

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

Generación
de energía
en PTAR

Pronóstico
energía eólica
en Uruguay

Simulación
sistema
fotovoltaico
en Haití

Operación
óptima de
baterías

Transición
sistemas de
energía eléctrica

Pronósticos
hidrológicos y
el sistema eléctrico

Modelo numérico
de la combustión de
tronco cilíndrico



© Copyright Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) 2019. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)

ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y
Fernández Salvador.
Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>

Página web OLADE: www.olade.org

Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995



COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco
SECRETARIO EJECUTIVO DE OLADE

Pablo Garcés
ASESOR TÉCNICO DE OLADE

Marcelo Vega
COORDINADOR DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DE LA
ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO
(AUGM)

COMITÉ AD-HONOREM

Andrés Romero C.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Leonardo Beltrán.
Institute of the Americas. México.

Manlio Coviello.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Mauricio Medinaceli.
Investigador independiente. Bolivia.

Ubiratan Francisco Castellano.
Investigador independiente. Brasil.

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Blanca Guanocunga. Bibliotecaria OLADE

COLABORADORES

Raquel Atiaja. *Técnica de Área Informática OLADE*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación*

REVISORES

Santiago Garrido. *Universidad Nacional de Quilmes. Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología. Argentina.*

Emilia Ruggeri. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET – IESCT). Universidad Nacional de Quilmes. Argentina.*

Diego Coronel Bejarano. *Universidad Nacional de Asunción. Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos (GISE - FPUNA). Paraguay.*

Luciana Clementi. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.*

José Javier Alonso Mateos. *Universidad Internacional de Valencia. España.*

Oscar Oviedo. *Universidad Nacional de Córdoba (UNC - INFIQC). Argentina.*

Alfredo Caguao Yagua. *Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM). Venezuela.*

Byron Chilibingua Mazón. *Consultor independiente. Ecuador.*

Reynaldo Payano Almanzar. *Investigador independiente. Chile.*

Iván López. *Universidad de la República (UdelaR) - FING-IMFIA. Uruguay.*

Cristhian Carrasco Villanueva. *Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Bolivia.*

Ojilve Ramón Medrano Pérez. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS). México.*

Diseño de la portada y contraportada Ana María Arroyo y Francisco Pérez.

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.

MODELO NUMÉRICO SIMPLE DE LA COMBUSTIÓN DE UN TRONCO DE MADERA CILÍNDRICO

Germán Navarrete Cereijo ¹, Pedro Luis Curto-Risso ²

Recibido: 27/01/2020 y Aceptado: 03/06/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 1. Junio, 2020 (118-131).



Foto de Sebastian Pociеча en Unsplash.



1 Ingeniero Industrial Mecánico por la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UdelaR), Uruguay. Máster en Ingeniería Mecánica por la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) y estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Energía por la Facultad de Ingeniería (UdelaR). Se desempeña como Asistente en el Departamento de Termodinámica Aplicada del Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial de la Facultad de Ingeniería, UdelaR. Su principal línea de investigación está centrada en el estudio de la combustión de biomasa, incluyendo caracterización de biomasa como combustible, desarrollo de modelos numéricos para la simulación de procesos de combustión aplicados a calefactores a leña residenciales de alta eficiencia y calderas industriales de lecho fijo y en suspensión. Actualmente trabaja en el desarrollo de un banco de ensayo de estufas a leña y pellets para la Facultad de Ingeniería, UdelaR.

gnavarrete@fing.edu.uy

2 Ingeniero Industrial Mecánico por la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UdelaR), Uruguay. Doctorado por la Universidad de Salamanca. Profesor Agregado en el Departamento de Termodinámica Aplicada de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores de la ANII (Uruguay), la Society of Automotive Engineers (SAE International) y del Combustion Institute. Su principal línea de investigación se centra en modelado termodinámico de sistemas de conversión de energía y combustión; ha trabajado en el desarrollo de modelos cuasi-dimensionales de motores de combustión interna, modelos numéricos de procesos físicos de combustión y aplicaciones numéricas de termodinámica aplicada y CFD. Actualmente trabaja en proyectos de acumulación de energía mediante bombas de calor, evaluación de eficiencia energética en edificaciones, evaluación de potencial energético de biomasa no tradicional, entre otros.

pcurto@fing.edu.uy

RESUMEN

Se presenta un modelo unidimensional para la combustión de un tronco cilíndrico de madera considerando volúmenes finitos en coordenadas radiales. El proceso es modelado por cuatro fenómenos: secado, pirólisis, combustión y gasificación. Los frentes de reacción avanzan hacia el centro del tronco determinando regiones de biomasa húmeda en proceso de secado, zonas de biomasa en ausencia de oxígeno donde predomina la pirólisis, zonas en presencia de oxígeno donde coexisten la combustión y gasificación del carbón y zona de combustión de gases. El avance de los frentes depende de las temperaturas de los diferentes volúmenes, la concentración de los gases en la interfase sólido-gas, porosidad, tortuosidad, conductividad y flujo de calor desde el entorno. Las reacciones de pirólisis, gasificación y combustión del carbón son modeladas a partir de ecuaciones de la forma de Arrhenius. Este modelo puede ser integrado a un modelo de combustión de gases en hogares de lecho fijo. Teniendo como entrada las condiciones del flujo de gas en la superficie del tronco y el flujo de calor por radiación, el modelo debe entregar como salida la composición, flujo y temperatura de gases saliendo del tronco, así como los campos de temperatura y composición en el interior del tronco.

Palabras clave: combustión, madera, simulación numérica, biomasa, energía, lecho fijo.

ABSTRACT

A one-dimensional model for the combustion of a wooden log is presented considering finite volumes in radial coordinates. The process is modeled by four phenomena: drying, pyrolysis, gasification and combustion. The reaction fronts advance to the center of the log, determining areas of wet

biomass in drying process, biomass in the absence of oxygen where pyrolysis predominates, zones in the presence of oxygen where char combustion and gasification coexist and flame zone (gas combustion). The reaction fronts advance depends on the temperatures of the different volumes, the concentrations of gases at the solid-gas interface, porosity, tortuosity and conductivity of the biomass and heat transfer from the surroundings. The pyrolysis, gasification and combustion reactions are modeled by equations depending on Arrhenius parameters. This model can be coupled to a gas combustion model in fixed-bed furnaces. Taking as input the conditions of the gas flow on the surface of the wood log and the heat transfer by thermal radiation, the model should provide as outputs the composition, the flow and the temperature of gases leaving the wood log, as well as the temperature and composition fields inside the cylinder.

Keywords: *combustion, wood, numerical simulation, biomass, energy, fixed bed.*



El proceso de combustión es modelado por cuatro procesos simultáneos: secado, pirólisis, combustión y gasificación.

INTRODUCCIÓN

Según el balance energético del 2018, en Uruguay se producen 1.97 millones de toneladas de leña anuales, de las cuales el 53% es para uso residencial y el 35.7% de uso industrial. En el sector residencial este consumo representa el 35% de la energía consumida en los hogares y en el sector industrial (excluyendo la industria del papel y celulosa), la leña representa el 25% de la energía utilizada (MIEM, 2018). Estos números muestran que la madera sigue siendo uno de los principales energéticos utilizados por lo que requiere especial atención para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan un uso más eficiente y sustentable del recurso. El desarrollo de herramientas numéricas, que permitan modelar la combustión de madera en lecho fijo, tanto en calderas de uso industrial como en estufas de alto rendimiento de uso residencial, generan una manera versátil, económica y rápida para obtener resultados del comportamiento tanto para equipos existentes como para equipos en etapa de diseño. En este trabajo se presenta un modelo para la combustión de un cilindro de madera en lecho fijo. El modelo pretende ser simple y rápido, diferenciándose de los modelos CFD ya existentes. Dicho modelo debe ser capaz de ser integrado a un modelo de combustión de gases que modele el comportamiento de los gases dentro de un equipo de combustión de leña en lecho fijo.

En la combustión de madera se pueden identificar los siguientes mecanismos principales: secado, pirólisis, gasificación, combustión de la matriz carbonosa y combustión de los volátiles (llama). Dependiendo del tamaño y forma de la biomasa, se pueden aproximar por modelos en etapas simultáneas o secuenciales (Lu, Robert, Peirce, Ripa y, Baxter, 2008). Para la combustión de cilindros de madera, relativamente grandes (16 cm aproximadamente), es necesario considerar modelos de etapas simultáneas, ya que los modelos de etapas secuenciales no logran modelar correctamente la transferencia de

calor dentro del cilindro, ni reproducir los tiempos reales de quema. Los modelos de etapas secuenciales se restringen a partículas pequeñas en las cuales es válido suponer temperatura uniforme dentro de toda la partícula. En los modelos de etapas simultáneas, las etapas se pueden desarrollar en capas infinitesimales y en volúmenes finitos considerando temperatura uniforme en cada volumen. Estos procesos van ocurriendo desde el exterior hasta el centro de la madera, determinando zonas de biomasa húmeda en proceso de secado, biomasa en ausencia de oxígeno donde predomina la pirólisis y zonas en presencia de oxígeno donde coexisten procesos de gasificación y pirólisis de la biomasa con la combustión del carbón y parte de los gases producidos. El avance de los frentes de reacción hacia el interior dependerá de los gradientes de temperatura, concentración de los gases en la interfase sólido-gas, la porosidad, tortuosidad y conductividad de la biomasa (He y Behrendt, 2011). El secado se puede modelar a partir del transporte de masa debido a la diferencia de presiones parciales dentro del sólido (Lu *et al.*, 2008) o a partir de modelos basados en la entalpía de cambio de fase del agua (He y Behrendt, 2011; Mehrabian, Shiehnejadhesar, Scharler y, Obernberger, 2014). Los procesos termodinámicos como la pirólisis, gasificación y combustión son complejos de modelar, ya que son dominados por varios fenómenos, como reacciones químicas homogéneas y heterogéneas, transferencia de calor y transporte de masa y momento (de Souza-Santos, M., 2004). Para modelar las reacciones existen modelos que van desde reacciones globales simples a modelos que consideran miles de ecuaciones en serie y en paralelo representando mecanismos complejos de reacción (Lu *et al.*, 2008).

En la literatura se encuentran diversos trabajos en los cuales se presentan modelos para la combustión de troncos de madera. Galgano *et al.* (Galgano, Di Blasi, Horvat y, Sinai, 2006) presentan un modelo unidimensional radial para la combustión y gasificación de madera

describiendo modelos cinéticos, fenómenos de transferencia de calor y masa, y reacciones químicas conjuntamente con un modelo CFD para modelar la fase gaseosa en torno a la madera. Presentan resultados numéricos y experimentales para troncos de madera entre 6 y 10 cm de radio. Haberle *et al.*, (Haberle, Skreiberg, Lazar, Erland y, Haugen, 2017) presenta un revisión de diferentes modelos numéricos mostrando una descripción detallada de varios mecanismos de reacción tanto para la etapa de desvolatilización, como la combustión de carbón. Adicionalmente, presentan una descripción detallada de las propiedades termo-físicas de diferentes biomásas incluyendo correlaciones basadas en recopilación de datos de la literatura. Se incluyen correlaciones para la porosidad, conductividad térmica, capacidad calorífica y permeabilidad. Bryden y Ragland (Bryden y Ragland, 1997), presentan resultados experimentales y numéricos para la combustión de troncos de madera bajo diferentes condiciones. Se presentan resultados para troncos de entre 12 y 21 cm de diámetro estableciendo las condiciones de temperatura y concentraciones de gases similares a la de una caldera de lecho fijo a partir de la mezcla de gases provenientes de un quemador de gas natural y oxígeno auxiliar.

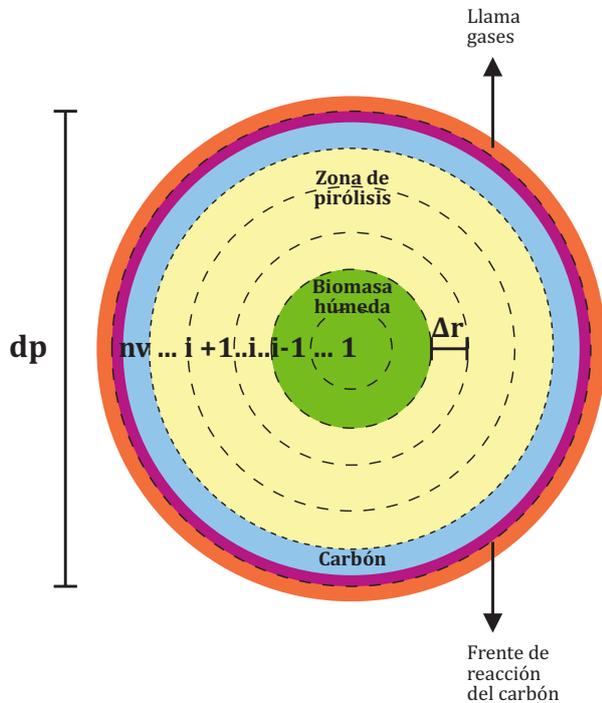
Este trabajo tiene como objetivo presentar un modelo de combustión de cilindros de madera que sea capaz de determinar, para cada instante, la temperatura y composición en la superficie del cilindro de madera y el flujo y composición de los gases que salen de éste. Donde se puedan variar diferentes parámetros como las características de la madera y las condiciones de borde. Las condiciones de borde que deben ser incorporadas como entradas son la temperatura, composición y flujo de gases en torno al tronco así como temperaturas y factores de vista de superficies que puedan intercambiar calor por radiación con el tronco. La determinación de estas variables permiten que el modelo sea capaz de ser integrado a un modelo de combustión de leña

en lecho fijo en el cual se resuelva la combustión de los gases en torno a los troncos de madera. Asimismo, como variable de entrada y salida, en cada instante el programa debe ser capaz de conocer el estado de reacción y temperatura en los diferentes volúmenes de control. El modelo computacional es implementado en Fortran 90.

MODELO NUMÉRICO

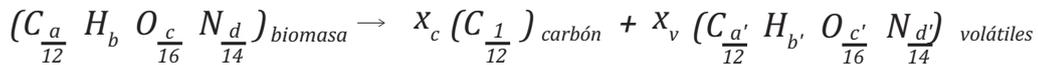
Para el presente modelo, de la combustión de un cilindro de madera, se propone el esquema de etapas simultáneas. Este modelo resulta adecuado dado que los gradientes de temperatura dentro del cilindro son considerables, determinando que dentro de cada volumen de control puedan estar ocurriendo diferentes fenómenos (etapas). Se consideran las siguientes etapas: secado, pirólisis, gasificación y combustión de la matriz carbonosa. La combustión de los volátiles ocurre fuera del cilindro por lo que no se considera en este modelo. Se propone un modelo de tronco cilíndrico unidimensional en coordenadas radiales. Como primera aproximación, se asume que dentro de cada volumen finito, las diferentes fases están en equilibrio térmico, la presión dentro de los poros está en equilibrio con el ambiente y la acumulación de gases en los poros es despreciable. Como consecuencia, el transporte tanto del agua como de los volátiles es instantáneo hasta el exterior del tronco. En la figura 1 se presenta un corte transversal del tronco de madera, en el cual se puede observar la discretización utilizada, las diferentes etapas y frentes de avance de las mismas. Los frentes de reacción avanzan hacia el centro del tronco determinando regiones de biomasa húmeda en proceso de secado, zonas de biomasa en ausencia de oxígeno donde predomina la pirólisis, zonas en presencia de oxígeno donde coexisten la combustión y gasificación del carbón y zona de combustión de gases.

Figura 1. Corte transversal mostrando las diferentes zonas de reacción y discretización del tronco.



Fuente: Elaboración de los autores

(Ec. 1)



donde el primer término representa la composición de biomasa que reacciona y a , b , c y d son la fracciones másicas de los elementos correspondientes, mientras que los de la derecha representan la composición del carbón y de los volátiles, con x_c y x_v la fracción de biomasa que se transforma en carbón y volátiles respectivamente y a' , b' , c' y d' son la fracciones másicas de los elementos en los volátiles.

Para la pirólisis se consideran cinco reacciones globales dependientes de los parámetros de Arrhenius, donde inicialmente la biomasa reacciona para formar gases no condensables (volátiles), gases condensables (tar) y carbón, seguidos por la descomposición secundaria del tar en volátiles y carbón (Wagenaar, Prins y, van Swaaij, 1993; Liden, Berruti y, Scott, 1988;

La tasa de secado es modelada a partir de balance de energía, basados en los modelos de entalpía de cambio de fase, considerando que el volumen está en equilibrio térmico a 100°C y que la energía que entra aporta únicamente a la evaporación. Los volátiles son producidos en la etapa de pirólisis en las zonas secas de la partícula mientras que la reacción del carbón ocurre en los volúmenes exteriores de la partícula donde ya ocurrió la desvolatilización y el carbón entra en contacto con los agentes oxidantes y gasificantes (O_2 , CO_2 , H_2O). No se resuelve la combustión de los volátiles, ya que como ocurre fuera del cilindro escapa el alcance del presente modelo. Este trabajo se limita a determinar el flujo y composición de los gases que salen del cilindro. La formación de volátiles y carbón, para cada instante de tiempo y volumen, se puede determinar a partir de la ecuación 1 considerando el carbón únicamente como carbono.

Blasi, 1993). Tanto la cantidad (en masa m) de volátiles no condensables, volátiles condensables (tar) y carbón producidos son determinadas a través del sistema de reacciones químicas representados en las ecuaciones 2 a 5 con los parámetros de Arrhenius (energía de activación E_{ai} y término pre-exponencial k_0i) prestados en la tabla 1. Se considera que todo el tar es un producto intermedio y reacciona instantáneamente para formar volátiles no condensables y carbón. Para cuantificar la entalpía química de las reacciones de pirólisis ($H_{pirólisis}^a$), se utilizará la ecuación 6, donde las reacciones de formación de carbón se consideran exotérmicas, mientras que las de formación de volátiles se consideran endotérmicas (Milosavljevic, Oja y, Suuberg, 1996).

$$(Ec. 2) \quad \frac{dm_{biomasa}}{dt} = -(k_1 + k_2 + k_3)m_{biomasa}$$

$$(Ec. 3) \quad \frac{dm_{carbón}}{dt} = k_3 m_b + k_5 m_{tar}$$

$$(Ec. 4) \quad \frac{dm_{volátiles}}{dt} = k_1 m_{biomasa} + k_4 m_{tar}$$

$$(Ec. 5) \quad k_j = k_{0j} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$(Ec. 6) \quad \frac{dH^q_{pirólisis}}{dt} [kW] = \frac{dm_{carbón}}{dt} 2000 [kJ/kg_{carbón}] - \frac{dm_{volátiles}}{dt} 538 [kJ/kg_{volátiles}]$$

Tabla 1. Parámetros de Arrhenius para los mecanismos de reacción en la etapa de pirólisis.

j	Reacción	E _{aj} (kJ/mol)	K _{0j} (1/s)	Referencia
1	Biomasa → volátiles	177.0	1.11E+11	(Wagenaar, Prins y, van Swaaij, 1993)
2	Biomasa → tar	149.0	9.28E+09	(Wagenaar, Prins y, van Swaaij, 1993)
3	Biomasa → carbón	125.0	3.05E+07	(Wagenaar, Prins y, van Swaaij, 1993)
4	tar → volátiles	107.5	4.28E+06	(Liden, Berruti y, Scott, 1988)
5	tar → carbón	107.5	1.00E+06	(Blasi, 1993)

Fuente: Elaboración de los autores.

La combustión y gasificación de la matriz carbonosa son modeladas a partir de tres reacciones, cuya forma genérica se presenta en la

ecuación 7, dependientes de las concentraciones ($X_{i,s}$) de vapor de agua, dióxido de carbono y oxígeno, superficie del tronco (A), factor de área

de reacción (f_A), parámetros de Arrhenius (E_{ai} , k_{oi}), presión (p), temperatura de la superficie (T_s), coeficiente estequiométrico (n en kilomoles compuesto i sobre kilomol de carbón), peso molecular del carbón (M_C) y la constante universal de los gases (R). Los parámetros de Arrhenius utilizados son presentados en la tabla 2.

(Ec. 7)

$$\dot{m}_{C_j} = f_A A k_{oi} \exp\left(\frac{-E_{ai}}{RT_s}\right) \frac{M_C}{n_j} \frac{P}{RT_s} X_{i,s}$$

Estas reacciones son proporcionales al área superficial, la cual depende del radio del tronco y la porosidad del mismo. La porosidad aumenta el área de reacción considerablemente, Bryden y Ragland (Bryden y Ragland, 1997) proponen considerar que el área real de reacción es ocho veces mayor que el área geométrica de la superficie del tronco lo que implica un factor de área de reacción f_A de ocho.

El modelo puede ser integrado a otros modelos numéricos de combustión de gases que resuelvan los fenómenos de transporte alrededor del tronco.

Tabla 2. Parámetros de Arrhenius y entalpías químicas para las reacciones del carbón.

Reacción	Eaj (kJ/mol)	K0j (m/s)	Referencia
6 C+O ₂ → CO ₂	68.0	4.65E+04	(Saastamoinen, Aho y, Linna, 1993)
7 C+CO ₂ → 2CO	138.0	7.73E+03	(Saastamoinen, Aho y, Linna, 1993)
8 C+H ₂ O → CO+H ₂	138.0	7.73E+03	(Yi, Fan, Li, Lu y, Luo, 2011)

Fuente: Elaboración de los autores.

Por último, en la ecuación 8 y 9 se presenta el balance de energía general para cada volumen de control, la ecuación 8 es válida para un

volumen de control interno mientras que la ecuación 9 es válida para el volumen de control externo.

(Ec. 8)

$$\frac{dE_i}{dt} = (A_t k_{eff} \frac{dT}{dr}) \Big|_{i-1/2}^{i+1/2} - \dot{m}_{H_2O} h_{fg} + \sum \dot{m}_i h_i + \sum \dot{m}_j \Delta h_j^q$$

(Ec. 9)

$$\frac{dE_i}{dt} = (A_t k_{eff} \frac{dT}{dr}) \Big|_{nv-1/2}^{nv} + A\bar{h} (T_g - T_{pi}) + Aq_{rad,p} - \dot{m}_{H_2O} h_{fg} + \sum \dot{m}_i h_i + \sum \dot{m}_j \Delta h_j^q$$

donde ρ es la densidad, V_i el volumen, T_p la temperatura y c_p el calor específico del volumen de control al cual se le realiza el balance; A_t el área de transferencia efectiva por conducción, k_{eff} la conductividad de la biomasa en el volumen de control, A el área exterior del tronco (solo aplica para el volumen exterior), q_{rad} el calor por unidad de área que llega a la superficie del tronco por radiación con las paredes y otros troncos en un medio participativo, h

el coeficiente de convección térmica, h_{fg} la entalpía de vaporización del agua, h_i la entalpía sensible de la especie i ingresando al volumen de control y Δh^q_j la entalpía química de la reacción j dentro del volumen de control. Para la radiación en gases se utiliza la ecuación 10. Como primera aproximación se consideró las superficies negras y que los gases que participan en la radiación son el agua y el dióxido de carbono.

(Ec. 10)

$$q_{rad,p} = J_p - \sum (J_j F_{pj} \tau_{pj} + \sigma T_g^4 F_{pj} \epsilon_{pj}) = \frac{\epsilon_p}{1 - \epsilon_p} (\sigma T_p^4 - J_p)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, F_{pj} el factor de vista entre superficies, ϵ_p la emisividad de la superficie del tronco, ϵ_{pj} y τ_{pj} emisividad y transmisividad de los gases, J_j la radiosidad asociada a la superficie j en las condiciones del sistema.

El modelo numérico es resuelto a través de un código, de desarrollo propio, en lenguaje Fortran 90. Como entradas requiere composición y características físico-químicas de la biomasa, temperatura, velocidad y composición de los gases en torno al cilindro de madera. También es necesario ingresar el intercambio de calor por radiación con todas las superficies vistas por el cilindro en la cámara de combustión, o la información necesaria para aplicar la ecuación 10. En esta etapa de validación del modelo, las condiciones del entorno se imponen estacionarias, sin embargo, el programa es capaz de ser integrado conjuntamente con un código que resuelva la combustión del flujo gaseoso e intercambio de calor con las superficies y entorno del hogar.

Dado el carácter transitorio del modelo presentado, es posible obtener como salidas, la composición y temperatura de los volúmenes en el interior del cilindro, temperatura y composición del flujo de gases saliendo del cilindro y temperatura de la superficie del cilindro.

VALIDACIÓN Y RESULTADOS

La validación del modelo se realiza a partir del estudio de los tiempos de quema del cilindro de madera (pérdida de masa en el tiempo) y las temperaturas características de pirólisis y de la superficie. Se utilizaron resultados experimentales de Bryden y Ragland (Bryden y Ragland, 1997) y Di Blasi *et al.* (Di Blasi, Branca, Masotta y, De Biease, 2013); que permiten validar los fenómenos que ocurren dentro del tronco sin depender de un desarrollo más complejo de los fenómenos de transporte entorno del mismo, ya que se pretende que la combustión de los gases en el hogar sean determinados por otro programa que a su vez interactúe con el presente modelo. Bryden y Ragland (Bryden y Ragland, 1997) desarrollaron un experimento en el cual un tronco de madera es introducido en un flujo de gas caliente de composición y temperatura conocida y representativa de las condiciones de llama entorno al tronco en un reactor. En estas condiciones, luego de que la superficie del tronco alcanza la temperatura del flujo de gases, la temperatura y composición de los gases en la superficie del tronco queda determinada por el flujo del gas. Las condiciones establecidas experimentalmente por Bryden y Ragland (1997) son las siguientes: cilindro 16 cm de diámetro, 140 cm de largo, humedad 12.5% en base total (b.t.),

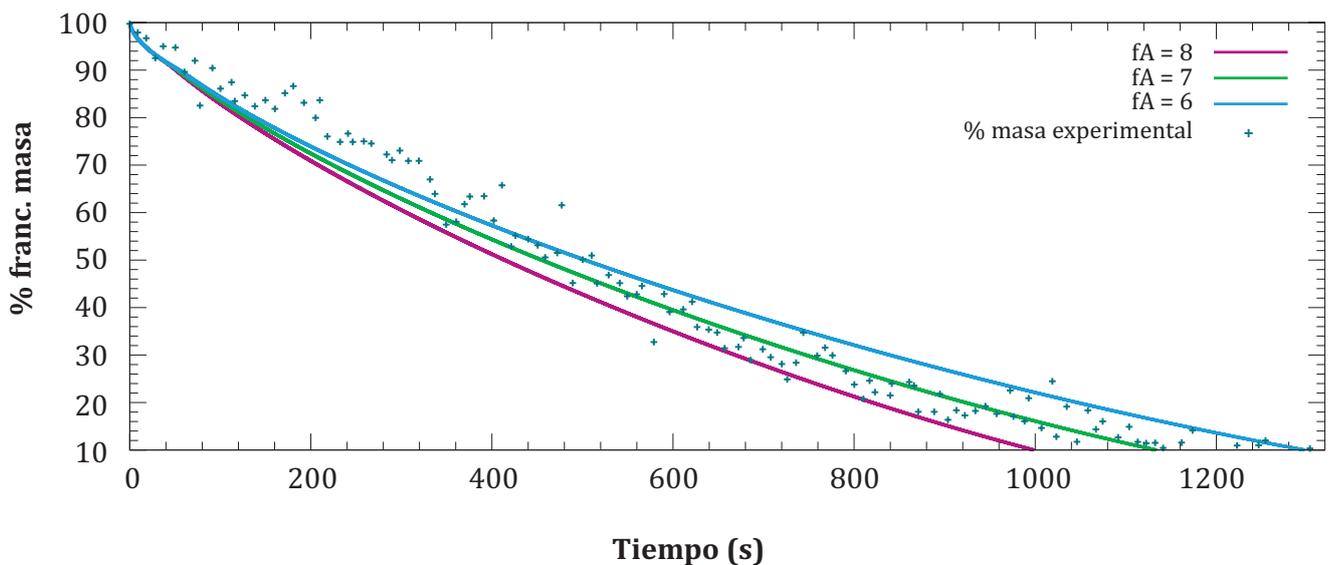
temperatura de los gases 1,150 °C, velocidad del flujo 0.8 m/s con la siguiente composición volumétrica: oxígeno 16.0%, dióxido de carbono 8.2% y agua 15.6%. Se presentan las curvas hasta una fracción de masa de 10% de la masa inicial del tronco, ya que, a partir del 10% de la masa, los autores afirman que los resultados experimentales no son confiables.

Para la validación de la temperatura de pirólisis se utilizara los resultados experimentales desarrollados por Di Blasi *et al.*, (2013), a partir de resultados de análisis termogravimétricos a altas temperaturas y flujos de calor (20 a 45 kW/m²). Experimentalmente determinaron que para madera, la pirólisis se da entre temperaturas de 501 a 806 K con valores típicos de 600 K para temperaturas de calentamiento superiores a 600 K.

Fijando temperatura y concentración de los gases en la superficie, se procedió a validar el modelo bajo diferentes parámetros de sinto-

nización. Se identificó que los parámetros más sensibles para la temperatura de la superficie y los tiempos de reacción, son los presentes en la ecuación 7 referentes a las reacciones del carbón. Dado que las concentraciones y temperatura de los gases entorno al cilindro están determinados por el flujo externo de gas y los parámetros de Arrhenius seleccionados ya validados en la literatura, se estableció que el parámetro más adecuado para la sintonización y que presenta mayor versatilidad es el factor de área de reacción f_A . Se realizaron simulaciones para diferentes valores de f_A obteniendo que los valores que mejor se ajustan a los datos experimentales están entre 6 y 8. En la figura 2, se puede observar que, con un factor de área de 7, el modelo logra reproducir la pérdida de masa razonablemente. Dichos ajuste presenta un coeficiente de determinación R^2 de 0.979. Cabe destacar que el valor obtenido está muy cercano al recomendado por los autores del experimento, que utilizan un factor de 8.

Figura 2. Pérdida de masa en función del tiempo versus resultados experimentales de Bryden y Ragland (Bryden y Ragland, 1997) variando el factor de área superficial de reacción.



Fuente: Elaboración de los autores.

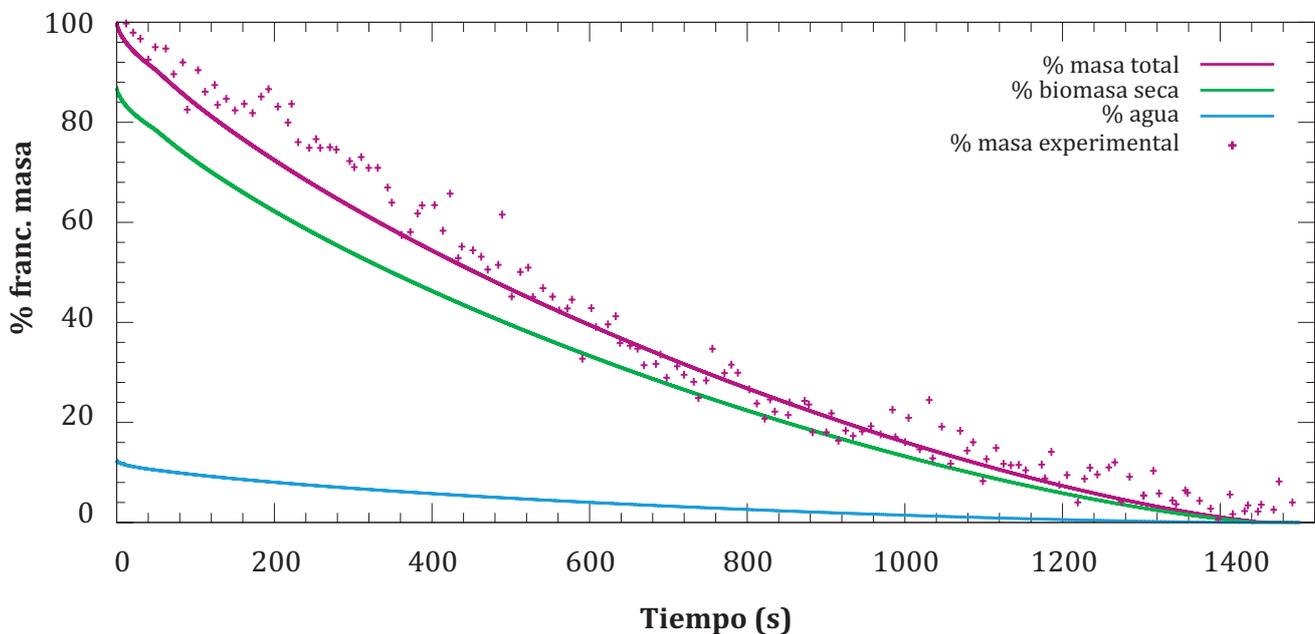
En la figura 3 se presentan resultados de la pérdida de masa para el factor de área elegido discriminando en el porcentaje de masa total, el de masa de biomasa seca y masa de agua en función de la masa inicial de biomasa.

En la figura 4 se puede observar el comportamiento de la temperatura superficial, temperatura media y temperatura del centro del tronco en función del tiempo para el factor de área de reacción 7 establecido anteriormente. En esta figura se observa que la temperatura de la superficie del tronco efectivamente se mantiene igual a la del gas y solamente aumenta cuando queda el último volumen compuesto únicamente por carbón. El comportamiento de la temperatura, casi constante durante todo el proceso y un incremento pronunciado al final del

mismo, probablemente se deba a los grandes flujos de gases a alta temperatura considerados en el experimento, dado que la energía aportada por la combustión es rápidamente arrastrada por la corriente gaseosa y no hay una transferencia de calor hacia el cilindro. Sólo en las etapas finales de la combustión, cuando el volumen del cilindro es muy pequeño (tendiendo a cero), el aporte energético de la reacción exotérmica de la combustión del carbón logra incrementar la temperatura de la masa.

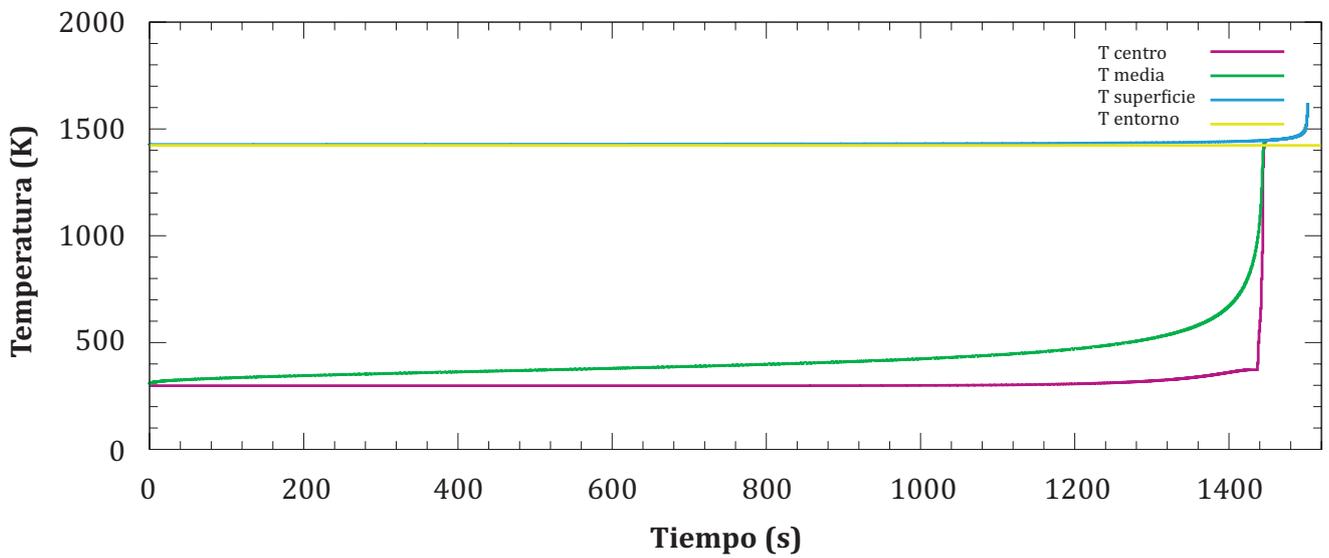
En cuanto a la temperatura de pirólisis, considerando todo el proceso de combustión en todos los volúmenes, el promedio es de 611.4 K. Estos resultados son coherentes con los descritos por Di Blasi *et al.* (Di Blasi, Branca, Masotta y, De Biease, 2013).

Figura 3. Pérdida de masa en función del tiempo versus resultados experimentales de Bryden y Ragland (Bryden y Ragland, 1997) para factor de área 7.



Fuente: Elaboración de los autores.

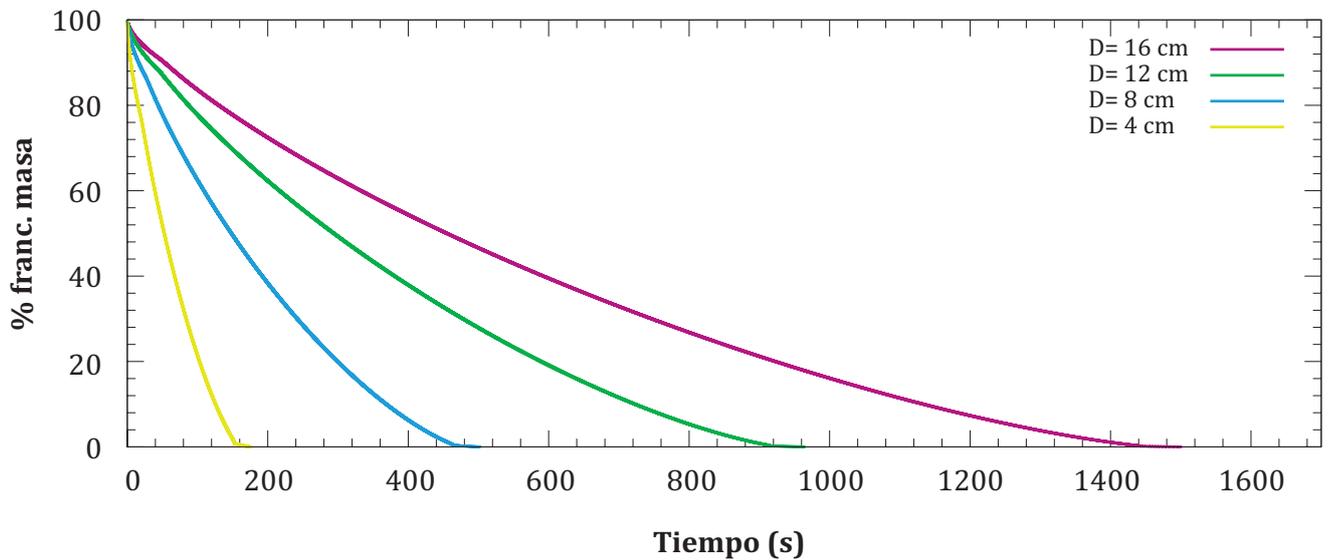
Figura 4. Temperatura media, del centro y de la superficie del rolo en función del tiempo.



Fuente: Elaboración de los autores.

En la figura 5 se presenta la pérdida de masa para diferentes diámetros de troncos en las mismas condiciones del experimento. Los tiempos del proceso tienden a aumentar proporcionalmente al cuadrado del radio del tronco de madera.

Figura 5. Evolución de la pérdida de masa en función del dinamitero para una humedad de 12.5% b.t.



Fuente: Elaboración de los autores.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo unidimensional que permite simular el comportamiento de la combustión de cilindros de madera de hasta 16 cm inmerso en una corriente de gas de alta temperatura. Se obtuvieron resultados prometedores que muestra que el esquema de etapas simultáneas es adecuado para modelar los procesos que ocurren en el interior de un tronco de madera durante el proceso de combustión del mismo. Tanto las gráficas de pérdida de masa, como de variación de temperatura presentan resultados coherentes de acuerdo al experimento utilizado para la validación. El modelo es capaz de determinar el campo de temperaturas y composición del cilindro de madera y también el flujo, temperatura y composición de gases que entran y salen del tronco. Esto permite que sea posible integrarlo a un modelo de combustión de lecho fijo que modele el comportamiento de los gases en el hogar y resuelvan la composición y temperatura de los mismos entorno al tronco. Como trabajo a futuro, se está desarrollando un código que permita modelar la combustión de los gases en el exterior del flujo para un conjunto de troncos de madera en lecho fijo.

•••

AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código POS_NAC_2018_1_152083.

REFERENCIAS

- Bryden, K. M. and, Rangland, K. W. (1997). Combustion of a single wood log under furnace conditions. *Developments in thermochemical biomass conversion*. Springer Science+Business Media Dordrecht, 1331-1345. doi:10.1007/978-94-009-1559-6_105
- De Souza-Santos, M. (2004) *Solid fuels combustion and gasification modeling, simulation, and equipment operation*. Marcel Dekker, NY. <https://www.crcpress.com/Solid-Fuels-Combustion-and-Gasification-Modeling-Simulation-and-Equipment/Souza-Santos/p/book/9781420047493>
- Di Blasi, C.D. (1993). Analysis of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis. *Combust. Sci. Technol.* 90, 315-340, doi: 10.1080/00102209308907620
- Di Blasi, C., Branca, C., Masotta, F. and, De Biase, E. (2013). Experimental analysis of reaction heat effects during beech woodpyrolysis, *Energy Fuels* 27 (5), 2665-2674. <https://doi.org/10.1021/ef4001709>
- Galgano, A., Di Blasi, C., Horvat, A. and, Sinai, Y. (2006). Experimental validation of a coupled solid- and gas-phase model for combustion and gasification of wood logs. *Energy & Fuels* 20, 2223-2232. doi:10.1021/ef060042u
- Haberle, I., Skreiberg, O., Lazar, J., Erland, N. and, Haugen, L. (2017). Numerical models for thermochemical degradation of thermally thick woody biomass, and their application in domestic wood heating appliances and grate furnaces. *Progress in Energy and Combustion Science* 63, 204-252. doi: 10.1016/j.pecs.2017.07.004
- He, F. and, Behrendt, F. (2011). A new method for simulating the combustion of a large biomass particle - a combination of a volume reaction model and front reaction approximation. *Combustion and Flame* 158, 2500-2511. doi:10.1016/j.combustflame.2011.04.016.
- Liden, A., Berruti, F. and, Scott, D. (1988). A kinetic model for the production of liquids from the flash pyrolysis of biomass. *Chem. Eng. Comm.* 65, 207-221, doi:10.1080/00986448808940254.

Lu, H., Robert, W., Pierce, G., Ripa, B. and, Baxter, L. (2008) Comprehensive study of biomass particle combustion. *Energy and Fuels* 22, 2826–2839. doi:10.1021/ef800006z.

MIEM, (2018). Balance energético nacional 2018. Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay <https://ben.miem.gub.uy/balance.html>

Mehrabian, R., Shiehnejadhesar, A., Scharler, R. and, Obernberger, I. (2014) Multi-physics modelling of packed bed biomass combustion. *Fuel* 122 (4) 164–178. doi:10.1016/j.fuel.2014.01.027

Milosavljevic, I., Oja, V. and, Suuberg, E. M. (1996). Thermal effects in cellulose pyrolysis: relationship to char formation processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 35, 653-662. doi:10.1021/ie950438l

Saastamoinen, J., Aho, M. and, Linna, V. (1993). Simulation pyrolysis and char combustion. *Fuel* 72, 599-609. doi:10.1016/0016-2361(93)90571-I

Wagenaar, B., Prins, W. And, van Swaaij, W. (1993). Flash pyrolysis kinetics of pine wood. *Fuel Process. Technol.* 36, 291-298, doi:10.1016/0378-3820(93)90039-7.

Yi, F., Fan, J., Li, D., Lu, S. and, Luo K. (2011). Three-dimensional time-dependent numerical simulation of a quiescent carbon combustion in air, *Fuel* 90, 1522e1528, doi:10.1016/j.fuel.2010.10.051.