



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

SISTEMA DE CALEFACCIÓN EN VIVIENDAS RURALES HACIENDO USO DE COMBUSTIBLES RENOVABLES

Manuel E. Budeguer, Ricardo A. Marchese y Horacio S. Méndez

*Departamento de Mecánica. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán.*

Av. Independencia 1700 -Tucumán – Argentina.

Tel: 0381-4364093/436411-Interno: 7577 - E-mail: depmec@herrera.unt.edu.ar.

mdeguer@yahoo.com.ar

rmarchese@herrera.unt.edu.ar

mendez_horacio_06@hotmail.com

RESUMEN

El propósito de este trabajo consiste en el diseño y construcción de un prototipo de caldera orientada a la quema de biomasa, la cual será empleada para la calefacción de viviendas rurales.

La biomasa a emplear, inicialmente, corresponderá a los residuos de cosecha de caña de azúcar, ya que Tucumán posee una gran extensión en superficie cubierta por caña, la cual asegura una amplia disponibilidad del recurso. Pero, se proyecta hacer uso de diferentes tipos de residuos orgánicos que resulten útiles como combustible. Esto dependerá de la disponibilidad de los mismos.

En el campo, en épocas de invierno severo, es necesario calefaccionar los ambientes de las viviendas. Normalmente recurriendo a carbón, leña o bien gas envasado. Todos estos combustibles implican un costo, al cual no todos los habitantes pueden acceder. Este trabajo busca subsanar este problema.

El calor aportado por el combustible se empleará para elevar la entalpía del agua que se hará circular por cañerías a una temperatura adecuada a fin de lograr la condición de confort deseada.

Además es importante destacar que el poder calorífico que posee el residuo es próximo al del bagazo (producto obtenido durante la molienda de la caña), el cual se emplea como combustible en las calderas de los ingenios.

Para el dimensionamiento se partió de la energía necesaria para lograr el efecto útil a partir del incremento de temperatura del agua, se fijó un cierto rendimiento del equipo y se consideró también la posibilidad de emplear el fluido no solo para calefacción sino también para uso doméstico.

En base a los cálculos se logró un diseño adecuado y óptimo, además se emplearon materiales de bajo costo y de fácil disponibilidad.

Los pasos siguientes corresponderán a la medición de las variables necesarias para la determinación de la eficiencia del equipo.

Palabras Claves: Caldera, Biomasa, Residuos de caña, Calefacción.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un sistema de calefacción para el empleo en viviendas rurales haciendo uso de combustibles renovables, tiene como objeto subsanar los costos que implican el empleo de los combustibles tipos; tales como la leña, el carbón y en algunos casos el gas natural, reemplazándolos por biomasa disponible en gran cantidad y a bajos costos.

Adicionalmente, el porcentaje de la biomasa que se usa para producir energía procede de materiales residuales que es necesario eliminar. Es importante resaltar que el aprovechamiento energético supone "convertir un residuo en un recurso", de esta forma se consigue gestionar residuos procedentes de podas y limpieza de bosques, rastrojos y podas agrícolas, disminuyendo el riesgo de incendios, enfermedades y plagas, y su propagación, y a su vez dando un valor a los residuos para que sean aprovechados y reutilizados [5].

Pero también contribuye al medio ambiente desde el punto de vista del balance neutro del CO₂, al cerrar el ciclo de carbono, es decir, que el CO₂ generado en la combustión corresponde al absorbido por la planta, origen de la biomasa, durante su desarrollo.

Los productos de la combustión resultan ser menos contaminantes, al no poseer en su composición elemental, elementos tales como el azufre, y presentar un bajo contenido de nitrógeno.

Con respecto a las emisiones de partículas, estas resultan menores que las producidas por otros tipos de combustibles sólidos como ser, por ejemplo: el carbón.

En el campo, en época de invierno severo, es necesario calefaccionar los ambientes de las viviendas rurales. La forma de hacerlo, normalmente es recurriendo a carbón, leña o gas envasado, todos ellos combustibles de alto costo, y especialmente el GLP, no renovable. En el caso de la leña y el carbón, resultan cada vez más difíciles de conseguir, y por lo que sus costos se encarecen.

Varios son los sistemas de calefacción que han sido probados para subsanar este inconveniente, algunos con mejor suerte que otros, pero básicamente todos adolecen del mismo problema: el costo del combustible empleado.

El trabajo intenta atacar este problema, proyectando una caldera de bajo costo, y que emplee combustibles alternativos renovables con un diseño relativamente óptimo, a fin de aprovechar el calor generado por la combustión de la biomasa, para calentar el agua hasta una temperatura adecuada.

Del caudal total de agua calefaccionada, se empleara una parte para efectuar la calefacción de la vivienda, mientras que la otra se usara para generar ACS (Agua Calefaccionada Sanitaria).

La biomasa a emplear como combustible en la citada caldera, corresponde al residuo de la cosecha de caña de azúcar.

Se opto por el empleo de este residuo como combustible, fundamentalmente por la disponibilidad y características del mismo, las cuales fueron comprobadas en base a los estudios realizados por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, de donde se obtuvieron los datos fundamentales para el cálculo térmico.

Con respecto a la disponibilidad; los estudios realizados por la citada institución aseguran que se pueden obtener, en promedio, 15 tn de RAC por hectárea.

2. MATERIALES Y METODOS

Para el desarrollo y cálculo de las dimensiones de la cámara de combustión se determino la cantidad de combustible necesaria para lograr el efecto útil. Se consideraron en forma independiente los requerimientos de agua calefaccionada para producir ACS y la que se empleara en la calefacción ambiente. El esquema de la instalación puede observarse en la Figura 1.

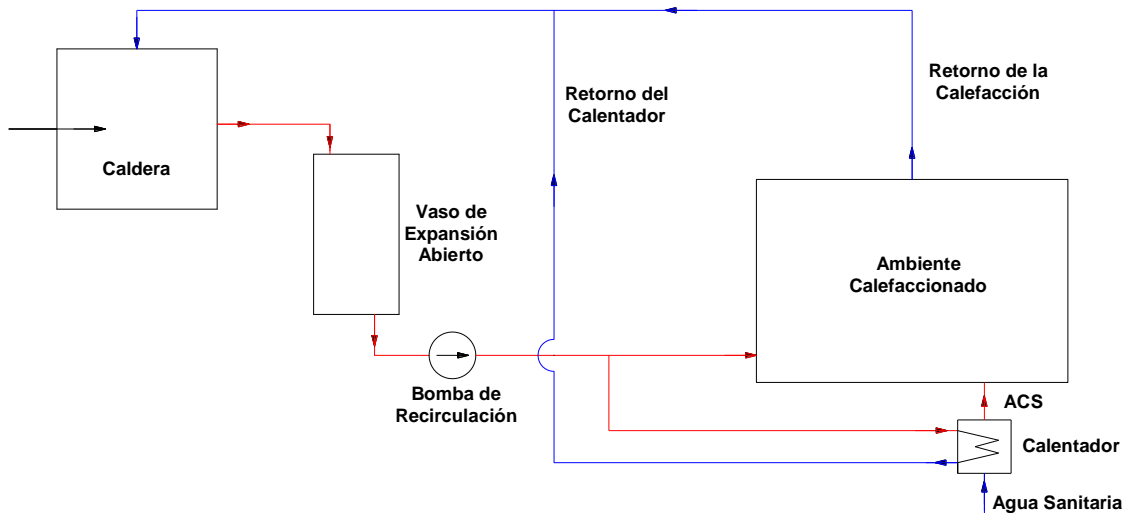


Figura 1. Esquema básico de la instalación

2.1. Cálculo de la energía necesaria para la generación de ACS

En la determinación de la cantidad de energía necesaria para calentar el agua proveniente de la red, a fin de generar ACS, se considero un consumo de agua sanitaria de 70 [lt/día persona], con una temperatura promedio de entrada al calentador $t_e = 5$ [°C] y una temperatura de salida $t_s = 45$ [°C]. Ver Figura 2.

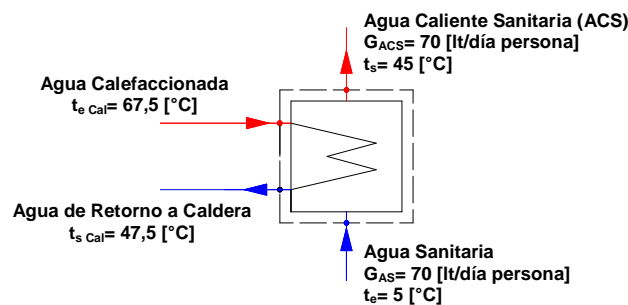


Figura 2. Calentador de agua

El calor necesario será:

$$Q_{ACS} = 4,18 \cdot c_p \cdot (t_s - t_e) \cdot G_{ACS} \cdot \rho_{H_2O} \quad (1)$$

- c_p [kcal/kg °C]: Calor específico del agua.
- t_s [°C]: temperatura de salida del calentador.
- t_e [°C]: temperatura de entrada al calentador.
- G_{ACS} [lt/día persona]: Caudal de agua a emplear como agua caliente sanitaria.
- ρ_{H_2O} [kg/l]: densidad del agua.

Reemplazando en la Ecuación (1):

$$Q_{ACS} = 11704 \text{ [kJ/día persona]}$$

2.1. Cálculo de la energía necesaria para la calefacción de la vivienda

La vivienda se encuentra ubicada en la localidad; Los Naranjos, departamento Burruyacú, provincia de Tucumán, donde la temperatura media exterior ronda, en promedio, los 2 [°C] en invierno. Para este cálculo se considero una temperatura de confort interior de 20[°C].

La superficie expuesta (techos y paredes) a la diferencia de temperaturas es de 84 [m²].

Si bien el método para el cálculo de las necesidades de calefacción contempla la existencia de dos cargas térmicas, una relacionada con la transmisión de calor a través de los cerramientos hacia los locales no climatizados o el exterior, y otra, con el enfriamiento de los locales por ventilación e infiltración de aire exterior, a fines prácticos vamos a considerar que ambas se encuentran englobadas en la ecuación siguiente:

$$Q_{CAL} = K \cdot S \cdot (t_{int} - t_{ext}) \quad (2)$$

- t_{int} [°C]: temperatura interior vivienda.
- t_{ext} [°C]: temperatura exterior vivienda.
- S [m²]: superficie de transmisión (techo y paredes).
- K [kJ/h. m² °C]: coeficiente de transmisión global. Tomamos un promedio de $K = 7$ [kJ/h.m².°C].

Reemplazando en la Ecuación (2), obtenemos:

$$Q_{CAL} = 10584 \text{ [kJ/h]}$$

Para un día tendremos que la necesidad calórica será:

$$Q_{CAL} = 254016 \text{ [kJ/día]}$$

2.1. Determinación de la cantidad de combustible necesaria

Considerando que en la vivienda habitan cuatro personas y sumando las cantidades de calor necesarias para cada caso, obtenemos:

$$Q_T = 4 \cdot Q_{ACS} + Q_{CAL} \quad (3)$$

$$Q_T = 300832 \text{ [kJ/día].}$$

Para determinar la cantidad de combustible, vamos a suponer un rendimiento del 60 [%], que es el valor que se maneja para este tipo de caldera, y teniendo en cuenta la definición del rendimiento térmico, que viene dado por la Ecuación (4):

$$\eta = Q_{Aprovechado} / Q_{Aportado} \quad (4)$$

$$\eta = Q_T / B \cdot H_u \quad (4.1)$$

- Q_T [kJ/día]: es el calor aprovechado o necesario para lograr el efecto útil.
- B [kg comb/día]: corresponde al consumo específico de combustible.

- H_u [kJ/kg comb]: Poder calorífico inferior del combustible. Para nuestro caso, considerando el residuo de cosecha de caña, es de: 5539 [kJ/kg combustible].

Despejando de la ecuación (4.1) el consumo específico y reemplazando valores:

$$B = 91 \text{ [kg combustible/día]}$$

Con este valor estaremos en condiciones de definir el tamaño de la cámara de combustión y el volumen de gases generado.

2.3. Tamaño de la cámara de combustión

En base a la composición elemental del combustible se determinó el volumen de gases húmedos para distintos valores de λ (factor de dilución). Ver Tabla 1.

Es importante destacar que para fines prácticos y por la naturaleza del residuo, al no tener bien definido su comportamiento en la combustión, se consideró λ óptimo igual al del bagazo, el cual varía entre 1,3 y 1,8.

Tabla 1. Volumen y caudal de gases húmedos

λ	V_{gh} [Nm ³ /kg comb.]	G_{gases} [Nm ³ /h]
1,00	2,90	11,01
1,10	3,10	11,76
1,20	3,30	12,51
1,30	3,50	13,26
1,40	3,70	14,02
1,50	3,90	14,77
1,60	4,09	15,52
1,70	4,29	16,28
1,80	4,49	17,03
1,90	4,69	17,78
2,00	4,89	18,53

Adoptando un factor de dilución de 1,8, que le corresponde un caudal de gases $G_{gases} = 17,03$ [Nm³/h], determinamos el volumen de la cámara de combustión con un método que consiste en asumir una cierta carga térmica admisible [4].

Así, consideramos una carga térmica, $q = 200000$ [kcal/h m²] (valor empírico que depende del tipo de parrilla), y calculamos la sección de la cámara de combustión, la cual vendrá definida por la siguiente ecuación:

$$F_{cc} = Q_T / (24 \cdot q) \quad (6)$$

Reemplazando valores en la Ecuación (6), obtenemos una superficie:

$$F_{cc} = 0,015 \text{ [m}^2\text{]}$$

Para determinar la altura de la cámara de combustión se debe tener en cuenta el cociente entre el caudal de gases G_{gases} y la sección calculada F_{cc} , a fin de definir la velocidad de los gases v_g :

$$v_g = 0,31 \text{ [m/seg].}$$

Para continuar el cálculo es importante establecer el tiempo de residencia del combustible t_r , que se corresponde con el tiempo de permanencia del mismo en la cámara de combustión. En general, para el bagazo este tiempo varía entre 2 y 2,5 [seg]. Pero para el caso de la malhoja, que tiene una menor densidad, adoptaremos $t_r = 3$ [seg].

Finalmente la altura de la cámara de combustión (H_{cc}), vendrá dada por el producto entre la velocidad de los gases, v_g , y el tiempo de residencia, t_r .

$$H_{cc} = 0,93 \text{ [m]}.$$

2.4. Cálculo del caudal de agua requerido

2.4.1. Caudal de agua para calefacción

La calefacción se realizara mediante radiadores. En general, en este tipo de instalaciones el fluido calefactor que llega al equipo posee una temperatura que varía entre 60 y 90 [°C].

A los fines del cálculo, adoptaremos una temperatura de 75 [°C] para el agua de salida de la caldera.

Se considera una cierta pérdida de calor del fluido calefactor en su camino a los radiadores. Esta pérdida será del 10 [%] de la entalpia que posee el agua a la salida de la caldera.

Por otro lado, la diferencia de temperatura, que por lo general se presenta, entre el agua que llega al radiador y la que retorna del mismo, oscila entre 10 y 20 [°C]. Adoptamos 15 [°C]. Ver Figura (3).

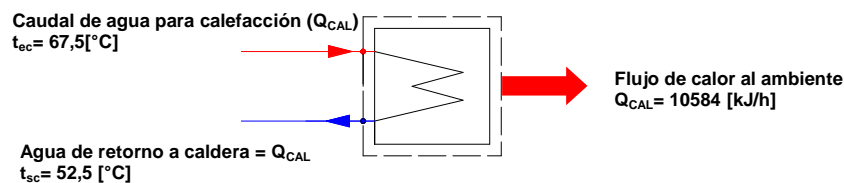


Figura 3. Balance de energía en el radiador

En base a estos datos y realizando un balance térmico en el radiador, obtenemos:

$$G_{CAL} \cdot C_p \cdot t_{ec} = Q_{CAL} + G_{CAL} \cdot C_p \cdot t_{sc} \quad (7)$$

Despejando de la Ecuación (7) el caudal de calefacción y reemplazando valores:

$$G_{CAL} = 169 \text{ [lt/h]}$$

2.4.2. Caudal de agua para la generación de ACS

La diferencia de temperatura entre la entrada y salida del calentador ronda por lo general los 20 [°C], que es el valor que adoptamos a fines de cálculo.

Para la determinación de este caudal se procedió de la misma manera que para el apartado anterior, pero realizando ahora un balance en el calentador (ver Figura 2).

$$G_{Cal} \cdot C_p \cdot t_{e Cal} = Q_{CAL} + G_{Cal} \cdot C_p \cdot t_{sCal} \quad (8)$$

Despejando y reemplazando valores en la Ecuación (8):

$$G_{Cal} = 24 \text{ [lt/h]}$$

El caudal total vendrá definido por la suma de los caudales determinados en los apartados 2.4.1 y 2.4.2.

$$Q_T = 193 \text{ [lt/h]}$$

2.5. Domo de la caldera

El domo será de forma cilíndrica, parcialmente lleno, ubicado en posición horizontal.

A fin de hacer uso de elementos disponibles y de bajo costo, emplearemos, como domo, un tanque de 500 litros, el cual presenta un diámetro de 0,8 [m] y una longitud de 0,95 [m].

Por normas de seguridad y con el objeto de realizar un control en el volumen de agua contenido en el domo, ya que, el nivel de agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de unos límites determinados (normalmente son unos 50 [mm] por encima o por debajo de la línea central de la caldera) [2], deberemos establecer lo que se denomina; tiempo de tránsito o constante de transición de la caldera.

Esta vendrá definida por la siguiente ecuación:

$$T_t = S \cdot \Delta h \cdot \gamma_a / Q_T \quad (9)$$

- $S \text{ [m}^2\text{]}$: superficie del espejo del agua.
- $T_t \text{ [seg]}$: tiempo de transición o constante de transición de la caldera. Para calderas pequeñas de vapor este tiempo varía entre 10-50 [seg].
- $Q_T \text{ [kg/seg]}$: caudal total de generación de la caldera.
- $\Delta h \text{ [m]}$: diferencia de nivel entre el nivel normal y el mínimo adoptado.
- $\gamma_a \text{ [kg/m}^3\text{]}$: peso específico del agua.

El valor de la superficie del espejo de agua, teniendo en cuenta la geometría cilíndrica del domo [6], será:

$$S = L \cdot \sqrt{D^2 - \Delta h^2} \quad (10)$$

- $S \text{ [m}^2\text{]}$: superficie del espejo del agua.
- $\Delta h \text{ [m]}$: diferencia de nivel entre el nivel normal y el mínimo adoptado. Se adopto un valor de 0,1[m].
- $L \text{ [m]}$: longitud del domo.
- $D \text{ [m]}$: diámetro del domo.

Para determinar el volumen de agua [3], en el interior del domo:

$$V = LR^2 \cdot [(\alpha / 57,30) - \text{sen } \alpha \cdot \text{cos } \alpha] \quad (11)$$

- $L \text{ [m]}$: longitud del domo.
- $R \text{ [m]}$: Radio del domo.
- α : mitad del ángulo que define la longitud de la cuerda. (Ver Figura 4).

El ángulo α , vendrá definido por: $\alpha = \arccos(1-H/R)$. O bien $\alpha = \arcsin[(S/2 \cdot L)/R]$.

Los valores calculados fueron los siguientes:

$$S = 0,754 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$T_r = 1410 \text{ [seg]}$$

$$V_{\text{normal}} = 0,238 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_{\text{mínimo}} = 0,200 \text{ [m}^3\text{]}$$

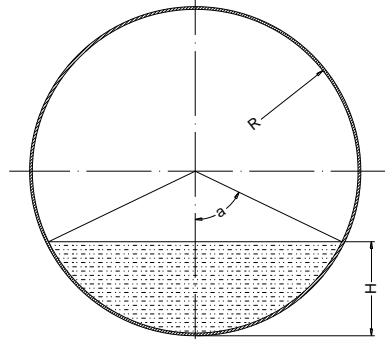


Figura 4. Dimensiones para el cálculo del volumen del líquido dentro del domo.

2.6. ETAPAS CONSTRUCTIVAS

A continuación se muestran algunas figuras relacionadas con las etapas constructivas de la caldera

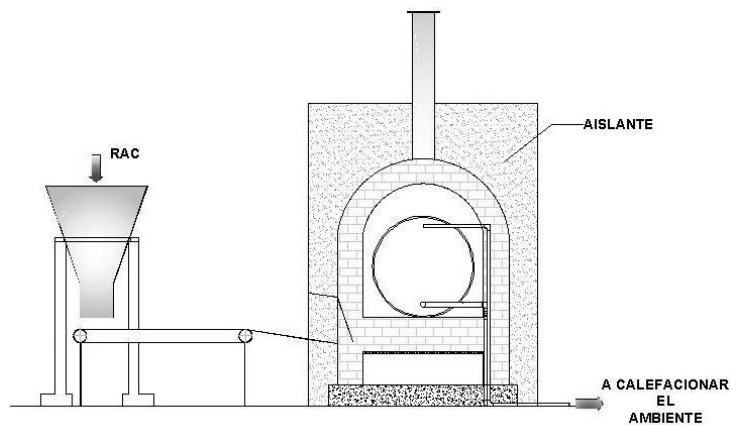


Figura 5. Esquema básico de la instalación de la caldera



Figura 6. Cámara de combustión y cuerpo de la caldera



Figura 7. Construcción del sistema aislante de doble pared



Figura 9. Caldera de biomasa para calefacción

3. CONCLUSIÓN

La cantidad de combustible definida corresponde a un valor relativamente razonable y accesible, considerando que el costo del mismo está, fundamentalmente, relacionado con la recolección y acarreo.

Las dimensiones teóricas de la cámara de combustión se modificaron en función de la disposición del domo adoptando una sección en la cámara de $F_{cc} = 0,7 \text{ [m}^2\text{]}$, que si bien, disminuyo la velocidad de los gases no afecto el tiro. La altura H_{cc} se mantuvo conforme a lo calculado.

Se observa que el tiempo de transición (T_t) en esta caldera es considerablemente grande respecto a los generadores de vapor. Esta constante representa, el intervalo de tiempo que transcurre desde el momento que se suspende la entrada de agua al domo hasta que el nivel alcanza el valor mínimo, partiendo inicialmente desde el nivel normal. Es decir, es un parámetro usado para definir el tipo de controlador a emplear. Esto está relacionado con el control y seguridad de la caldera. Para nuestro caso el controlador no necesita una respuesta tan rápida, como la que sería necesaria para una caldera de vapor.

Durante las pruebas, el diseño desarrollado presentó un comportamiento adecuado en su funcionamiento.

Cabe destacar que para evitar las pérdidas considerables de calor, que se pueden verificar a través de las paredes que recubren el domo, se decidió revestir la estructura original, empleando un sistema de doble pared y procediendo a rellenar los espacios con arcilla.

El próximo paso consiste en medir los valores de temperatura del agua y caudal circulante, temperatura y composición de los gases de combustión, y el consumo horario y específico de RAC, a fin de poder calcular el rendimiento real de la caldera.

Se proyecta, a su vez, el diseño y evaluación de un precalentador de aire y economizador, que tenderán a aumentar el rendimiento, mediante la disminución de la entalpía de los gases de escape.

4. REFERENCIAS

- [1] Baehr H. D., *Tratado Moderno de Termodinámica*, José Montesó, Barcelona, España, 1965.
- [2] Creus Solé A., *Instrumentación Industrial*, Bogotá, Colombia, 1999
- [3] Perry R.H., Chilton C.H., *Manual de Ingeniero Químico*, McGraw Hill, Colombia.1982.
- [4] Babcock and Wilcox, *STEAM*, New York, 1998.
- [5] IDAE, *Biomasa: Edificios*, Madrid, 2007.
- [6] E. J. Adam, J. L. Marchetti, *Dynamic simulation of large boilers with natural recirculation*, Computers & Chemical Engineering, **Vol. 23**, Pages 1031-1040, 1 August 1999.