

Modelo matemático de una cámara de combustión de una caldera pirotubular utilizando la herramienta matlab-simulink

Mathematical model of a combustion chamber of a pirotubular boiler using the matlab-simulink tool

Andrea del Pilar Fabra Rivera ¹, Francys Marcel Rodríguez Jiménez ¹,
José Ricardo Bermúdez Santaella ², Juan Carlos Campos Rubio ¹

¹ Universidad Federal de Minas Gerais - UFMG, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, MG, Brasil.

² Grupo de investigación de desarrollo en procesos industriales, Universidade Francisco de Paula Santander - UFPS, Avenida Gran Colombia, Cúcuta, Norte de Santander, Colômbia.

email: andreadelpilar65@mail.com, francysmarcel12332@gmail.com, josericardobs@ufps.edu.com, juancarlos681@gmail.com

RESUMEN

En este artículo se presenta la implementación del modelo matemático de la cámara de combustión de una caldera pirotubular, por medio del planteamiento de los balances de masa, energía y estequiométrico. Estos balances fueron descritos por los componentes de entrada (aire y combustible) que se presentan en la zona de combustión, basados en el concepto de mantener la relación estequiométrica entre ellos, los cuales, fueron simulados a través de las herramientas computacionales como el ESS y Matlab®, con el fin de determinar el comportamiento de los gases de combustión dependiendo del tipo de reacción química presentada. Así mismo, fue determinado la cantidad de carbonos e hidrógenos que componen los combustibles de estudio (ACMP y Keroseno), igualmente los kmol/s que componen al aire, con el objetivo de analizar su oxidación y determinar la producción de CO_2 y H_2O . Finalmente, se realizó la respectiva comparación analizando los valores de presión y temperatura en los tres tipos de combustión, estequiométrica, con presencia de inquemados y con exceso de aire. El planteamiento del modelo matemático fue aplicado para los dos tipos de combustibles de estudio.

Palabras clave: modelo matemático, relación aire combustible, Simulink®, cámara de combustión, sistema

ABSTRACT

This article presents the implementation of the mathematical model of the combustion chamber of a pyro-tubular boiler, by means of the approach of mass, energy and stoichiometric balances. These balances were described by the input components (air and fuel) that are presented in the combustion zone, based on the concept of maintaining the stoichiometric relationship between them, which were simulated through the computational tools such as the ESS and Matlab®, in order to determine the behavior of combustion gases depending on the type of chemical reaction presented. Likewise, it was determined the amount of carbons and hydrogens that make up the study fuels (ACMP and kerosene), as well as the kmol / s that compose the air, with the objective of analyzing its oxidation and determining the production of CO_2 and H_2O . Finally, the respective comparison was made analyzing the values of pressure and temperature in the three types of combustion, stoichiometric, with presence of unburned and with excess air. The approach of the mathematical model was applied for the two types of study fuels.

Keywords: Mathematical model, relation air fuel, Simulink, combustion chamber, system.

1. INTRODUCCIÓN

Una caldera es una maquina diseñada para generar energía térmica por medio de la transformación de la energía existente en los diferentes tipos de combustible a través del proceso de combustión. Esta tiene por función transmitir el calor dado por un combustible a un fluido, generalmente agua, realizando un cambio de estado de líquido a vapor. Las calderas producen

el vapor para que sea utilizado en diferentes industrias, como la petrolera, alimenticia, textil, química, así como, en el área médica y centrales termoeléctricas. Estas máquinas se pueden clasificar según su principio de funcionamiento y construcción en pirotubulares y acuotubulares. En las calderas pirotubulares los gases de combustión van a través de los tubos a altas temperaturas calentando el agua que se encuentra depositada en la caldera, mientras que en las calderas acuotubulares el agua se encuentra almacenada en los tubos [1].

Por otro lado, una de las partes principales de una caldera es su cámara de combustión, la cual, tiene por función realizar la quema de grandes cantidades de combustible que es suministrado por boquillas y el aire que la mayoría de las veces es proporcionada por ventiladores o compresores [2, 3]. La entrada de estos dos componentes debe traer consigo una relación perfecta entre los dos para garantizar una combustión estequiométrica. La mezcla de los dos elementos se debe realizar con la mínima pérdida de presión y con la máxima liberación de calor en el área donde va a ser efectuado el proceso de combustión. Una vez realizado el proceso, los gases de combustión harán presencia y deberán ser despreciados en el proceso de combustión final [4, 5].

Para la realización de este trabajo, se desarrolló la simulación de un modelo matemático para la zona de combustión, empleando el software de simulación matlab- Simulink®, el cual, permitió analizar el comportamiento de la combustión en la caldera pirotubular [6], por medio, de los resultados obtenidos de las variables de estudio. Para esta simulación se tuvieron en cuenta, el balance estequiométrico, balance de masa y balance energía, teniendo presente las consideraciones establecidas previamente en el modelo matemático [7, 8].

Para obtener los resultados requeridos se realizó una comparación en la simulación en los componentes de entrada a la cámara de combustión, siendo el combustible y el comburente, donde se establecieron dos tipos de combustibles, con el fin de determinar quién entregaba una mayor concentración de calor dependiendo de su eficiencia térmica, poder calorífico, entre otras propiedades [9].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Simulación de la zona de combustión

A continuación, se describirá la simulación obtenida por el software Matlab®- Simulink® de la zona de combustión, mostrando cada uno de los bloques que conforman el modelo matemático, dando como resultado la representación del proceso de combustión de la caldera pirotubular [10]. Estos bloques están constituidos por el balance estequiométrico, balance de masa, balance energía [11].

2.2 Balance estequiométrico

El balance estequiométrico está compuesto por el flujo de entrada del combustible y comburente (aire) a la cámara de combustión, realizando así, la reacción química necesaria para producir la oxidación de los componentes del combustible ACPM, (C₁₂H₂₆) [12]. También se pueden observar, los valores obtenidos de la variable lambda (λ), la relación aire-combustible, el total de los humos y, la masa de O₂ y N₂ de , que reaccionan con el combustible. Lambda se obtiene de la ecuación 1 [13].

$$\lambda = \frac{m_{\text{estequiométrica}}}{m_{\text{real}}} \quad (1)$$

A continuación, se describen las ecuaciones, que se derivan de la ecuación principal de la variable lambda (λ). En primer lugar, la masa estequiométrica está representada por la ecuación 2.

$$m_{\text{estequiométrica}} = \frac{m_{\text{comb.este}}}{m_{\text{O}_{2\text{este}}}} \quad (2)$$

Donde la masa de O₂ estequimétrico, es la entrada exacta de oxígeno que se necesita para que se quemem todos los componentes del combustible.

Continuando con la ecuación de lambda, la masa real se puede describir con la ecuación 3.

$$m_{\text{real}} = \frac{\text{Masa del combustible}}{\text{Masa de O}_2} \quad (3)$$

Donde la masa del combustible real, es la cantidad total del combustible que entra a la cámara de combustión. La masa del O₂ se determina por la ecuación 4.

$$\text{masa de } O_2 \text{ real} = \text{masa del aire total} * \text{constante} \quad (4)$$

2.3 Comburente (aire)

En la Figura. 1, se describe la obtención de los kmol/s de O_2 y N_2 de , a partir del aire que entra a la cámara de combustión, donde se considera la composición en peso del oxígeno en un 23,1% y del nitrógeno en un 76,9%, dando como resultado el 100% del compuesto del aire.

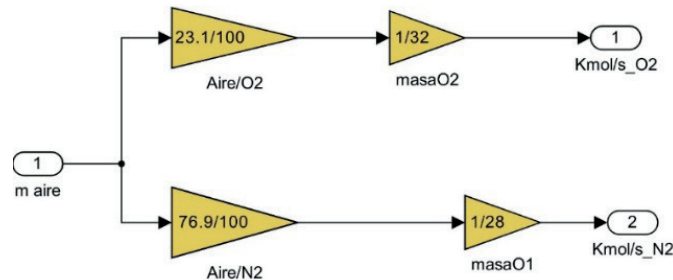


Figura 1: Reacción comburente.

2.4 Reacción combustible-comburente

El proceso planteado del modelo matemático se basó en la estequiometría, donde se puede analizar la reacción entre el combustible ACPM, considerando, los elementos que generan una reacción significativa para la producción de los gases de combustión, basándose en los carbonos e hidrógenos que componen los combustibles ($C_{12}H_{26}$) y los kmol/s de oxígeno, que son generados por el flujo de aire que es introducido a la cámara de combustión, produciendo los compuestos de CO_2 y H_2O .

Igualmente, en esta parte de la simulación, es de gran importancia determinar el oxígeno estequiométrico necesario para hallar lambda y conocer si el proceso de combustión se está realizando efectivamente, ya que, su valor debe ser de 1 representando que no existe un exceso de aire, ni de combustible. La simulación se realizó tomando en cuenta tres tipos de reacciones, estequiométrica, con exceso de aire, y combustible que no reacciona, las cuales estarán descritas a continuación.

2.5 Reacción estequiométrica

En reacciones estequiométricas, es decir, cuando lambda es igual a 1 ($\lambda=1$), el oxígeno en la salida se encuentra en forma de CO_2 y H_2O , donde se asume que todos los componentes del combustible se oxidan sin que se produzcan inquemados, al igual que los del aire, es decir, que entra la cantidad de aire exacta para la reacción, con esto, se desprecia la presencia de CO , de combustible que no reacciona y de O_2 . A continuación se describe la reacción del ACPM tomando como fórmula molecular $C_{12}H_{26}$.

2.5.1 Componentes de entrada combustible ACPM

O_2 alimentación, oxígeno real que entra a la caldera.

$$\frac{kg}{seg_aire} * \frac{21kg}{100kg} * \frac{1\ kmol}{32kg} = \frac{kg}{seg_O_2} \quad (5)$$

N_2 alimentación, nitrógeno real que entra a la caldera.

$$\frac{kg}{seg_aire} * \frac{79kg}{100kg} * \frac{1\ kmol}{28kg} = \frac{kg}{seg_N_2} \quad (6)$$

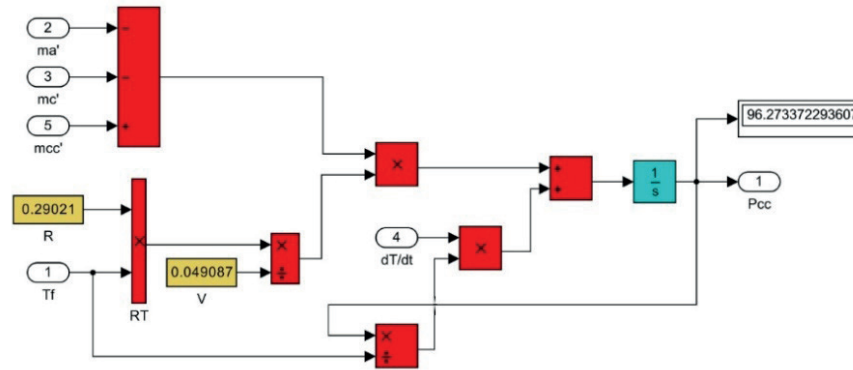


Figura 5: Balance de masa

2.9 Balance de energía

El balance de energía fue llevado al software Matlab®-Simulink®, donde está compuesto por la sumatoria del calor entregado por cada uno de los componentes de entrada, es decir, aire y combustible; también se tiene en cuenta en la sustracción el calor de los gases de combustión que salen del sistema. En la figura 6, se puede observar la simulación de la sumatoria del calor entregado, de acuerdo a la ecuación [13].

$$\frac{dT}{dt} = \frac{m_c LHV * (\lambda + EXC)}{m_{gc} C_{pgc}} + \frac{m_a C_{pa} (T_a - T_{amb})}{m_{gc} C_{pgc}} - \frac{(m_{gc} C_{pgc} (T_{cc} - T_{gc}))}{m_{gc} C_{pgc}} \quad (14)$$

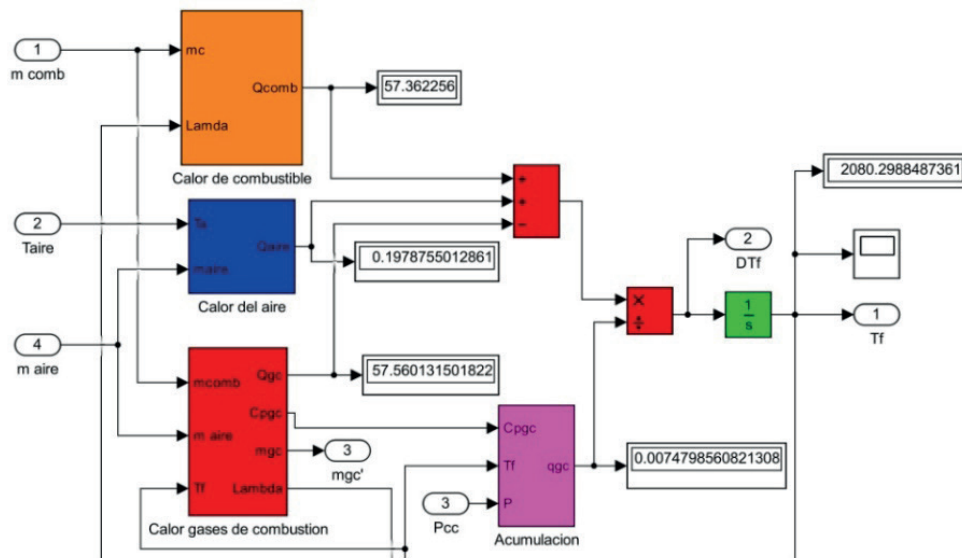


Figura 6: Balance de energía

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados obtenidos del ACPM fueron comparados con el combustible Keroseno para el cual fue establecida la fórmula química $C_{12}H_{32}$, con el fin de determinar cuál de los dos combustibles proporciona una mayor presión y temperatura. El modelo matemático planteado anteriormente fue empleado para los dos combustibles en estudio, basados en la fórmula química de cada uno de ellos. En la tabla 1 y 2, se pueden observar las condiciones de entrada y los valores obtenidos de salida, mediante el modelo matemático planteado para la cámara de combustión.

Tabla 1: Valores obtenidos para el combustible ACPM

	PRESENCIA DE INQUEMADOS	ESTEQUIOMÉTRICO	EXCESO DE AIRE
	Entrada		
Combustible (Kg/s)	0,0012646	0,0012646	0,0012646
Aire (Kg/s)	0.01906	0.01906	0.02
Relación Ar/Comb	15,07	15,07	15,83
Aire y Combustible teórico (Kg/s)	0.02032	0.02032	0.02128
	Salida		
Combustible reaccionante (Kg/s)	0.001239	0.0012646	0.0012646
CO (Kg/s)	0.0004899	0	0
CO ₂ (Kg/s)	0.003079	0.003928	0.003928
H ₂ O (Kg/s)	0.001706	0.001741	0.001741
N ₂ (Kg/s)	0.01466	0.01466	0.01539
O ₂ (Kg/s)	0.0003671	0.00000092	0.0002192
Combustible que no reacciona (Kg/s)	0.00002529	0	0
Temperatura (k)	2038	2075	2080
Presión (Kpa)	94,32	96,02	96,27
Lambda	0.9805	1	1.05

Tabla 2: Valores obtenidos para el combustible keroseno

	PRESENCIA DE INQUEMADOS	ESTEQUIOMÉTRICO	EXCESO DE AIRE
	Entrada		
Combustible (Kg/s)	0.001211	0.001211	0.001211
Aire (Kg/s)	0.01906	0.01906	0.02
Relación Ar/Comb	15,74	15,74	16,53
Aire y Combustible teórico (Kg/s)	0.02027	0.02027	0.02121
	Salida		
Combustible reaccionante (Kg/s)	0.001187	0.001211	0.001211
CO (Kg/s)	0.0004531	0	0
CO ₂ (Kg/s)	0.002848	0.003633	0.003633
H ₂ O (Kg/s)	0.001942	0.001982	0.001982
N ₂ (Kg/s)	0.01466	0.01466	0.01539
O ₂ (Kg/s)	0.0003462	0.00000077	0.0002194
Combustible que no reacciona (Kg/s)	0,00002422	0	0
Temperatura (k)	1961	1995	1999
Presión (kpa)	90,75	92,31	92,53
Lambda	0.9805	1	1.05

El comportamiento de la variable de temperatura y presión, para una combustión estequiométrica, con presencia de inquemados y con exceso de aire, empleando el combustible ACPM, se pueden observar en las figuras 7 y 8.

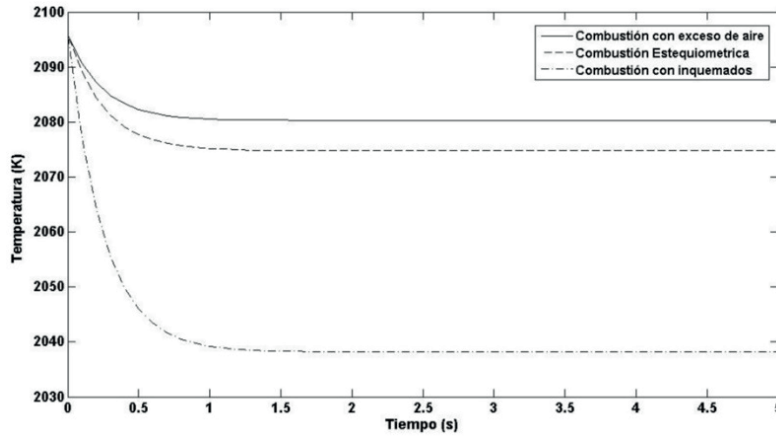


Figura 7: Comportamiento de la temperatura con combustible ACPM.

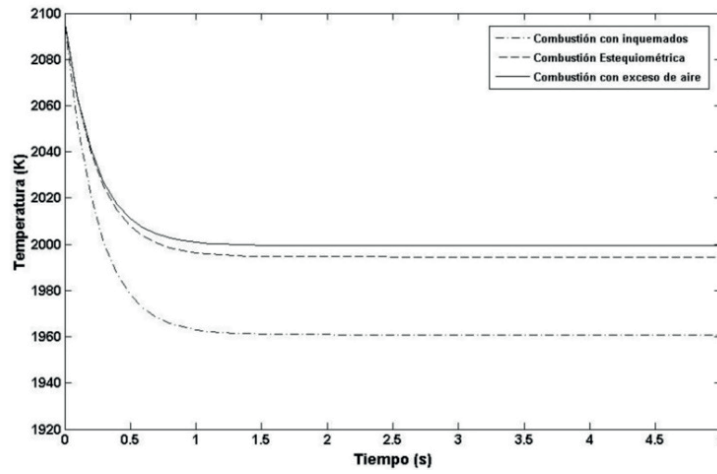


Figura 8: Comportamiento de la presión con combustible ACPM

El comportamiento de la variable de temperatura y presión, para una combustión estequiométrica, con presencia de inquemados y con exceso de aire, empleando el combustible Keroseno, se pueden observar en las Figuras 9,10.

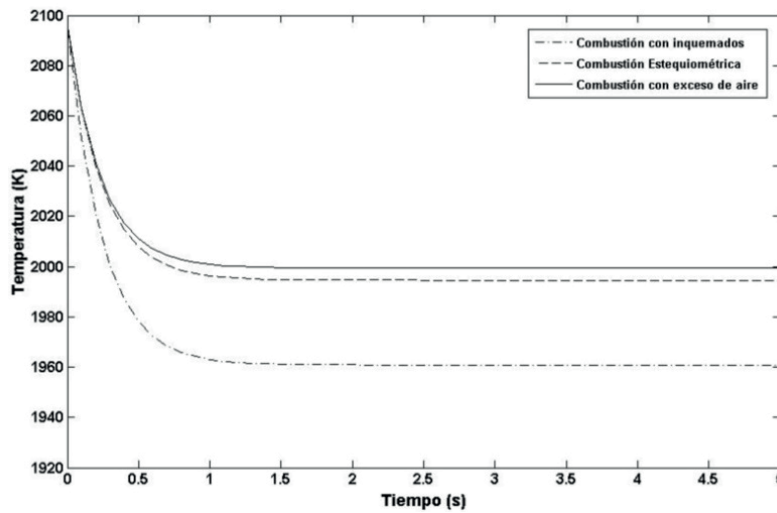


Figura 9: Comportamiento de la temperatura con combustible Keroseno.

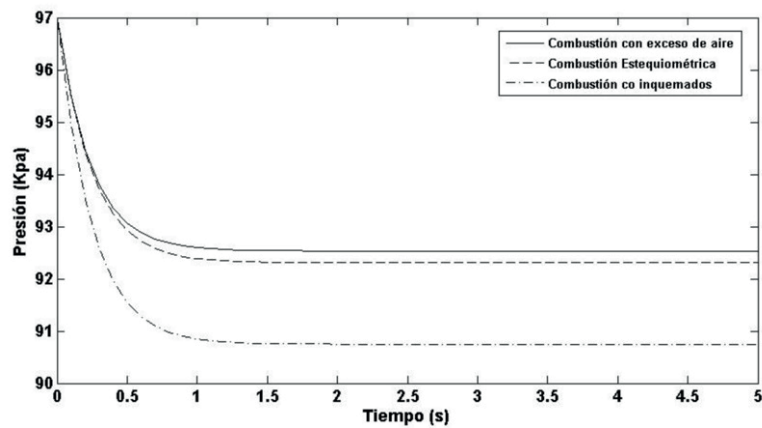


Figura 10: Comportamiento de la presión con combustible Keroseno.

En la reacción química presentada entre combustible y comburente, el combustible ACPM proporciona resultados de temperatura mayores al ser comparados con la reacción química que genera el combustible keroseno, debido a que, manteniendo el flujo másico de aire para ambos combustibles, la relación aire-combustible de keroseno es mayor, dando como resultado que el flujo másico del combustible keroseno sea menor que del combustible ACPM.

En una cámara de combustión de una caldera pirotubular con exceso de aire del 5%, se refleja una temperatura mayor que en una combustión estequiométrica y en una combustión con presencia de inquemados (incompleta). Esto permite que se presente la oxidación completa de los componentes de los combustibles, eliminando la presencia de combustible que no reacciona, conocido comúnmente como hollín y de monóxido de carbono. El modelo matemático desarrollado nos permite involucrarnos en el estudio directamente de los procesos de combustión en una forma detallada y explícita. También nos proporciona alternativas para poder comprender estos procesos en sus características generales y particulares.

4. CONCLUSIONES

En ambos combustibles, la combustión estequiométrica y con exceso de aire, presentan comportamientos de la temperatura y la presión similares.

En la combustión con presencia de inquemados y la combustión estequiométrica la relación entre aire y combustible se mantiene igual, siendo para el combustible ACPM de 15,07 y para el combustible Keroseno de 15,74.

En la combustión estequiométrica y con exceso de aire de ambos combustibles, el flujo másico de salida de los productos de combustión CO_2 , H_2O y N_2 , arrojados en la simulación de este volumen de control presenta valores iguales.

El registro más alto de temperatura se obtuvo para el combustible ACPM con un exceso de aire del 5%, dando un valor de 2080K.

Los valores de presión entre combustión estequiométrica y exceso de aire, son muy cercanos, mientras que la combustión con inquemados presenta una diferencia notoria.

REFERENCIAS

- [1] MARTÍNEZ, *et al.* Análisis de un Software para Determinar el Combustible Óptimo para una Caldera. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, pp. 1-6, 2018.
- [2] KHAUSTOV, *et al.* Computer-aided simulation of fire-tube boiler emergency operation. *Applied Engineering*, pp. 548-551, 2016.
- [3] GARCIA, *et al.* Análisis de Ruido en el Diseño y Construcción de una Cámara Semianecoica para Diagnóstico de Motores de Combustión Interna. *Información Tecnológica*, pp. 121-132, 2016.
- [4] GÓMEZ, *et al.* Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feedboiler. *The Science and Technology of Fuel and Energy*, pp. 987-999, 2016.
- [5] RODRÍGUEZ, *et al.* Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomásas a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal. *Revista científica de la universidad de cienfuegos*, pp. 295-302, 2019.

- [6] KHAN, QAMAREEN. Analysis of Adiabatic Flame Temperature for different Alkane-Air Mixtures using Simulink Model. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, pp. 1202-1210, 2018.
- [7] MOLANO, *et al.* Efecto de la saturación de agua durante la ignición de un proceso de combustión in situ. *Revista Ion*, pp. 83-97, 2018.
- [8] KAZAKH, *et al.* Numerical Modeling of Pulverized Coal Combustion at Thermal Power Plant Boilers. *Journal of Thermal Science*, pp. 275-282, 2015.
- [9] OBED, *et al.* Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel-diesel blended fuel. *Renewable Energy*, pp. 59-67, 2015.
- [10] KOHLER, *et al.* In situ high-temperature gas sensors: continuous monitoring of the combustion quality of different wood combustion systems and optimization of combustion process. *Journal of sensors and sensor system*, pp. 161-167, 2018.
- [11] SUNIL, *et al.* Mathematical modeling, simulation and validation of a boiler drum: Some investigations. *The International Journal Energy*, pp. 312-325, 2017.
- [12] BABU, ANAND. Effect of biodiesel-diesel-n-pentanol and biodiesel-diesel-n-hexanol blends on diesel engine emission and combustion characteristics. *The International Journal Energy*, pp. 761-776, 2017.
- [13] CASTRO, *et al.* *Universitat Politècnica de València*. Retrieved from *Universitat Politècnica de València*: <https://riunet.upv.es/handle/10251/103843>, Junio 11, 2018
- [14] GANGARAJU, *et al.* Design and analysis of gas turbine combustion chamber for producer gas as working fuel. *International Journal of Current Engineering and Technology*, pp. 444-447, Septiembre, 2015.

ORCID

Andrea Del Pilar Fabra Rivera	https://orcid.org/0000-0002-3265-7635
Francys Marcel Rodriguez Jimenez	https://orcid.org/0000-0002-5794-4729
Jose Ricardo Bermudez Santaella	https://orcid.org/0000-0001-9265-0083
Juan Carlos Campos Rubio	https://orcid.org/0000-0001-6187-6442