

MODELAMIENTO TERMICO DE UNA CALDERA CLASICA CON CONTROL ON-OFF EN APLICACIONES HVAC/R.

Modeling of a Classical Fuel-Oil Boiler with ON/OFF Control on HVAC systems.

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de un estudio teórico experimental con el fin de efectuar el modelamiento térmico de una caldera clásica con control on-off como elemento fundamental de sistemas HVAC.

PALABRAS CLAVES: Auditoría energética, Experimental

NÉSTOR FONSECA DIAZ

Ph.D. University of Liège Belgium
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
nfonseca@utp.edu.co

ABSTRACT

This article presents the results of the theoretical and experimental study to perform the thermal modeling of a Classical Fuel-Oil Boiler with ON/OFF Control on HVAC systems

KEYWORDS: Commissioning, Experimental

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de referencia representa la caldera mediante el ensamble de una cámara de combustión (supuesta adiabática) y dos intercambiadores de calor (gas –agua y agua ambiente) de acuerdo a lo representado en la Figura 1.

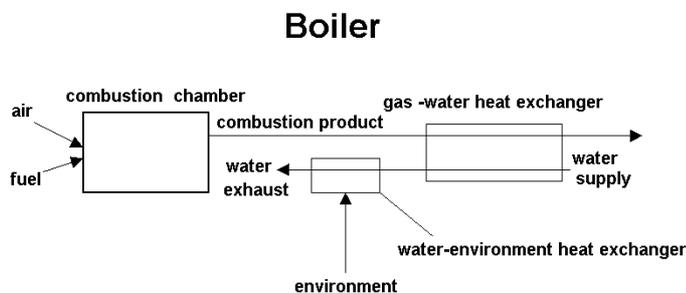


Figura 1. Modelo de referencia de la caldera.

La combustión es representada por un conjunto de cinco procesos ficticios (Figura 2)

- 1) Suministro de aire a la temperatura de referencia de 25°C.
- 2) Suministro de combustible a la temperatura de referencia de 25°C.
- 3) Despliegue de la combustión estequiometría a 25°C.
- 4) Considerando el exceso de aire (si fuera el caso) y produciendo el correspondiente disociación de CO₂-CO.

- 5) Calentamiento de los productos de combustión hasta la temperatura a la descarga de la cámara de combustión.

Complete combustion model

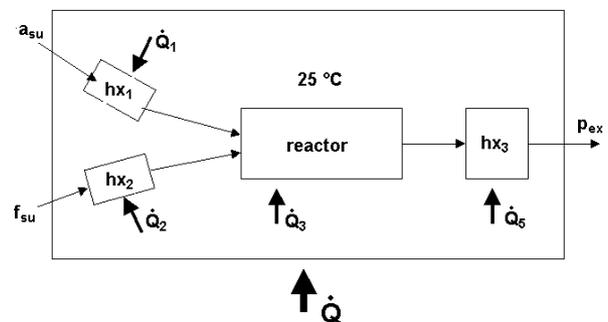


Figure 2: Modelo de referencia de la combustión

Las ecuaciones que describen este proceso se dan en seguida. El balance (Eq. 1) considera el modelo de referencia de la combustión estequiometría. Los flujos máxicos de aire y combustible se dan a la temperatura de referencia de 25°C (Eq. 2 y 3). Luego, la combustión estequiometría es desarrollada usando la ecuación 4. Los productos de combustión son calentados hasta la temperatura de la salida de la cámara de combustión (Eq.5).

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5 = 0 \quad [1]$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{M}_a \cdot c_{p,a} \cdot (25 - t_a) \quad [2]$$

$$\dot{M}_a = \frac{\dot{M}_f}{f}$$

$$c_{p,a} = 1005$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{M}_f \cdot c_f \cdot (25 - t_f) \quad [3]$$

$$\dot{Q}_3 = -\dot{M}_f \cdot \text{LHV} \quad [4]$$

$$\dot{Q}_4 = 0$$

(if complete combustion)

$$\dot{Q}_5 = \dot{M}_p \cdot c_{p,p} \cdot (t_{\text{adiab}} - 25) \quad [5]$$

$$\dot{M}_p = \dot{M}_a + \dot{M}_f$$

El intercambiador de calor gas-agua se supone en contraflujo y es descrito como por medio del método clásico ε -NTU (Eq. 6 a 9). Se toma precauciones con la definición del calor específico promedio del gas en el rango de temperaturas consideradas (usando la función “cpbar” de EES [1]), para tomar un balance de energía consistente. La eficacia del intercambio es definida usando la ecuación 7, usando el coeficiente global de transferencia de calor (AU_{gw}), identificado y dado como parámetro del modelo.

Las temperaturas del gas y del agua se calculan usando las ecuaciones 8 y 9.

$$\dot{Q}_{gw} = \dot{C}_{\min} \cdot \varepsilon_{gw} \cdot (t_{g,su} - t_{w,su}) \quad [6]$$

$$\dot{C}_{\min} = \text{Min}(\dot{C}_g, \dot{C}_w)$$

$$\dot{C}_g = \dot{M}_p \cdot c_{p,g}$$

$$\dot{C}_w = \dot{M}_w \cdot c_w$$

$$\varepsilon_{gw} = \frac{1 - \exp[-NTU_{gw} \cdot (1 - \omega)]}{1 - \omega \cdot \exp[-NTU_{gw} \cdot (1 - \omega)]} \quad [7]$$

$$NTU_{gw} = \frac{AU_{gw}}{\dot{C}_{\min}}$$

$$\omega = \frac{\dot{C}_{\min}}{\dot{C}_{\max}}$$

$$\dot{C}_{\max} = \text{Max}(\dot{C}_g, \dot{C}_w)$$

$$\dot{Q}_{gw} = \dot{C}_w \cdot (t_{w,ex,1} - t_{w,su}) \quad [8]$$

$$\dot{Q}_{gw} = \dot{C}_g \cdot (t_{g,su} - t_{g,ex}) \quad [9]$$

$$t_{g,su} = t_{\text{adiab}}$$

El intercambiador de calor agua-medio ambiente es representado como semi-isotermico y definido usando el método ε -NTU (Eq. 10).

$$\dot{Q}_{wenv} = \dot{C}_w \cdot \varepsilon_{wenv} \cdot (t_{w,ex,1} - t_{env}) \quad [10]$$

$$\varepsilon_{wenv} = 1 - \exp(-NTU_{wenv})$$

$$NTU_{wenv} = \frac{AU_{wenv}}{\dot{C}_w}$$

El control ON/OFF de la caldera consiste en asociar los dos regímenes de tal forma que el promedio ponderado de la temperatura de salida sea igual al valor de consigna fijado (Eq. 12), si la caldera es lo suficiente mente potente. Si no, se supone encendida todo el tiempo (Eq. 11).

$$t_{w,ex} = \text{Min}(t_{w,ex,set}, t_{w,ex,ON}) \quad [11]$$

$$t_{w,ex} = \theta \cdot t_{w,ex,ON} + [1 - \theta] \cdot t_{w,ex,OFF} \quad [12]$$

$$\dot{Q}_u = \dot{C}_w \cdot (t_{w,ex} - t_{w,su})$$

$$\dot{Q}_c = \theta \cdot \dot{Q}_{c,ON}$$

El régimen “OFF” es fácil de simular; la caldera es por lo tanto reducida a los intercambiadores de calor agua-ambiente solamente.

2. IDENTIFICACION DE PARAMETROS Y DATOS POR DEFECTO

Muy frecuente mente, una caldera es caracterizada por su potencia nominal y eficiencia (régimen continuo con temperatura de suministro de agua nominal) y sus condiciones de consumo en “stand-by”.

Estos dos puntos de arranque permiten identificar el flujo de combustible y los coeficientes de intercambio de calor de ambos intercambiadores de calor.

Coefficientes de transferencia de calor

Los valores por defecto AU_{gw} y AU_{wenv} , como los dados en las Figuras 3 y 4, y pueden ser usados como primera aproximación.

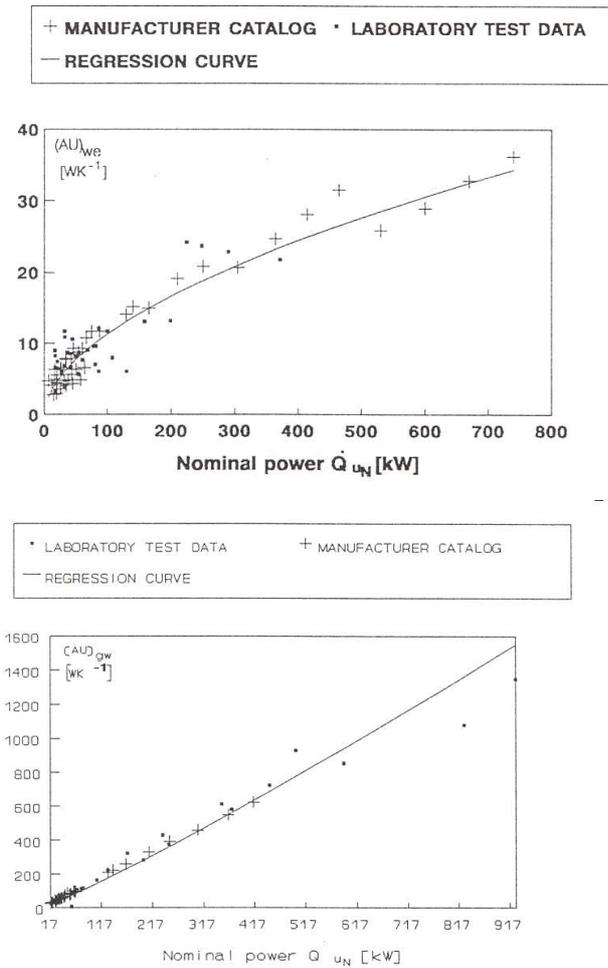


Figura 4: Valores de los coeficientes de transferencia de calor por defecto.

Las ecuaciones de las curvas de regresión en las Figuras 3 y 4 son dadas en las ecuaciones 13 y 14 con los valores AU en W/K y potencia nominal utilizada en W.

$$AU_{wenv} = 4.1734 + 0.0000667 \cdot \dot{Q}_{u,n} - 3.586 \times 10^{-11} \cdot \dot{Q}_{u,n}^2 \quad [13]$$

$$AU_{gw} = 18.996 + 0.001476 \cdot \dot{Q}_{u,n} \quad [14]$$

Relación aire - combustible

Los siguientes valores dan una Buena estimación de la relación aire combustible (f), la concentración de CO2 (xCO2) y la concentración de oxígeno (xO2) el flujo de gas seco.

- f=0.06
- xCO2=0.12
- xO2=0.04

3. MODELO SIMPLIFICADO

Con temperatura constante del agua a la entrada, en la caldera de aceite sometida a un control ON-OFF tiene un comportamiento muy estable como se muestra en la Figura 5. Esto sugiere que una regresión lineal doble puede ser usada como modelo simplificado. La potencia consumida es dibujada como función de la potencia útil y se efectúa una aproximación lineal sobre esta curva.

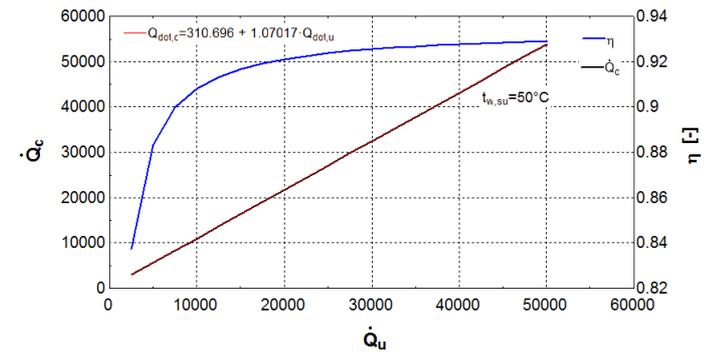


Figura 5. Consumo de la caldera como función de su potencia térmica útil a temperatura del agua constante en la entrada (ON/OFF control).

Aplicando una metodología similar para diferentes temperaturas a la entrada (Ejemplo de 50°C a 90°C) y usando variables reducidas (divididas por la potencia útil y consumida, Eq 15 y 16) en lugar de las variables normales, se obtienen las siguientes correlaciones. Eq 17.

$$\dot{q}_{u,red} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_{u,n,on}} \quad [15]$$

$$\dot{q}_{c,red} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{c,n,on}} \quad [16]$$

$$\begin{aligned} t_{w,su} &= 50 [C] \\ \dot{q}_{c,red} &= 0.005592 + 0.9739 \cdot \dot{q}_{u,red} \end{aligned} \quad [17]$$

$$\begin{aligned} t_{w,su} &= 60 [C] \\ \dot{q}_{c,red} &= 0.0078657028 + 0.9784 \cdot \dot{q}_{u,red} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{w,su} &= 70 [C] \\ \dot{q}_{c,red} &= 0.01016 + 0.9829 \cdot \dot{q}_{u,red} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{w,su} &= 80 [C] \\ \dot{q}_{c,red} &= 0.01248 + 0.98752846 \cdot \dot{q}_{u,red} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{w,su} &= 90 [C] \\ \dot{q}_{c,red} &= 0.01481 + 0.9922 \cdot \dot{q}_{u,red} \end{aligned}$$

Dibujando los coeficientes de las cinco correlaciones como función de la temperatura del agua a la entrada (Figura 6), el modelo simplificado puede ser descrito con un número limitado de ecuaciones (Eq.18)

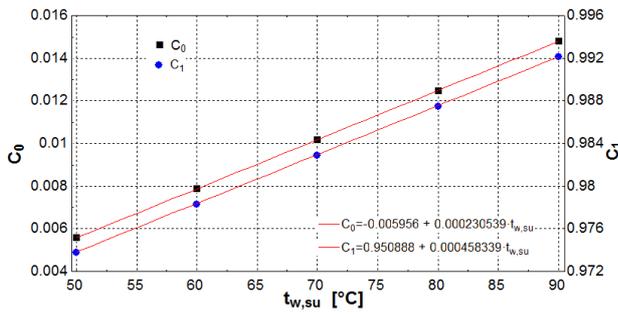


Figura 6. Segundo paso en la identificación de parámetros del modelo simplificado.

Simplified model

$$\dot{q}_{c,red} = C_0 + C_1 \cdot \dot{q}_{u,red} \quad [18]$$

$$C_0 = C_{0,0} + C_{0,1} \cdot t_{w,su}$$

$$C_1 = C_{1,0} + C_{1,1} \cdot t_{w,su}$$

$$C_{0,0} = -0.005956$$

$$C_{0,1} = 0.0002305$$

$$C_{1,0} = 0.9509$$

$$C_{1,1} = 0.0004583389$$

4. VALIDACION

En las figuras 7 y 8, se presenta un ejemplo de validación del modelo simplificado. El resultado es bastante satisfactorio.

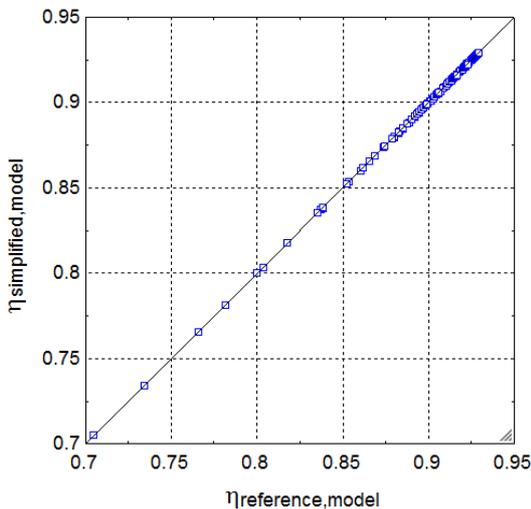


Figura 7: Consumo de la caldera dado por el modelo de referencia y el simplificado respectivamente.

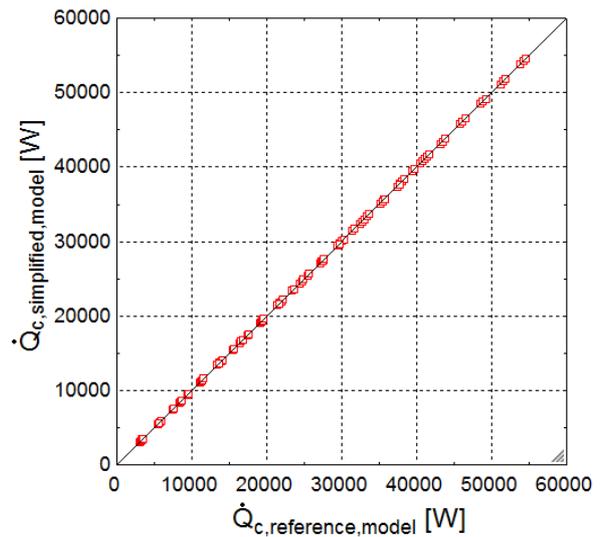


Figura 8: Eficiencia de la caldera dadas para el modelo de referencia y el modelo simplificado respectivamente.

5. AUXILIARES

Los consumos auxiliares (bomba, ventilador y calentador) pueden ser calculados usando la siguiente correlación, derivada de datos de catálogo para calderas de combustible líquido.

Light liquid fuel boiler

$$\dot{W}_{aux,lf} = 41.9 + 0.00149 \cdot \dot{Q}_{u,n} + 3.0 \times 10^{-10} \cdot \dot{Q}_{u,n}^2 \quad [19]$$

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un modelo simplificado de caldera el cual presenta un comportamiento satisfactorio frente al modelo de referencia de este equipo. El modelo simplificado puede ser utilizado en auditorías energéticas de este tipo de equipos con un buen grado de confiabilidad y mucho más simple de utilizar que el modelo de referencia para este tipo de aplicaciones.

7. REFERENCIAS

[1] EES engenierring ecuation solver, Klein and Alvarado. 2010.
 [2] ASHRAE (1999) HVAC Toolkit : A Toolkit for Primary System Energy Calculation. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
 [3] Bourdouxhe, J-P., Grodent, M., Lebrun, J., Saavedran C. (1994) A Toolkit for Primary HVAC System Energy Calculation – Part 1 : Boiler Model. ASHRAE Transactions, vol. 100, Part 2. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

- [4] N. Fonseca. J. Hannay. 2008. Estudio experimental de sistemas de ventilación en edificios como parte de la auditoria energética de sistemas HVAC. Revista UTP.
- [5] International Energy Agency (IEA). 2003 "Commissioning of Building and HVAC systems for improve energy performance". Annex 40 Final report.
- [6] ASHRAE HANDBOOK-HVAC Systems and Equipment. 2004. Chapter 6. Atlanta: American Society of Heating, Air-Conditioning and Refrigeration Engineers, Inc.
- [7] Hannay J. Hannay C. 2004. Building Commissioning results rapport. Laboratoire de thermodynamique applique Université de Liège.
- [8] F. Trebilcock, Jean Lebrun and Eric Winandy, 2002 Variable speed pumps and variable air volume fans, Université de Liège, Belgium.
- [9] Heinz E.Steinacher, 1985 Installations de climatisation à volume d'air variable, pyc édition, Paris.