



**HAL**  
open science

# MODELADO Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA HORNILLA DE BIOMASA

Julián Ibarra Ballesteros, Yesid Javier Rueda-Ordóñez, Omar Gelvez Arocha

► **To cite this version:**

Julián Ibarra Ballesteros, Yesid Javier Rueda-Ordóñez, Omar Gelvez Arocha. MODELADO Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA HORNILLA DE BIOMASA. 2018. hal-01700614

**HAL Id: hal-01700614**

**<https://hal.science/hal-01700614>**

Preprint submitted on 5 Feb 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RESEARCH REPORT - PREPRINT PAPER

## **MODELADO Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA HORNILLA DE BIOMASA**

Julián Camilo Ibarra Ballesteros  
Yesid Javier Rueda-Ordóñez  
Omar Armando Gelvez Arocha

A002  
Bucaramanga 2017

Research Group on Energy and Environment – GIEMA  
School of Mechanical Engineering  
Universidad Industrial de Santander

Julián Camilo Ibarra, Yesid Javier Rueda, Omar Armando Gelvez, Modelado y dimensionamiento de una hornilla de biomasa, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander. Research report, Bucaramanga, Colombia, 2017.

**Abstract:** The objective of this work was the design, modelling and sizing of a furnace for combustion of sugar cane leaves, with the purpose of obtaining energy in the form of heat from this residual biomass. From the physical-chemical characteristics of the biomass, a combustion analysis was carried out from the 15.72 MJ / kg of energy produced in the chemical reaction. For this, the equilibrium composition of the mixture and its respective adiabatic flame temperature were calculated. Then, the one-dimensional modelling of heat transfer was carried out, in which the thermodynamic properties of the combustion gases, the emissivity and the coefficients of heat transfer by internal and external forced convection were calculated. From this, the average temperature of the combustion gases and the heat losses through the walls of the enclosure were determined. An adiabatic flame temperature close to 772 °C was found and is dependent on the nature of the fuel and the excess of air set to 50%. Also, a low average temperature requires higher volume fireplaces due to the increase in residence time. Therefore, burners with low fuel consumption require greater insulation, since heat losses can be greater than 30%, considered significant for this process. Finally, the sizing of a burner for the combustion of biomass that requires the transfer of heat to a 100 kW steam generator is presented.

**Keywords:** biomass, combustion, kinetics, furnace, boiler

**Correspondence:** [yjruedao@uis.edu.co](mailto:yjruedao@uis.edu.co)

Research Group on Energy and Environment – GIEMA  
School of Mechanical Engineering  
Universidad Industrial de Santander  
Ciudad Universitaria  
Bucaramanga, Colombia

email: [giema@uis.edu.co](mailto:giema@uis.edu.co) <http://giema.uis.edu.co>

# Modelado y dimensionamiento de una hornilla de biomasa

J. Ibarra<sup>1</sup>, Y. J. Rueda-Ordóñez<sup>2</sup>, O. Gelvez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de investigación en Energía y Medio Ambiente, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: julian.c.ibarra@gmail.com

<sup>2</sup>Grupo de investigación en Energía y Medio Ambiente, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: yjruedao@uis.edu.co

<sup>3</sup>Grupo de investigación en Energía y Medio Ambiente, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue el diseño, modelado y dimensionamiento de un horno para combustión de hojas de caña de azúcar, con el propósito de obtener energía en forma de calor a partir de esta biomasa residual. Por lo tanto, a partir de las características físico-químicas de la biomasa, se realizó un análisis de la combustión a partir de los 15.72 MJ/kg de energía producidos en la reacción química. Para ello, se calculó la composición de equilibrio de la mezcla y su respectiva temperatura de llama adiabática. Entonces, se realizó el modelamiento unidimensional de transferencia de calor, en el que se calcularon las propiedades termodinámicas de los gases de combustión, la emisividad y los coeficientes de transferencia de calor por convección forzada interna y natural externa. A partir de esto, se determinaron la temperatura promedio de los gases de combustión y las pérdidas de calor a través de las paredes del recinto. Se encontró una temperatura de llama adiabática cercana a los 772°C y es dependiente de la naturaleza del combustible y el exceso de aire que se estipuló en 50%. También, una temperatura promedio baja requiere de hogares de mayor volumen debido al aumento del tiempo de residencia. Por consiguiente, quemadores de bajo consumo de combustible requieren un mayor aislamiento, pues las pérdidas de calor pueden ser mayores que 30%, consideradas significativas para este proceso. Finalmente, se presenta el dimensionamiento de una hornilla para la combustión de biomasa que requiere transferir calor a un generador de vapor de 100 kW.

**PALABRAS CLAVE:** Biomasa, Combustión, Cinética, Horno, Caldera

## 1. INTRODUCCIÓN

La generación y gestión eficiente de energías renovables es uno de los retos de la ingeniería para las próximas décadas [1]–[6]. La producción de energía a partir de la biomasa es uno de los procesos que han ido adquiriendo mayor relevancia en el campo investigativo por ser una fuente de energía renovable con una gran versatilidad tecnológica, de modo que mediante procesos de descomposición termoquímica (combustión, gasificación, pirólisis) y bioquímica (digestión, fermentación) se puede generar energía eléctrica, biocombustibles o simplemente energía térmica [7].

Por este motivo surgió la necesidad de producir nuevas investigaciones cuyo objetivo sea el del aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía, en especial en países agrícolas como los suramericanos, donde los residuos orgánicos agroindustriales normalmente son quemados trayendo consigo problemas medioambientales.

La combustión de biomasa es un proceso de conversión termoquímica para la obtención de energía térmica (calor) a través de diversas reacciones homogéneas y heterogéneas que se dan de forma consecutiva [8]. En otras palabras, el material vegetal que ingresa al sitio de combustión debe pasar a través varios procesos hasta finalmente alcanzar la ignición. Por esto, es indispensable entonces, la caracterización de las propiedades de combustión y el análisis de la cinética química asociada a la descomposición termoquímica de la hoja de caña de azúcar para así poder llevar a cabo una caracterización de las reacciones químicas que se dan durante la pirólisis[9] con el propósito de limitar las principales variables que afectan el proceso y así llevar a cabo un dimensionamiento adecuado de la hornilla.

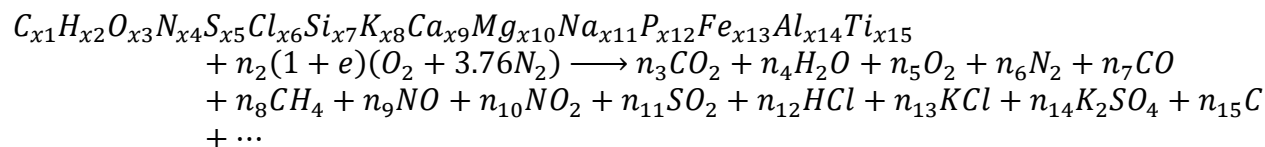
Finalmente, el objetivo de este artículo es realizar un modelamiento analítico de la combustión de la hoja de caña de azúcar para su posterior dimensionamiento teniendo en cuenta factores de relación aire/combustible, eficiencia de combustión, y tiempo de residencia, esto sabiendo que para un óptimo proceso es necesario que la hornilla esté a alta temperatura y la posibilidad de contar con un tiempo suficiente para el quemado[10].

## 2. METODOLOGÍA ANALÍTICA

Un adecuado análisis es necesario para poder realizar una caracterización del sitio de combustión, para este trabajo se usó un modelado cerodimensional[11] que tuvo en cuenta la conservación de especies químicas a partir de una reacción global ya establecida. Esta reacción corresponde a la descomposición térmica de la biomasa, la cual incluye factores como la energía de activación requerida para realizar la combustión; la primera ley de la termodinámica para finalmente realizar un análisis de la transferencia de calor de los gases.

### 2.1. Estequiometría

Los métodos analíticos para la comprensión del proceso de la combustión requieren de una reacción global[12] en la cual se relaciona el análisis elemental de la biomasa y la cantidad de aire suministrado al proceso, para así obtener como productos gases y cenizas.



Para la caracterización de la biomasa es necesario realizar un análisis elemental a la hoja de la caña de azúcar, dicho análisis tiene como objetivo entregar la relación en masa de los principales elementos presentes. Sin embargo, a pesar de que la biomasa está compuesta por un sinnúmero de componentes, éste trabajo usará los mostrados en la Tabla 1, los cuales se consideran que son los de mayor influencia para este análisis debido a que los otros se encuentran en pequeñas proporciones[12].

El segundo término de la reacción, hace referencia al aire como una mezcla 21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>, el cual jugará un papel fundamental durante la oxidación debido a que el combustible requiere de

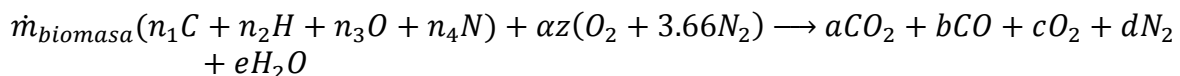
oxígeno para la combustión y es necesario tener una relación aire/combustible óptima, de manera que ésta variable se relacionó en la ecuación (2) con un parámetro  $\alpha$  conocido como porcentaje de exceso de aire.

**Tabla 1.** Propiedades térmicas de la hoja de caña de azúcar

<b>Hoja de Caña de Azúcar</b>	
<b>Análisis Elemental</b>	
C	42.94
H	6.26
O	46.65
N	0.31
<b>Análisis Próximo</b>	
W	8.42
MV	86.64
CF	9.51
CZ	3.85
<b>Poder Calorífico [MJ/kg]</b>	
PCS	18.61
PCI	15.60

**Fuente:** [3]

Finalmente, los productos de combustión deben asumirse a partir de una combustión real, aunque un análisis más detallado es importante para conocer la cantidad de NO<sub>x</sub> presente en los humos por ser altamente contaminantes, este trabajo solamente contará con la producción de dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno, nitrógeno y vapor de agua. De esta manera, la reacción de combustión fue representada de la siguiente forma:



**Tabla 2.** Moles de combustible por kilogramo de combustible

<b>Especie</b>	<b>Fracción Másica</b>	<b>Moles en 1kg de Combustible</b>
C	42.940	35.751
H	6.260	62.109
O	46.650	29.157
N	0.310	0.221
<b>Total</b>	96.160	127.239

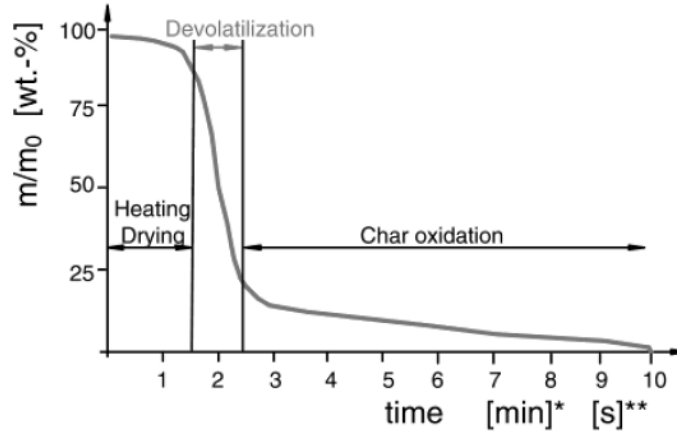
**Fuente:** Autores

Donde  $\dot{m}_{biomasa}$  se conoce como el flujo másico de hoja de caña de azúcar por unidad de tiempo; para el cálculo de los  $n_i$  en la ecuación 2 se listan en la tabla 2 y se definen como la cantidad de moles contenida por cada especie química por unidad de kilogramo de hoja de caña; así mismo el parámetro  $z$ , conocido como aire teórico, se calcula a partir de la siguiente relación:

$$z = \dot{m}_{biomasa} \left[ n_1 + \frac{1}{4} n_2 - \frac{1}{2} n_3 \right]$$

## 2.2. Descomposición térmica de la biomasa y tiempo de residencia

Como se muestra en la figura 1, la masa de la hoja de caña va disminuyendo a medida que la temperatura aumenta producto de la pirólisis. Esta transformación de la materia debe ser caracterizada mediante diferentes modelos matemáticos para comprender su comportamiento.



**Figura 1.** Análisis termogravimétrico. **Fuente:** [8]

Como se mencionó anteriormente, la hoja de la caña al entrar en combustión atraviesa una fase de secado, pirólisis y carbonización. El secado consiste en la evaporación de la humedad contenida en la hoja hasta más o menos 120°C, luego la hemicelulosa, celulosa y lignina entran en proceso de descomposición térmica produciendo volátiles durante el proceso que a su vez reaccionan con el aire en la hornilla; como resultado de la pirólisis se produce la carbonización en el que finalmente se hará combustión en el estado sólido[13][9]. Para poder caracterizar la energía de activación y el tiempo de residencia se usó los valores listados en la tabla 3 que corresponden a los factores de las ecuaciones 4 y 5. Lo que se realizó fue ajustar el modelo matemático caracterizado en [14] y finalmente aplicando runge-kutta se obtiene una solución para diferentes velocidades de calentamiento. El modelo matemático planteado se plantea que

$$\frac{d\alpha}{dt} = A[f(\alpha)]e^{(-E/RT)}$$

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_A = F_1 \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_B + F_2 \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_C + F_3 \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_D + F_4 \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_E + F_5 \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_F + F_6 \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_G$$

**Tabla 3.** Energía de activación, factor pre-exponencial y pseudo-composición del componente

Reacción	E	log A	F
R1	176.00	14.00	0.20
R2	313.00	25.33	0.40
R3	150.00	10.30	0.10
R4	80.00	3.70	0.08
R5	150.00	8.36	0.08
R6	100.00	4.77	0.15

Fuente: [14]

### 2.3. Primera ley de la termodinámica

Como ya se había advertido anteriormente, la combustión es un proceso de liberación de energía, de esta manera se transformará la energía química en energía térmica, así que este proceso debe cumplir con la primera ley de la termodinámica aplicada a las reacciones químicas

$$\Delta\bar{H} = \Delta\bar{H}^{\circ} + \sum_i n_{ri} \Delta\bar{h}_{pi}^{T_r} - \sum_i n_{pi} \Delta\bar{h}_{ri}^{T_p}$$

La ecuación anterior puede ser aplicada a cualquier reacción química que no se le aplique trabajo, donde el término  $\Delta\bar{H}$  es la entalpía o calor por mol de combustible extraído o suministrado a la reacción,  $\Delta\bar{H}^{\circ}$  es la entalpía o calor estándar de combustión a presión constante y los otros términos son la energía de entrada de los reactivos y de salida de los productos.

$$\Delta\bar{H}^{\circ} = \sum_i v_i \bar{h}_{f,i}^{\circ}$$

Por lo que el calor estándar de combustión no depende de otros factores sino del combustible y representa el calor generado por un mol de combustible cuando se oxida completamente a condiciones estándar, sin embargo en casos más prácticos, se conoce del combustible la cantidad de calor energía por unidad de masa, llamado también poder calorífico el cual es listado en la tabla 1. Transformando la anterior ecuación, obtenemos que

$$n_c \dot{m}_{combust} \bar{q}^{\circ} + \sum_i n_{ri} \Delta\bar{h}_{pi}^{T_r} = Q + \sum_i n_{pi} \Delta\bar{h}_{ri}^{T_p}$$

Se puede notar que simplemente se transformó la energía de formación por  $\bar{q}^{\circ}$  que es el poder calorífico inferior (PCI). De igual forma, se incluyó el término  $n_c$  para tener en cuenta los efectos de la combustión incompleta con un término denominado eficiencia térmica de la combustión [15]. Éste término relaciona la cantidad de la cantidad de energía perdida en los humos, como lo son gases que no se oxidaron por completo como el monóxido de carbono, el hidrógeno, el metano, el carbono sólido en las cenizas, etc.

$$n_c = 1 - \frac{\sum_i n_i \bar{q}_{ii}^{\circ}}{\dot{m}_{combust} \bar{q}_i^{\circ}}$$



Donde el término  $n_i \bar{q}_{ii}^{\circ}$  es el coeficiente estequiométrico del combustible no quemado y su respectivo poder calorífico.

### 2.3.1. Temperatura de llama adiabática

Para el análisis del sistema térmico es de gran importancia el cálculo de la llama adiabática, pues es una aproximación de la temperatura a la que alcanzan los gases de combustión cuando estos aún no han transferido calor al entorno, es decir, es la máxima temperatura a la que podemos tener los gases y ésta transferirá calor a su entorno por medio de radiación. Cabe resaltar que la temperatura de llama adiabática depende del exceso de aire, la eficiencia de la combustión y la naturaleza del combustible. Su cálculo está dado por

$$n_c \bar{q}^{\circ} + \sum_i n_{ri} \overline{\Delta h_{ri}}^{T_r} = \sum_i n_{pi} \overline{\Delta h_{pi}}^{T_{LL}}$$

## 2.4. Transferencia de calor en la hornilla

Los análisis llevados a cabo deben dar como resultado las pérdidas de calor a través de las paredes, las temperaturas de las paredes y salida de los gases de combustión. Para ello es necesario realizar el análisis después de la liberación de energía los gases de combustión se encuentran a la temperatura de llama adiabática para luego transferir calor por convección y radiación hacia las paredes.

### 2.4.1. Propiedades de los gases de combustión

El cálculo de las propiedades como la viscosidad, el calor específico, la conductividad térmica y la emisividad son el punto de partida para el cálculo de la transferencia de calor en el hogar. Es necesario conocer la composición de los gases de combustión y de esta manera calcular las propiedades térmicas de los gases de combustión. Por lo tanto, la fracción molar se conoce como

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i}$$

Donde  $n_i$  es la cantidad de moles de cada especie química en los productos. Conociendo la fracción molar calculamos la masa molar

$$M = \sum_i x_i M_i$$

- **Calor Específico:** El calor específico es la cantidad de energía que se necesita suministrar a una sustancia por unidad de temperatura, y éste depende de la temperatura a la que se encuentre la sustancia. En gases la dependencia del calor específico es mínima, por lo que mediante EES se hizo una regresión polinómica de tercer orden para el cálculo del calor específico de cada componente como se muestra en la tabla. Para el cálculo del poder calorífico por unidad de mol está dado por

$$\bar{Cp} = \sum_i x_i \bar{Cp}_i \left[ \frac{kJ}{mol K} \right] \quad Cp = \sum_i \frac{1000x_i}{M_i} Cp_i \left[ \frac{kJ}{kg K} \right]$$

**Tabla 4.** Calor específico de los gases de combustión

<b>Cp = a+bT+cT<sup>2</sup>+dT<sup>3</sup> [kJ/kg-K] 100 &lt; T [°C] &lt; 1500</b>					
<b>Especie</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>CO2</b>	8.4277E-01	8.7053E-04	-5.6089E-07	1.4008E-10	99.98
<b>CO</b>	1.0013E+00	3.1139E-04	-8.8802E-08	2.7868E-12	99.98
<b>O2</b>	8.8848E-01	4.3785E-04	-2.7872E-07	7.3791E-11	99.99
<b>H2</b>	1.4590E+01	-1.2178E-03	3.2626E-06	-1.0615E-09	99.97
<b>N2</b>	9.9946E-01	2.5683E-04	-1.9049E-08	-2.3532E-11	99.90
<b>H2O</b>	1.8087E+00	5.9791E-04	1.7216E-07	-1.0735E-10	99.99

**Fuente:** Autores

- **Viscosidad Dinámica:** La viscosidad es la oposición que ejerce un fluido al esfuerzo cortante y al igual que el calor específico varía con la temperatura. Como se muestra en la tabla se puede observar las regresiones mediante EES. Para el cálculo de la viscosidad de la mezcla se usará el método de Wilke[16], donde establece que

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}}$$

Donde  $\mu_i$  es la viscosidad de cada componente,  $x_i$  es la fracción molar de ese componente y  $\Phi_{ij}$  es el factor de interacción entre los gases, el cual está dado por

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2$$

<b>μ=a+bT+cT<sup>2</sup>+dT<sup>3</sup> [kg/m-s] 100 &lt; T [°C] &lt; 1500</b>					
<b>Especie</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>R2</b>
<b>CO2</b>	1.3751E-05	4.8282E-08	-1.6831E-11	3.7788E-15	100
<b>CO</b>	1.6294E-05	4.8396E-08	-3.4526E-11	1.5409E-14	100
<b>O2</b>	2.0042E-05	4.8906E-08	-1.5352E-11	3.7249E-15	100
<b>H2</b>	8.5829E-06	1.9323E-08	-4.2491E-12	8.9080E-16	100
<b>N2</b>	1.6932E-05	4.4119E-08	-2.0980E-11	5.8827E-15	100
<b>H2O</b>	8.5253E-06	3.9493E-08	2.1166E-12	-2.5227E-15	100

- **Conductividad Térmica:** La conductividad térmica es la capacidad de los gases de transferir calor. Para gases este valor es pequeño en comparación con los líquidos o sólidos. En la

tabla se muestra las conductividades de los gases de combustión. Para la mezcla, se usó el método del Wilke

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i k_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}}$$

Donde  $k_i$  es la conductividad de cada componente, y el factor de interacción ya se determinó para la conductividad.

<b>K=a+bT+cT<sup>2</sup>+dT<sup>3</sup> [W/m-K] 100 &lt; T [°C] &lt; 1500</b>					
<b>Especie</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>R2</b>
<b>CO2</b>	1.4557E-02	8.0721E-05	-5.5472E-09	-4.8234E-12	100
<b>CO</b>	2.2778E-02	7.4055E-05	-2.7637E-08	9.7481E-12	100
<b>O2</b>	2.4161E-02	8.3705E-05	-2.0294E-08	4.4059E-12	100
<b>H2</b>	1.9002E-01	2.7878E-04	1.0751E-07	-5.4878E-11	100
<b>N2</b>	2.3838E-02	7.4520E-05	-4.1201E-08	2.2228E-11	100
<b>H2O</b>	1.5630E-02	7.6870E-05	5.8387E-08	-1.4681E-11	100

- Emisividad: Después de un proceso de combustión, la liberación de gases a alta temperatura hace que la transferencia de calor por radiación sea muy representativa, sin embargo la emisividad de los gases de combustión dependen de la temperatura a la que se encuentran, la longitud óptica de visión y la presión. Por tal motivo se usará el método de Anil Mehrotra[17] en el que se realizó un ajuste mediante mínimos cuadrados a las cartas de Hottel. Éste método establece que

$$\varepsilon = (C_{H_2O} \varepsilon_{H_2O} + C_{CO_2} \varepsilon_{CO_2})(1 - C_{SO})$$

Donde C es el factor de corrección por presión,  $\varepsilon$  es la emisividad del gas a una temperatura dada y  $C_{SO}$  es el factor de corrección por la presencia del vapor de agua y el dióxido de carbono. Por lo tanto la emisividad del gas la podemos calcular con la siguiente relación

$$\log \varepsilon_i = \frac{a + \sum_{i=1}^3 [b_i T^i + d_i [\log(x_i PL_{\text{óptico}})]^i]}{1 + \sum_{i=4}^6 [b_i T^{i-3} + d_i [\log(x_i PL_{\text{óptico}})]^{i-3}]}$$

Una vez calculado las emisividades, se procede a calcular los factores de corrección con los valores de la tabla

$$C_{H_2O} = \frac{a + \sum_{i=1}^3 \left[ b_i \left[ \frac{(1 + x_{H_2O})P}{2} \right]^i + d_i [\log(x_{H_2O} P L_{\text{óptico}})]^i \right]}{1 + \sum_{i=4}^6 \left[ b_i \left[ \frac{(1 + x_{H_2O})P}{2} \right]^{i-3} + d_i [\log(x_{H_2O} P L_{\text{óptico}})]^{i-3} \right]}$$

$$\log C_{CO_2} = \frac{a + \sum_{i=1}^3 \left[ b_i [\log P]^i + d_i [\log(x_{CO_2} P L_{\text{óptico}})]^i \right]}{1 + \sum_{i=4}^6 \left[ b_i [\log P]^{i-3} + d_i [\log(x_{CO_2} P L_{\text{óptico}})]^{i-3} \right]}$$

$$C_{SO} = \frac{a + \sum_{i=1}^3 \left[ b_i \left[ \frac{P_{CO_2}}{P_{CO_2} + P_{H_2O}} \right]^i + d_i [\ln(\log((P_{CO_2} + P_{H_2O}) L_{\text{óptico}}))]^i \right]}{1 + \sum_{i=4}^6 \left[ b_i \left[ \frac{P_{H_2O} + P}{2} \right]^{i-3} + d_i [\ln(\log((P_{CO_2} + P_{H_2O}) L_{\text{óptico}}))]^{i-3} \right]}$$

La longitud óptica está determinada por Hollman[18], el cual establece una aproximación de éste cálculo para hornos de combustión

$$L_{\text{óptico}} \approx \frac{3.6 V}{A}$$

#### 2.4.2. Transferencia de calor en las paredes

Debido a su alta temperatura, la transferencia de calor a través de las paredes puede ser muy significativa si no se cuenta con el aislamiento necesario para mantener la temperatura adecuada dentro del mismo. De tal manera que la transferencia de calor en las paredes del hogar se da mediante convección interna y radiación.

- **Transferencia de Calor por Convección Interna:** La convección interna es un mecanismo de transferencia de calor en el que un fluido en movimiento interactúa térmicamente con una pared que se encuentra a otra determinada temperatura. En el modelo aquí presentado, los gases de combustión van desde la temperatura de llama adiabática hasta una temperatura de salida.

$$Q = \bar{h} A_s LMTD$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln \left[ \frac{\Delta T_e}{\Delta T_i} \right]} = \frac{T_{ex} - T_{LL}}{\ln \left[ \frac{T_{ex} - T_p}{T_{LL} - T_p} \right]}$$

Donde  $\bar{h}$  es el coeficiente promedio de transferencia de calor por convección interna,  $A_s$  es el área del hogar y el LMTD es la diferencia media logarítmica. Para el cálculo del coeficiente promedio de transferencia de calor usaremos la relación de Gnielinski[19].

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

$$\bar{h} = \frac{k}{D_h} Nu$$

- Transferencia de calor por radiación: La transferencia de calor por radiación de los gases de combustión hacia las paredes está determinada según Holman[18] por

$$Q_{radiación} = \sigma A_s (\varepsilon T_m^4 - \alpha T_p^4)$$

Donde  $\varepsilon$  es la emisividad de un gas,  $T_m$  es la temperatura media de los gases en el recinto y  $\alpha$  es la absorptividad de los gases que están en la cercanías a la pared y absorben parte de la radiación.

- Transferencia de calor por convección natural: Las pérdidas de calor en las afueras del hogar pueden ser de muchas formas, pues pueden intercambiar calor mediante radiación o mediante transferencia de calor combinada entre natural y forzada, sin embargo el modelo tendrá en cuenta que la disposición de la caldera será de un sitio en el que el único método de pérdida de calor sea por convección natural, de manera que las propiedades del aire serán calculadas a la temperatura de película

$$T_{Película} = \frac{1}{2}(T_{ext} + T_{amb})$$

El cálculo del coeficiente promedio para la transferencia de calor por convección natural estará determinado por las correlaciones experimentales halladas por Churchill[20]

$$\Psi = \left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$$

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = 0.68 + 0.670(Ra_L \Psi)^{1/4} (1 + 1.6 \times 10^{-8} Ra_L \Psi)^{1/12}$$

Finalmente, el calor transferido por convección natural está dado por

$$Q_{natural} = hA_s(T_{ext} - T_{amb})$$

- Transferencia de Calor por Conducción: El material y el espesor de las paredes juegan un papel fundamental en el momento de transferir energía hacia los exteriores, por tal motivo que la mayoría de las cámaras de combustión estén aisladas con materiales refractarios de baja conductividad térmica y un espesor considerable. Para este análisis se usó ladrillo refractario de conductividad de 0.76 W/mK y un espesor de 10 cm, de esta manera el cálculo de la resistencia por conducción está dada por

$$R_{ladrillo} = \frac{e}{k_{ladrillo} A_t}$$

Donde “e” es el espesor de la pared. De esta manera poder calcular la transferencia de calor a través de las paredes

$$Q_{conduccion} = \frac{T_s - T_{ext}}{R_{ladrillo}}$$

### 3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS MATEMÁTICO

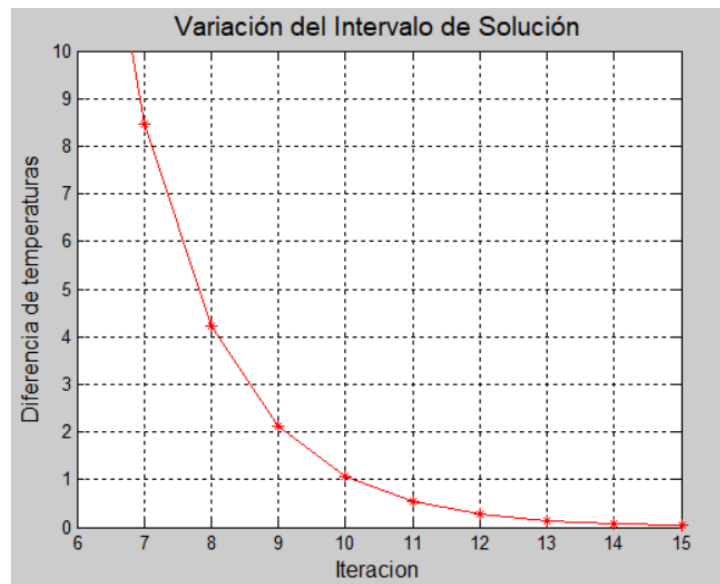
El sistema de ecuaciones de la sección anterior es un sistema de ecuaciones no lineales complejo, por ejemplo, los calores dependen de las temperaturas de trabajo, el cual son incógnitas, y además para su cálculo se requiere de las propiedades del sistema, que a su vez dependen de las temperaturas a las que se encuentran. Por tal razón se realizó mediante Matlab® un procedimiento para poder realizar la solución al sistema.

Cabe destacar que el objetivo de este modelado es obtener las gráficas del comportamiento de las variables más representativas al hacer variaciones dimensionales, de manera que al final la decisión sobre el dimensionamiento dependerá del criterio de cada ingeniero puesto que para cada diseño estipulado se tendrán otros factores de igual importancia a la eficiencia energética, como el económico el cual no fue tenido en cuenta. Por esta razón, de entrada, se requiere de un proceso repetitivo entre las diferentes posibilidades de medidas que simplemente constituyen la salida de valores en respuesta al modelo, por lo que en lo que resta de sección se explicará la solución para una geometría ya estipulada.

Inicialmente, el parámetro más importante y que no se ha mencionado hasta el momento es la cantidad de calor requerido, ya que el tamaño del hogar varía para diferentes solicitaciones energéticas, de manera que se usa un sistema capaz de suministrar 100 kW de energía a un generador de vapor, y se asumió además, que la caldera cuenta con el área necesaria para transferir el calor requerido y expulsar los gases hacia la chimenea a una temperatura de 393 K. Posteriormente, después de establecer las propiedades de la hoja de la caña es necesario solucionar la estequiometría, termoquímica y equilibrio químico dinámico que dan como resultado la composición de los gases de combustión y la cantidad de combustible necesario. Luego de ello, se procede a calcular la temperatura de llama adiabática y posterior acotación de la solución de manera que esta es la temperatura más alta que se encontrará dentro del hogar, y la más baja e improbable es que sea la misma temperatura de los humos, puesto que sería ilógico e improbable que se perdieran 100 kW de calor en pérdidas, sin embargo, esta suposición facilita los cálculos, puesto que con dos límites, superior e inferior, se logra calcular una temperatura promedio.

De manera que, el proceso iterativo mostrado en la figura consiste inicialmente en suponer una temperatura de salida de los gases, para un posterior cálculo de la temperatura promedio. A continuación se hallan las propiedades del gas a esta temperatura, incluyendo el coeficiente de convección interna con el objetivo de calcular la transferencia de calor, sin embargo, este cálculo requiere del conocimiento de la temperatura de la pared, por lo que ésta también se supondrá como el promedio entre una temperatura superior e inferior variables en la que inicialmente se sabrá que

la temperatura promedio de la superficie no deberá superar la temperatura de la salida de los gases de combustión y deberá ser mayor a la temperatura ambiente exterior. Con este supuesto, se calcula el calor de convección y radiación, y con la suma de ambos, se halla la temperatura exterior de la pared sabiendo que todo el calor se transmitirá por conducción. Con este resultado, se calculan las propiedades del aire en la película y el calor por convección natural. Finalizado este procedimiento, nos encontramos en un punto importante, puesto que si el cálculo del calor por convección natural es igual al calor por conducción, significa que la temperatura supuesta es la correcta, de lo contrario habría que modificar las temperaturas superior e inferior mencionados anteriormente. En este caso se usó una comparación entre los dos resultados, de modo que, si el calor por conducción es mayor que el calor por convección, significa que la temperatura exterior de la pared debería ser mayor, por lo que la temperatura inferior se igualará a la temperatura de la superficie haciendo el intervalo más pequeño. En caso contrario, será la superior la que se modifique. Este proceso se repetirá varias veces, obteniendo como resultado un intervalo que se va acortando progresivamente hasta finalmente converger en una solución como se muestra en la figura 2.

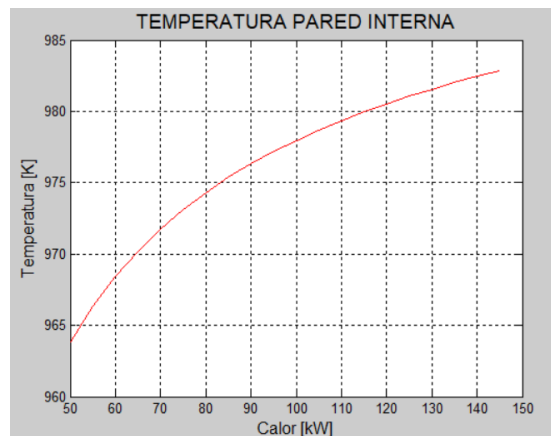


**Figura 2.** Variación del Intervalo de Solución. **Fuente:** Autores

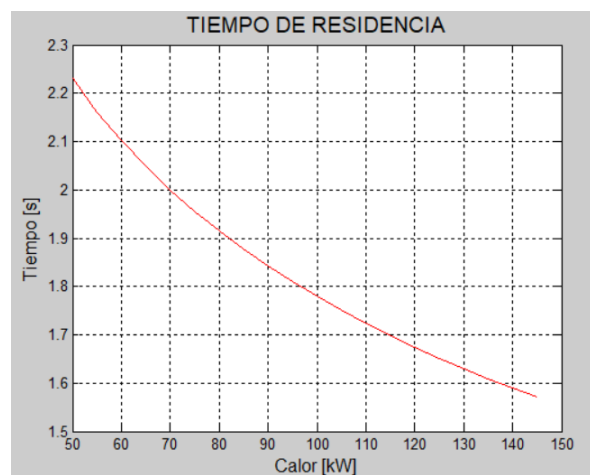
Luego de obtener esta solución, se compara el resultado entre la energía perdida por convección interna y radiación, con el calor termodinámico cedido por los gases, y de manera similar al proceso anterior, si estos son iguales significa que la temperatura de salida se supuso satisfactoriamente; caso contrario, se supone una nueva temperatura de salida de los gases haciendo un cálculo de la temperatura a la que saldrían los gases si perdieran todo el calor por convección y radiación. Este proceso se repitió varias veces, hallando finalmente un resultado, sin embargo, cabe destacar que en el caso en que estrictamente se requieran de 100 kW habría que realizar una nueva iteración sumándole a la energía necesaria, el calor por pérdidas

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como ya se ha mencionado anteriormente, las soluciones acá planteadas son gráficas del comportamiento del sistema antes las variaciones dimensionales. En primer lugar, dado un hogar de  $1 \times 1 \times 0.5$  [m] se hicieron variaciones en la cantidad del calor suministrado con el objetivo de reconocer la importancia del dimensionamiento, obteniendo resultados de la temperatura de pared interna, el tiempo de residencia y la proporción entre el calor perdido y suministrado, como se muestran en las gráficas 3, 4 y 5 respectivamente. Como se puede observar, cuando la cantidad de calor suministrado al hogar aumenta, la temperatura interna del hogar también aumenta y el tiempo de residencia disminuye, es decir, cuando la temperatura del hogar disminuye, también lo hace la velocidad de calentamiento de la hoja de caña de azúcar, produciendo un mayor tiempo requerido para quemar una sola hoja y esto finalmente derivaría en la necesidad de tener un horno de combustión más grande, sin embargo esto puede ser afectado considerablemente como se muestra en la figura 5.



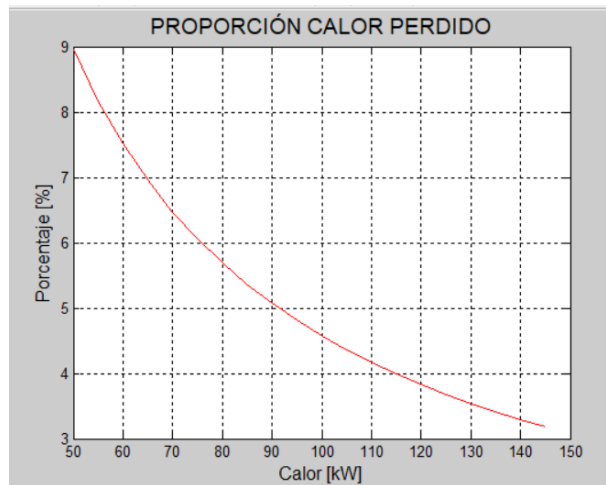
**Figura 3.** Temperatura pared interna vs calor suministrado. **Fuente:** Autores



**Figura 4.** Tiempo de residencia del combustible. **Fuente:** Autores

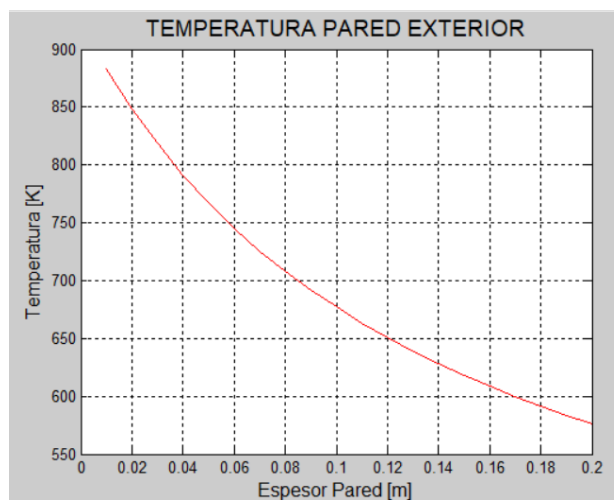


Donde finalmente muestra la importancia del tamaño de la hornilla ya que existe una gran relación entre el dimensionamiento y el calor que este cede.



**Figura 5.** Proporción del calor perdido. **Fuente:** Autores

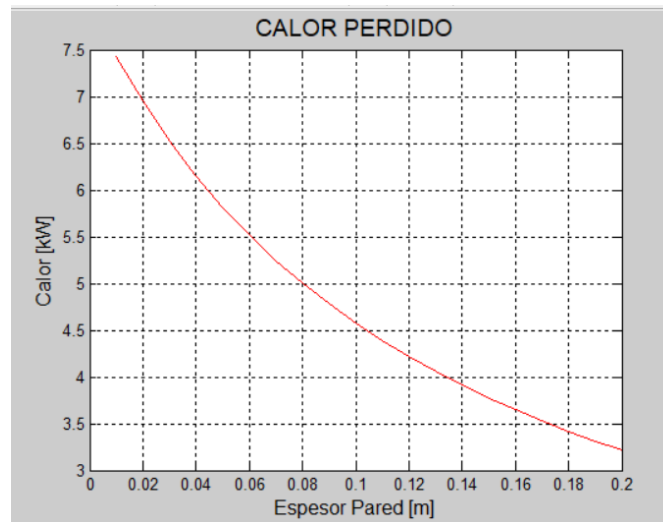
De manera similar se realizó este análisis para la variación del espesor para un hogar determinado; aunque éstos se ven afectados directamente del material refractario comercial, se indagó acerca del comportamiento térmico cuando se tienen diferentes espesores teniendo como resultado una variación inversa entre el calor perdido y la temperatura exterior y el espesor como se muestra en la figura 6 y 7.



**Figura 6.** Temperatura exterior – Espesor. **Fuente:** Autores

Como se muestran en las figuras, entre más delgada es la pared, mayor temperatura habrá en el exterior produciendo así una mayor transferencia de calor, sin embargo una alta temperatura de pared exterior producirá también significativamente transferencia de calor por radiación con el entorno, por lo que es importante resaltar que en el dimensionamiento se debe tener en cuenta que las hornillas deben estar lo suficientemente aisladas para reducir sus pérdidas de calor, ya que éstas

influyen en la temperatura media del horno y a su vez en la rapidez de calentamiento, produciendo un mayor tiempo de residencia del combustible el cual afectará a la calidad de la combustión.



**Figura 7.** Calor Perdido – Espesor. **Fuente:** Autores

## 5. CONCLUSIONES

Se realizó un modelamiento cero-dimensional que permitió conocer el comportamiento de la hornilla de combustión ante la variación de los parámetros dimensionales y de capacidad térmica, encontrando una relación entre su tamaño, sus pérdidas de calor y el tiempo de quemado.

De igual forma, se encontró una importancia en el tiempo de quemado del combustible, ya que si la velocidad de calentamiento no es lo suficientemente rápida provocaría en un aumento del tiempo de descomposición, y finalmente derivaría en un combustible no quemado completamente, por lo que este trabajo finamente contempla un hogar de  $0,6 \text{ m}^3$  para los 100 kW de consumo energético.

## 6. RECOMENDACIONES

Para los resultados obtenidos en este trabajo, se caracterizó biomasa de un diámetro de partícula muy pequeño, de manera que no se tuvo en cuenta la influencia dimensional en la descomposición térmica y el flujo de los gases, por lo que se recomienda para futuros trabajos realizar un modelamiento de descomposición poniendo en consideración la variación dimensional de la descomposición en la partícula.

De la misma manera se recomienda para próximos trabajos incluir una función objetivo en el que se tenga en cuenta los criterios económicos que en este trabajo se dejaron a decisión ingenieril.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, al Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente – GIEMA y a la VIE, por el apoyo dentro de su programa de Estímulo a Grupos de Investigación 2017.

## 8. REFERENCIAS

- [1] F. Pavas Martinez, O. Gonzalez Vivas, and Y. Sanchez Rosas, “Cuantificación del ahorro de energía eléctrica en clientes residenciales mediante acciones de gestión de demanda,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 217–226, 2017.
- [2] P. P. Vergara-Barrios, J. M. Rey-López, G. A. Osma-Pinto, and G. Ordoñez-Plata, “Evaluación del potencial solar y eólico del campus centra de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 13, no. 2, pp. 49–57, 2014.
- [3] M. Escobar-Ochoa, S. Cuervo-Andrade, and S. Rincon-Prat, “Metodología para el diseño de un módulo de acumulación térmica usando materiales de cambio de fase (PCM) para un secador solar de túnel,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 9–20, 2017.
- [4] J. D. Bastidas Rodriguez and C. A. Ramos Paja, “Types of inverters and topologies for microgrid applications,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 1, pp. 7–14, Oct. 2107.
- [5] B. V. Toro Tovar, E. Mojica Nava, and S. Rivera, “Mejoras de la Regulación de Frecuencia Utilizando el Aumento de Inercia de Microrredes Interconectadas,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 35–42, May 2008.
- [6] N. Y. Gonzalez Castro, C. A. Cusguen Gomez, E. A. Mojica Nava, and F. A. Pavas Martinez, “Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 93–104, Jun. 2017.
- [7] R. Saidur, E. A. Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, and S. Mekhilef, “A review on biomass as a fuel for boilers,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 2262–2289, 2011.
- [8] T. Nussbaumer, “Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction,” *Energy and Fuels*, vol. 17, no. 6, pp. 1510–1521, 2003.
- [9] Y. J. Rueda-Ordoñez and K. Tannous, “Isoconversional kinetic study of the thermal decomposition of sugarcane straw for thermal conversion processes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 196, no. 11241, pp. 1–9, 2015.
- [10] J. E. Hustad, Ø. Skreiberg, and O. K. Sønju, “Biomass combustion research and utilization in IEA countries,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 9, no. 1–5, pp. 235–255, 1995.
- [11] D. Aldana and R. Olivares, “Metodología unidimensional para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para pailas de hornillas paneleras,” in *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)*, 2013, pp. 14–16.
- [12] B. . Jenkins, L. . Baxter, T. . Miles, and T. . Miles, “Combustion properties of biomass,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 54, no. 1–3, pp. 17–46, 1998.
- [13] K. T. Y. J. Rueda-Ordoñez, “Análisis cinético de la descomposición térmica de biomásas aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 119–128, 2017.
- [14] Y. J. Rueda-Ordóñez, “Thermal decomposition analysis of sugarcane straw in inert and oxidative atmospheres through thermoanalytical methods,” Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- [15] J. F. Maradei, “Combustión,” in *Termodinámica Aplicada*, 1 Ed., Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2002, p. 641.
- [16] E. N. L. R. Byron Bird, Warren W. Stewart, *Fenómenos de transporte*, 2nd ed. México:

- Limusa Wiley, 2006.
- [17] A. K. Menhrotra, “Estimate Gas Emissivities for Equipment and Process Design,” *Chem. Eng. Prog.*, vol. 92, no. 1, pp. 70–77, 1995.
  - [18] J. P. Holman, *Transferencia de calor*, 8th ed. Madrid, España: McGraw Hill, 1998.
  - [19] A. F. Mills, *Transferencia de calor*, 1st ed. Madrid: Addison-Wesley Iberoamerica S.A., 1997.
  - [20] F. P. Incropera, T. L. Bergman, A. S. Lavine, and D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Jefferson City, 2007.