

Determinación de la emisividad de llama y el calor de radiación por combustión en el hogar de una caldera

Determination of emissivity flame and heat radiation by combustion in the main pipe a boiler

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: MAYO 5, 2016; ACEPTADO: JUNIO 12, 2016

Cristian Rubio Ramirez¹
cristianricardorr@ufps.edu.co
Guillermo Martheyn Lizarazo¹
guillermoalfredomli@ufps.edu.co

José Bermúdez Santaella¹
jrbermud@bari.ufps.edu.co
Emilio Vera Duarte²
luisemiliovd@ufps.edu.co

Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta-Colombia

(1) Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales, GIDPI

(2) Departamento de Fluidos y Térmicas

Resumen

El calor de radiación depende de la emisividad del cuerpo y de la temperatura a la que éste se encuentra. En el caso de los productos que se generan por combustibles líquidos, se considera la emisividad luminosa, causada por la flama, y la emisividad no luminosa, producida por los gases. Se establece una comparación entre el cálculo de la emisividad no luminosa descrita por Michael Modest en su libro *Radiative heat transfer* y los cálculos propuestos por Prabir Basu, Cen Kefa y Louis Jestin, en su libro *Boilers and burners, design and theory*. Además, se contrasta el total de la energía de radiación calculada por ambos métodos.

Palabras Clave

Caldera pirotubular; calor de radiación; combustión; emisividad.

Abstract

The heat radiation emissivity is characterized by having the body and the temperature at which this is. In the case of products generated by liquid fuels should be considered luminous emissivity caused by the flame, and no light emissivity by gases. A comparison between the calculation of the non-luminous emissivity described by Michael Modest in his book *Radiative heat transfer* and the calculations proposed by Prabir Basu, Cen Kefa y Louis Jestin in their book *Boilers and burners, design and theory*, is established. Furthermore, the total radiation energy calculated by both methods contrasts.

Keywords

Fire-tube boiler; heat radiation; combustion; emissivity.

I. INTRODUCCIÓN

El calor de radiación generado por la combustión al interior del tubo principal de una caldera es la principal fuente de energía disponible para transformar el agua de estado líquido a vapor. La radiación térmica presente en los gases de combustión es dependiente de la emisividad de estos. Estudios realizados por Prabir Basu (Basú, Kefa & Jeistin, 2000) en la década de los noventa y por Michael Modest (2003) en los últimos 15 años, demuestran que la emisividad se caracteriza por la incidencia de la flama en la superficie que lo rodea –emisividad luminosa– y por los gases triatómicos que se generan por la combustión del combustible determinado –emisividad no luminosa–.

Los gases triatómicos que se obtienen al quemar combustibles líquidos como la gasolina, el diesel y el *fuel oil*, son el CO₂, H₂O y SO₂. El N₂ del aire y el O₂, debido al exceso de aire que se suministra para obtener una combustión completa, no se toman en cuenta, ya que desarrollan mínimas cantidades de energía por radiación a alrededor de los 2000 K, la temperatura de llama adiabática.

Michael Modest (2003) recopiló el trabajo realizado por H.C. Hottel y B. Leckner, el cual consistía en el análisis de la emisividad espectral y total del vapor de agua y del dióxido de carbono, por medio de correlaciones matemáticas. Generó unas matrices en función de las presiones parciales de los productos de combustión y de la longitud media efectiva del cuerpo que los contiene. Por otro lado, Prabir Basu (Basú et al., 2000) propone una fórmula empírica basada en el tipo de combustible que se emplea y en el exceso de aire suministrado.

Apoyados en la geometría de la caldera que se ubica en la Universidad Francisco de Paula Santander [UFPS] se ha generado una comparación entre la fórmula empírica de Basu y las correlaciones de Modest. Los modelos se resuelven con ayuda del software EES, modificando las variables representativas del caso, como el exceso de aire o la presión del sistema.

II. MÉTODO Y MODELO MATEMÁTICO

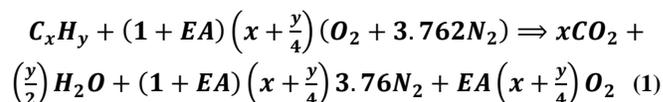
Para realizar los modelos matemáticos se hacen las siguientes consideraciones:

- la combustión es completa con exceso de aire utilizando *fuel oil* #2;
- se hace el análisis en estado estacionario;

- la temperatura de los gases de combustión es igual a la temperatura de la llama; y
- la cámara de combustión se comportará como un cuerpo negro debido a las capas de hollín.

Se describe el análisis de la combustión para así conocer las presiones parciales que tienen los gases triatómicos al interior del tubo principal de la caldera.

Primero se plantea la ecuación (1) para el proceso de combustión (Vera, 2014):



Realizando el balance para combustión completa con exceso de aire se obtiene, para cada uno de los componentes (Ecuaciones 2 a 4):

$$N_o = \left[N_c + \frac{N_H}{4}\right] EA \quad (2)$$

$$N_N = 3.762 * N_o \quad (3)$$

$$N_{aire} = N_o + N_N \quad (4)$$

Se obtienen las moles de cada elemento en los productos de combustión (Ecuaciones 5 a 7).

$$N_{CO_2} = N_c \quad (5)$$

$$N_{H_2O} = \frac{N_H}{2} \quad (6)$$

$$N_{N_2} = EA \left(N_c + \frac{N_H}{4}\right) (3.762) \quad (7)$$

El número total de moles de los gases es la suma de cada uno de los compuestos que lo forman (Ecuaciones 2, 5, 6 y 7). Se obtiene la fracción molar de cada uno de los gases de combustión (Quiñonez, 2008).

$$F_{CO_2} = \frac{N_{CO_2}}{N_{Total}} \quad (8)$$

$$F_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_{Total}} \quad (9)$$

$$F_{H_2O} = \frac{N_{H_2O}}{N_{Total}} \quad (10)$$

$$F_{N_2} = \frac{N_{N_2}}{N_{Total}} \quad (11)$$

Análisis de Prabir Basu

El calor de radiación global se determina por la Ecuación 12 (Basu et al, 2000):

$$Q_{rad} = \psi * A_{int} * \epsilon_{total} * \sigma * (T_g^4 - T_s^4) \quad (12)$$

El parámetro ψ (Ecuación 13) es el factor de eficiencia térmica de la pared del hogar.

$$\psi = m * F_{12} \quad (13)$$

Donde m es el grado de luminiscencia de la llama, en este caso, para combustibles líquidos, $m = 0,55$. F es el factor de forma que representa la fracción de la radiación que sale de la superficie 1, que es interceptada por la superficie 2. En el caso de las calderas, los gases de combustión (1) están contenidos en el cilindro principal (2), por ello $F_{12}=1$ (Incropera & De Witt, 1999).

$$\epsilon_{total} = \frac{\epsilon_{llama} * \epsilon_{pared}}{1 - ((1 - \epsilon_{llama}) * (1 - \epsilon_{pared}))} \quad (14)$$

Debido al color del hollín que se adhiere a las paredes al interior del tubo, se genera una alta emisividad. Por lo que se considera $\epsilon_{pared} = 1$ (Quiñónez, 2008).

ϵ_{llama} es la emisividad total de la llama con los productos de combustión, compuesta por emisividad luminosa y no luminosa.

$$\epsilon_{no\ luminosa} = 1 - \exp(-ky * r * P * Le) \quad (15)$$

$$\epsilon_{luminosa} = 1 - \exp(-(ky * r + kc) * P * Le) \quad (16)$$

$$\epsilon_{llama} = m * \epsilon_{luminosa} + \epsilon_{no\ luminosa} * (1 - m) \quad (17)$$

Donde Le es la longitud media efectiva, y hace referencia al radio de una masa de gas hemisférica cuya emisividad es equivalente a la geometría de interés. En este caso para el cilindro principal es (Incropera & De Witt, 1999):

$$Le = 0,95 * D \quad (18)$$

Así se determina la emisividad de la llama donde r es la sumatoria de las fracciones molares de los gases triatómicos (dióxido de carbono y vapor de agua).

$$ky = \left[\frac{7.8 + 16 * F_{H_2O}}{3.16 \sqrt{(Pa_{H_2O} + Pa_{CO_2}) * L}} - 1 \right] * \left[1 - 0.37 * \frac{T_g}{1000} \right] \quad (19)$$

$$kc = 2 - \left((EA - 1) * (0.00016 * T_g - 0.5) \right) * \frac{F_{m-c}}{F_{m-H}} \quad (20)$$

Estos factores ky y kc se denominan Coeficiente absorción radiante debido a gases triatómicos y a partículas de hollín, respectivamente.

Análisis de Michael Modest

El calor de radiación global es calculado de la siguiente forma (Modest, 2003):

$$Q_{rad} = A_{int} * \sigma * (\epsilon_{total} * T_g^4 - \alpha_{total} * T_s^4) \quad (21)$$

La emisividad de los gases es la suma de las emisividades de cada uno de los gases triatómicos (CO_2 y H_2O), menos el factor de corrección, según las presiones parciales. Este cálculo se aplica también para la absorptividad.

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} - \Delta \quad (22)$$

$$\alpha_{total} = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - \Delta\alpha \quad (23)$$

Los factores de corrección, tanto para la emisividad, como para la absorptividad, se hallan de la misma forma, excepto que $\Delta\alpha$ se multiplica por un parámetro de relación entre la temperatura de los gases y la temperatura de la pared al interior del tubo. En la Ecuación 26 se observará detalladamente.

Se debe analizar primero los gases bajo una presión parcial de 1 bar, para así obtener una referencia del comportamiento de la emisividad.

$$\epsilon_0(p_{aL}, p = 1bar, T_g) = \exp \left[\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N C_{ij} \left(\frac{T}{T_0} \right)^i \left(\log_{10} \frac{p_{aL} Le}{(p_{aL})_0} \right)^j \right] \quad (24)$$

Posterior a esto, se puede calcular la emisividad del vapor de agua y del dióxido de carbono a cualquier presión parcial.

$$\frac{\epsilon(p_{aL}, p, T_g)}{\epsilon_0(p_{aL}, p = 1bar, T_g)} = 1 - \frac{(a-1)(1-P_E)}{a+b-1+P_E} \exp \left[-C \left[\log_{10} \frac{(p_{aL})_m}{p_{aL}} \right]^2 \right] \quad (25)$$

Donde P_E es la presión efectiva, a , b , c y $(p_{aL})_m$ son parámetros de correlación, los cuales se presentan en las Tablas 1 a 3.

Cabe mencionar que las presiones parciales es el producto entre la fracción molar del elemento (H₂O y CO₂) por la presión a la cual se encuentra el sistema.

Tabla 1. Correlaciones de Leckner para emisividad del CO₂

M,N	2,3			
$\begin{bmatrix} C_{00} & \dots & C_{0M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N0} & \dots & C_{NM} \end{bmatrix}$	-3.9893	2.7669	-2.1081	-0.39163
	1.2710	-1.1090	1.0195	-0.21897
	-0.23678	0.19731	-0.19544	0.044644
P_E	$\frac{(p + 0.28p_a)}{p_0}$			
$\frac{(p_a L)_m}{(p_a L)_a}$	0.54/ t^2	$t < 0.7$		
	0.225 t	$t > 0.7$		
a	$1 + 0.1/t^{1.45}$			
b	0.23			
c	1.47			
$T_0 = 1000K \quad p_0 = 1bar \quad t = T/T_0 \quad (p_a L)_0 = 1bar - cm$				

Tabla 2. Correlaciones de Leckner para emisividad del H₂O

M,N	2,2		
$\begin{bmatrix} C_{00} & \dots & C_{0M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N0} & \dots & C_{NM} \end{bmatrix}$	-2.2118	-1.1987	0.035596
	0.85667	0.93048	-0.045915
	-0.10838	-0.17156	0.045915
P_E	$\frac{((p + 0.56p_a)/\sqrt{t})}{p_0}$		
$\frac{(p_a L)_m}{(p_a L)_a}$	13.2 t^2		
a	2.479	$t < 0.75$	
	1.88 - 2.053 log ₁₀ t	$t > 0.754$	
b	1.10/ $t^{1.4}$		
c	0.5		
$T_0 = 1000K \quad p_0 = 1bar \quad t = T/T_0 \quad (p_a L)_0 = 1bar - cm$			

Por último se calcula el factor de corrección, este valor toma en cuenta la reducción de la emisividad relacionada con la cantidad de energía por radiación que se absorbe entre los mismos gases (H₂O y CO₂).

$$\Delta \varepsilon = \left[\frac{\zeta}{10.7+101\xi} - 0.0089\zeta^{10.4} \right] \left(\log_{10} \frac{(p_{H_2O}+p_{CO_2})L_e}{(p_a L)_0} \right)^{2.76} \quad (26)$$

$$\Delta \alpha = \left[\frac{\zeta}{10.7+101\xi} - 0.0089\zeta^{10.4} \right] \left(\log_{10} \frac{(p_{H_2O}+p_{CO_2})L_e}{(p_a L)_0} * \frac{T_s}{T_g} \right)^{2.76} \quad (27)$$

Donde:

$$\zeta = \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O}+p_{CO_2}} \quad (28)$$

Al momento de evaluar la absorptividad de la mezcla de gases, se utiliza el mismo procedimiento de cálculo de la emisividad, descartando el parámetro de referencia ε_0 ; ($\varepsilon_0 = 1$). Se aplica un parámetro de relación entre la temperatura de los gases y la temperatura de la pared al interior del tubo.

$$\alpha(p_a L, p, T_g, T_s) = \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^{1/2} * \varepsilon \left(p_a L, \frac{T_s}{T_g}, p, T_s \right) \quad (29)$$

Para los análisis de transferencia de calor en calderas se considera únicamente el calor que se genera por la radiación. El flujo de aire y el combustible generan un calor por convección, pero debido a la baja velocidad de estos, la energía que generan es solo una pequeña fracción (cerca del 5%) del total del calor transferido involucrado en el proceso de generación de vapor (Modest, 2003).

Tabla 3. Nomenclatura representativa de cada modelo

General	F_{CO_2}, F_{O_2} F_{N_2}, F_{H_2O}	Fracciones molares de los productos de combustión	
	Q_{rad}	Calor total de radiación	[W]
	A_{int}	Área interna del tubo	[m ²]
	D	Diámetro interior del tubo	[m]
	T_g	Temperatura de gases de combustión	[K]
	T_s	Temperatura superficial al interior del tubo	[K]
Basú	R	Suma de las fracciones molares de los gases triatómicos $F_{CO_2} + F_{H_2O}$	
	P	Presión del sistema	[MPa]
	$P_{a_{H_2O}}, P_{a_{CO_2}}$	Presión parcial del gas ($P^* F_{XY_n}$)	[MPa]
	L	Longitud total del tubo	[m]
	EA	Exceso de aire	
	F_{m-c}, F_{m-H}	Fracción molar de los elementos del combustible	
Modest	P	Presión del sistema	[bar]
	$P_{a_{p_{H_2O}}, p_{CO_2}}$	Presión parcial del gas ($P^* F_{XY_n}$)	[bar]
	L	Longitud total del tubo	[cm]
	L_e	Longitud media efectiva	[cm]
	P_E	Presión efectiva	[bar]

III. RESULTADOS

Utilizando el software EES se resolvieron las ecuaciones de forma iterativa. Se plantearon las ecuaciones

de tal forma que, variando la presión a la cual trabaja el sistema, se obtienen diferentes valores de emisividad y calor de radiación.

A continuación se muestra el código de programación en EES.

{Cálculo de emisividad en el hogar, modelo Michael Modest}

```
P=14 [psi] {Presión del sistema; psi}
Pa=P*convert(psi;bar) {Presión del sistema; bar}
Le=D_in_H*convert(m;cm)*0,95
Pa_H2O=Pa*F_H2O {Presión parcial H2O}
PaLe_H2O=Pa_H2O*Le
Pa_CO2=Pa*F_CO2 {Presión parcial CO2}
PaLe_CO2=Pa_CO2*Le
To=1000[K] {Temperatura de referencia}
PaLo=1 [bar-cm]
Po=1 [bar] {Presión de referencia}
OMEGA_T=T/To {Relación de temperaturas}
```

{Emisividad CO₂ a presión del sistema}

```
PaLm_CO2=(0,225*OMEGA_T^2)*PaLo
PE_CO2=(Pa+0,28*Pa_CO2)/Po
a1=1+0,1/OMEGA_T^1,45
b1=0,23
c1=1,47
Y1=log10(PaLm_CO2/PaLe_CO2)
epsilon_CO2_sist=1-(((a1-1)*(1-PE_CO2))/(a1+b1-1+PE_CO2))*(exp(-c*(Y1^2)))
```

{Factor de corrección de emisividad}

```
tau=Pa_H2O/(Pa_H2O+Pa_CO2)
DELTA_epsilon=(tau/(10,7+101*tau)-0,0089*tau^10,4)*(log10((Pa_H2O+Pa_CO2)*Le/PaLo))^2,76
```

{Cálculo de emisividad en el hogar, modelo Prabir Basu}

```
P=14 [psi]
P_llama=P*convert(psi;Mpa) {Presión del sistema, MPa}
Le_llama=D_in_H*0,95 {Longitud media efectiva, m}
Pa_llama_H2O=P_llama*F_H2O
Pa_llama_CO2=P_llama*F_CO2

epsilon_total=(epsilon_llama*epsilon_pared)/(1-((1-epsilon_llama)*(1-epsilon_pared)))
epsilon_pared=1
epsilon_llama=m*epsilon_luminosa+(1-m)*epsilon_noluminosa
m=0,55
psi=m
```

```
epsilon_noluminosa=1-exp(-(Ky*r*P_llama*Le_llama))
epsilon_luminosa=1-exp(-(Ky*r+Kc)*P_llama*(Le_llama))
r=F_CO2+F_H2O {Fracción molar CO2+H2O}

Ky=((7,8+16*F_H2O)/(3,16*sqrt((Pa_llama_H2O+Pa_llama_CO2)*(Le_llama)))-1)*(1-0,37*T2/1000) {Coef. absorción radiante debido a gases triatómicos}

Kc=(2-(EA-1)*(0,00016*T2-0,5))*((M_C/Masa_acpm)/(M_H/(Masa_acpm)))) {Coef. absorción radiante debido a partículas de hollín}
```

En algunos casos, el programa EES presentará cuadros de diálogo con algún tipo de error, ya sea divisiones por cero, logaritmos o potencias negativas, o números muy extensos para ser evaluados, en esos casos se recomienda limitar las variables en la opción “Variable Info”. El consejo más común es que el valor “Lower” sea de 10E-9, ya que si el programa comienza desde infinito e itera por cero (0), se producirá un error.

Cabe aclarar que las unidades de presión que se manejan en las calderas americanas son lb/in² (psi). Sin embargo, las figuras que se presentan a continuación poseen las unidades del sistema internacional de medidas (bar). Los cálculos se realizaron con las unidades preestablecidas en cada modelo, considerándose sus respectivas conversiones.

Figura 1. Comparación entre modelos teniendo en cuenta la emisividad, variando la presión de operación

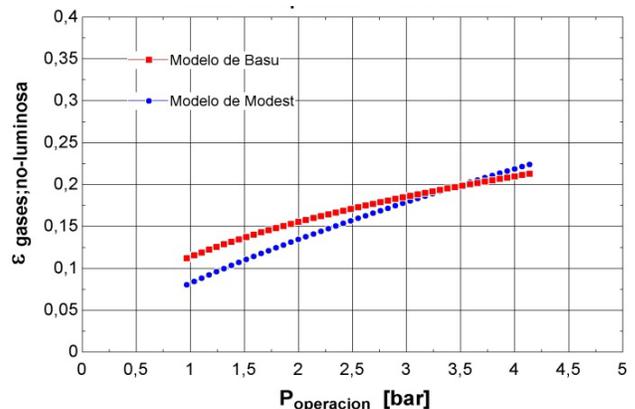
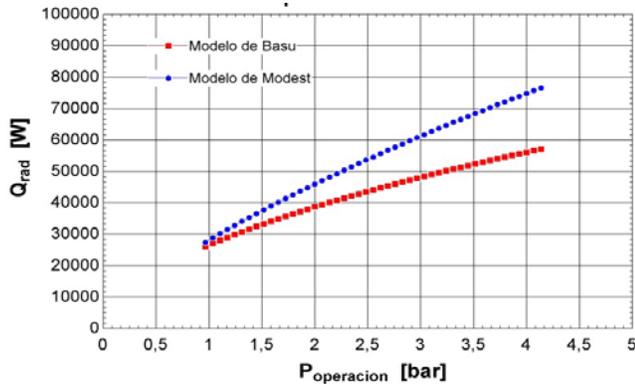


Figura 2. Comparación entre modelos teniendo en cuenta el calor de radiación, variando la presión de operación



IV. CONCLUSIONES

Para que la caldera opere adecuadamente se debe trabajar con una presión de por lo menos 1 bar (14,5 psi), y no puede superar el nivel de seguridad que haya diseñado el fabricante, en este caso, no debe exceder los 4,5 bar (65 psi).

Al aumentar la presión a la cual se encuentran los gases al interior de la caldera, la emisividad y el calor de radiación aumentan.

En el gráfico de presión vs. emisividad (Figura 1), los modelos de Modest y Basu poseen cierta similitud a bajas presiones, sin embargo, cuando estas aumentan, existe una diferencia considerable entre los dos. Lo mismo ocurre en el gráfico de presión vs. calor de radiación (Figura 2), aunque presentan mayor similitud que en el de emisividad, a medida que las presiones aumentan, los valores discrepan considerablemente.

El calor de radiación, calculado por cualquiera de los dos métodos, no es el calor como tal que recibe el agua al interior de la caldera, ya que se deben tener en cuenta la energía que pierde el sistema por humos y la que pierde al interactuar con el ambiente.

El modelo de Modest tiende a ser más detallado con el cálculo de la emisividad por parte de los gases triatómicos, ya que Basu solo considera valores estándar propios del combustible.

A presiones bajas, del orden de 1 bar, la emisividad de los gases, según el modelo de Basu, es mayor; sin embargo, a partir de los 3,5 bar la emisividad no luminosa de los componentes triatómicos tiende a aumentar, según el modelo de Modest.

REFERENCIAS

- Basu, P., Kefa, C., & Jestin, L. (2000). *Boilers and burners. design and theory*. New York, NY: Springer.
- Incropera, F. & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* [4a ed.]. México, DF: Prentice-Hall.
- Modest, M. (2003). *Radiative heat transfer* [2a ed.]. Amsterdam, The Netherlands: Academic Press.
- Quiñonez, N. (2008). *Desarrollo de software para el análisis y diseño térmico de calderas pirotubulares horizontales con quemadores a diésel y bunker* [tesis]. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Vera, E. (2014). *Combustión básica*. Cúcuta, Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander.

CURRÍCULOS

Cristian Ricardo Rubio Ramírez. Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander; pertenece al Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI), cuyas áreas de interés son: combustión, transferencia de calor, termodinámica, comportamiento de dispositivos de alta presión y calderas.

Guillermo Alfredo Martheyn Lizarazo. Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander; pertenece al Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI), cuyas áreas de interés son: combustión, transferencia de calor, termodinámica, comportamiento de dispositivos de alta presión y calderas.

Luis Emilio Vera Duarte. Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Francisco de Paula Santander, con Maestría en Ingeniería Mecánica y experiencia en el sector industrial. Es miembro del Departamento de Fluidos y Plantas Térmicas (FLUTER) y docente de la Facultad de Ingeniería de la UFPS. Sus áreas de interés son: combustión, termodinámica, uso de combustibles sólidos y comportamiento de calderas.

José Ricardo Bermúdez Santaella. Ingeniero Electromecánico egresado de la Universidad Industrial de Santander, con Maestría en Automatización, Control e Instrumentación. Es líder del Grupo de Investigación de Desarrollo en Procesos Industriales (GIDPI) y docente de la Facultad de Ingeniería. Sus áreas de interés son: automatización, control, comportamiento de calderas, motores de combustión interna y turbocargadores. Cuenta con experiencia en el sector industrial.