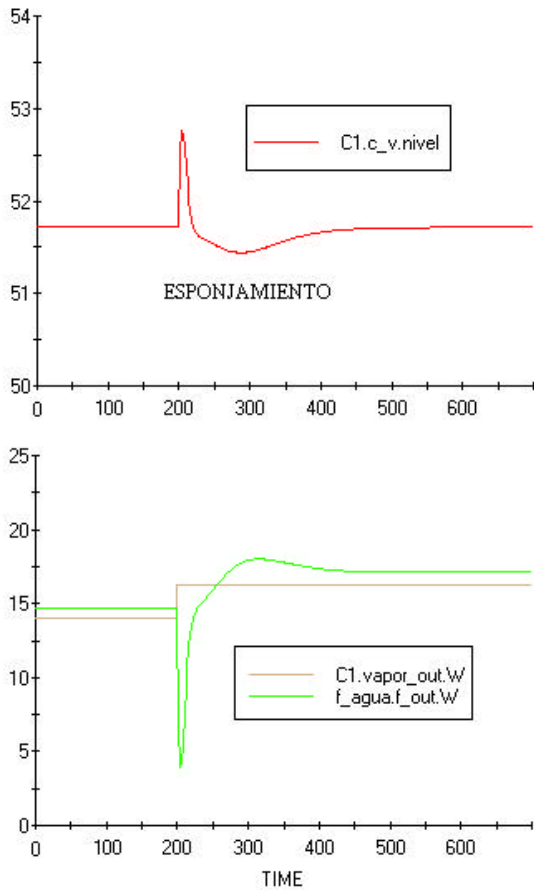


Figura 4. Esponjamiento en el nivel del calderín al aumentar la demanda de vapor

En las gráficas correspondientes a la figura 5 aparecen los resultados que se obtendrían si se produce un aumento en la cantidad de aire que entra al hogar. Como se puede apreciar en las gráficas, un aumento en la cantidad de aire, provocará una disminución en la temperatura de la llama, y por tanto una menor evaporación, esta causará una disminución momentánea de la presión de vapor en el calderín hasta que el sistema restablezca su posición de equilibrio aumentando el flujo de combustible. La consecuencia final 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.

### Apéndice

Librería CALDERA	
Componente	Descripción
Atemperador	Atemperador de vapor sobrecalentado
Bajante	Tubos bajantes hacia calderín inferior
BDC	Banco de convección
calderin_agua	Calderín inferior o de agua
Chimenea	Chimenea
colector_vapor	Colector de vapor sobrecalentado
cond_aire	Conducto de entrada de aire
cond_ce	Conducto caldera a economizador
cond_ec	Conducto economizador a chimenea
control_atemperacion	Sistema control de la atemperación
control_combustion	Sistema control y seguridad relación aire-combustible
control_nivel	Sistema control nivel calderín de vapor
CV_sub	Calderín de vapor con región subenfriada
Economizador	Economizador
Hogar	Hogar de combustión
Pre calentador	Pre calentador de agua de alimentación
sobrecalent1	Sobrecalentador primario
sobrecalent2	Sobrecalentador secundario
Ventilador	Ventilador entrada aire
C1_nueva	Cuerpo de la Caldera
C1_nueva_demo	Componente caldera total
C2_paralelo	Unión dos calderas en paralelo

### Componentes de otras librerías que se han utilizado

Librería PUERTOS	
Componente	Descripción
Gas	Puerto para gases o mezclas
Líquido	Puerto para líquidos o mezclas
vapor	Puerto para vapor

Librería de CONTROL	
Componente	Descripción
analog_signal	Puerto de señal analógica
Cntrl_pi	Controlador PI
Medidor_Ci_gas	Medidor composición de un gas
Medidor_P_vapor	Medidor de presión de un vapor
Medidor_T_vapor	Medidor temperatura de un vapor
Medidor_W_gas	Medidor flujo másico de un gas
Medidor_W_liquido	Medidor flujo másico de un líquido

Librería de ELEMENTOS DE FLUJO	
Componente	Descripción
fuelle_gas	Fuente de gas o mezclas
fuelle_liq	Fuente de líquido o mezclas
fuelle_vapor	Fuente de vapor
Tubo_gas	Tubería para gases
Tubo_liq	Tubería para líquidos
Tubo_vapor	Tubería para vapor
Valvula_gas	Válvula lineal para gases
Valvula_gas_mariposa	Válvula de mariposa para gases
Valvula_liq	Válvula lineal para líquidos



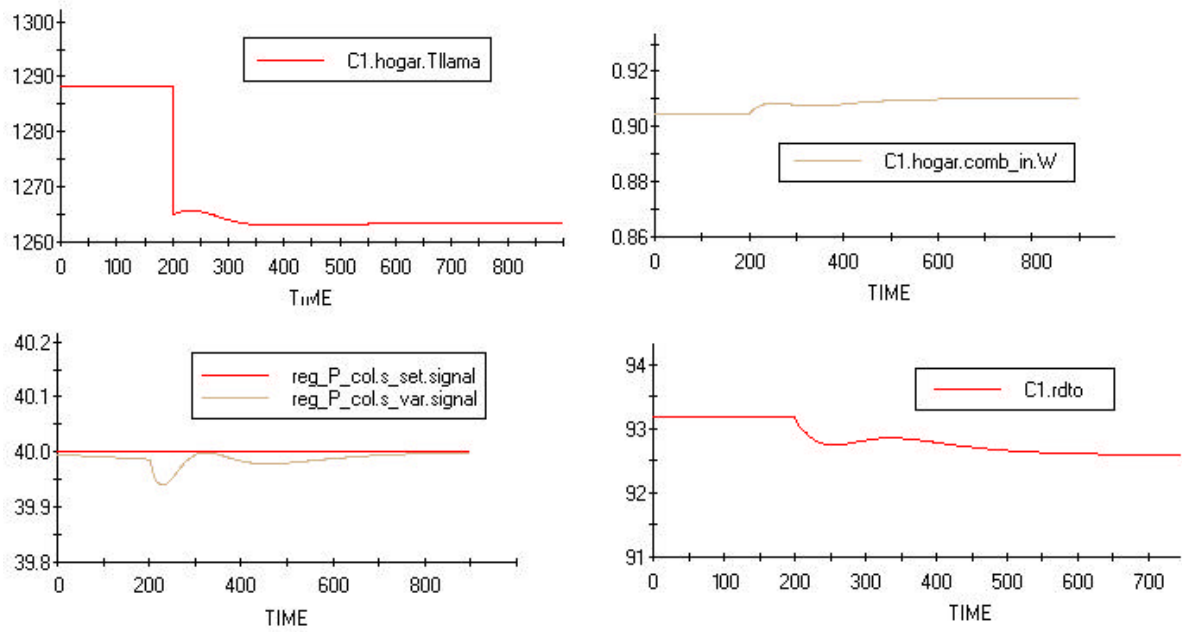


Figura 5. Resultados de la simulación ante un aumento en el flujo de aire que entra al hogar de combustión

### 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 & Richarson. (1994) "Chemical Enginnering" Vol 1,6. Pergamon Press. England.
- [3] Kern D.Q. (1950) "Process Heat Transfer", McGraw-Hill
- [4] Modular Modeling System. B&W Nuclear Technologies

