

Simulación de un proceso de inyección de carbón pulverizado con mejoras técnicas, caso de estudio “Ladrillera La Sultana”¹

Simulation of a process of pulverized coal injection with technical improvements, “Ladrillera La Sultana” case study

H. O. Dorado y J. F. Flórez

Recibido Febrero 17 de 2015 – Aceptado Mayo 29 de 2015

Resumen - En este artículo se realiza la simulación de un proceso de inyección de carbón fluidificado con y sin mejoras técnicas utilizando un simulador de procesos industrial, caso de estudio planta 1 ladrillera La Sultana Villa Rica (Cauca). Se recolecta, clasifica y organiza la información del proceso de inyección y horno túnel de la planta; se realiza modelado del proceso de inyección (modelos físico, de proceso, control procedimental y diagrama P&ID) utilizando ISA S88 e ISA S5. Se diseñan ocho (8) módulos de equipo y un módulo horno para el simulador de procesos. Se realizan dos simulaciones, con y sin mejora técnica incorporada. Se obtuvieron curvas de temperatura del horno, la desviación estándar fue $\pm 5^{\circ}\text{C}$ menor en las curvas con mejora técnica; el coeficiente de correlación con la temperatura ambiente fue en promedio 0,3 unidades menores para las curvas con mejora técnica, la implementación de la mejora técnica significaría para la planta un ahorro mensual de US \$ 171,52.

Palabras Clave - ISA S88.1, modelado, sistema de inyección de carbón, combustible, fluidificado, simulación de procesos.

Abstract - this paper presents the simulation of a fluidized coal injection process, with and without technical improvements using simulator industrial processes, Ladrillera La Sultana case study, Villa Rica (Cauca). Information of the injection process and furnace tunnel of the plant is collected, classified and organized; the injection process is modeled (physical, process and procedural control and P&ID diagram) using ISA S88 and ISA S5. Eight (8) modules equipment and a furnace module are designed for the process simulator. Two simulations were performed with and without technical improvements incorporated. Temperature curves of furnace were obtained, the standard deviation was $\pm 5^{\circ}\text{C}$ lower in the curves with technical improvements incorporated; the correlation coefficient with the ambient temperature was 0.3 units below with the technical improvement. The implementation of technical improvement means a monthly savings of US \$ 171.52.

Key Words - ISA S88, modeling, coal injection system, fuel, fluidized, process simulation.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la industria no solo se enfoca en tener un sistema de producción que cumpla las demandas del mundo moderno, sino que busca diferentes maneras de ahorrar combustible [1-3], la cantidad de

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Control de un proceso de inyección de carbón fluidificado para un horno túnel”. Presentado por el Grupo de Investigación I+D en Automática Industrial, de la Universidad del Cauca.

H.O. Dorado Espinosa, Investigador en el Departamento de Electrónica e Instrumentación, de la universidad del Cauca, Popayán (Colombia); email: hevertdorado@unicauca.edu.co

J. F. Flórez Marulanda, Investigador en el Departamento de Electrónica e Instrumentación, de la universidad del Cauca, Popayán (Colombia); email: jfllorez@unicauca.edu.co

componentes de las plantas hace que presentar propuestas de mejora en algún campo sea cada vez más complejo, por ello se ha optado por utilizar recursos software para diseñar o rediseñar en la industria empleando simuladores especializados [4]. La industria cerámica no es la excepción, la creciente demanda e innovación en sus productos ha hecho que en sus procesos se utilice más tecnología en los sistemas de inyección de combustible.

A nivel internacional se han realizado simulaciones para diversas aplicaciones industriales, entre éstas se pueden relacionar: simulaciones para predecir el comportamiento de piezas en hornos [5][6], simulaciones para compactación de polvos industriales [7], simulaciones para predecir la ablación de metal por láser [8], simulaciones del proceso de pulido de materiales cerámicos [9], simulaciones para optimizar el proceso catalítico en procesos industriales [10]. Se ha utilizado simulación para diseñar plantas para tratamiento de aguas residuales [11][12], se analizó la importancia de la simulación de procesos industriales [13], se desarrollaron modelos térmicos de hornos túnel para simulación de hornos y secaderos [14] y simulaciones de procesos industriales continuos [15]. También se ha trabajado con computación dinámica de fluidos (CDF) para diseñar y construir hornos túnel [16]. Las investigaciones reportadas han contribuido de manera positiva en el campo de la simulación de procesos industriales y son una base para mejorar y diversificar las aplicaciones software relacionadas con la transformación de materiales a gran escala, a pesar de la variedad de trabajos de simulación en procesos industriales, se encuentran escasos reportes de simulación de sistemas de inyección para hornos túnel, en especial los que utilizan carbón pulverizado como combustible-[17-19].

En Colombia, al igual que en otros países suramericanos, es reciente el reporte de simulación de procesos industriales, se ha trabajado con CFD para predecir el comportamiento de la temperatura en un horno túnel [20], se ha resaltado la importancia de la simulación en la toma de decisiones en la industria [21], sin embargo en el país es escaso el uso de simuladores industriales y no hay reportes sobre su aplicación en simulación de sistemas de inyección de carbón pulverizado en hornos túnel.

Realizar simulaciones de procesos industriales exige no solo modelado físico matemático relativamente complejo, uso de herramientas de simulación no industriales y medición de parámetros reales en el proceso, que en la mayoría de casos exigen instrumentación costosa. El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un procedimiento de simulación software para un proceso de inyección de carbón fluidificado (PICF), tomando como caso de estudio el sistema de inyección de combustible de la Planta 1 de la Ladrillera La Sultana. Esto es importante ya que los procedimientos convencionales usan un exigente modelado físico matemático, mediciones de parámetros en campo, validaciones y posteriormente un modelado en herramientas software no especializadas en procesos industriales que

hacen engorroso y complejo el proceso de emulación del comportamiento de la planta real.

En este artículo se desarrolla el modelado ISA S88 del PICF y se definen los módulos de equipo para un simulador de procesos en la sección II, posteriormente se asignan parámetros de simulación a cada módulo, en la sección III se interconectan los módulos diseñados en el simulador, se crea un módulo “horno” y se hacen las simulaciones. Se comparan curvas de temperatura obtenidas en las simulaciones. En la sección IV se presentan las conclusiones del trabajo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El procedimiento propuesto busca modelar y simular un PICF en una herramienta especializada en simulación de procesos industriales que utiliza unidades de proceso gobernadas por ecuaciones no lineales. La metodología empleada para el procedimiento propuesto sigue las recomendaciones de la literatura tradicional sobre simulaciones de procesos [22], además tiene pasos en común con metodologías utilizadas en simulación de procesos industriales [23-25]: Recolección de información del sistema a simular, modelado con estándares del sistema a simular, implementación del sistema modelado en software y simulación del sistema modelado en software.

En su concepción el procedimiento utilizado define el tipo de información y modelado para realizar la simulación del PICF, la información es recolectada y organizada según los modelos ISA S88 [26], con este estándar se hace: modelo físico, de proceso, de control procedimental, y con ISA S5 se hacen los respectivos diagramas de flujo de proceso (PFD) y diagrama de proceso e instrumentación (P&ID). Con los modelos y diagramas se establecen los módulos de equipo y se ubican las entradas, características y salidas de cada uno de ellos, se asignan valores medidos en campo y se realiza simulación de cada unidad, y finalmente una simulación integral interconectando todas las unidades.

Para formalizar la información recolectada se utilizó ISA S88 e ISA S5 y se usaron dispositivos como: una cámara digital genérica, termómetro inalámbrico Texas Instruments EZ430-RF2500T MSP430, planos de la empresa, decámetro, y una cámara infrarroja Milwaukee 2260-21 M12 160 x 120.

Para la simulación se utilizó el simulador de procesos industrial CADSIM Plus 2.5en un SO Windows 7con un PC con 4GB de RAM y procesador Core i5.

A. Recolección información del PICF

El proceso se realizó en la planta 1 de la ladrillera La Sultana, se visitaron las instalaciones y se documentó el PICF en dos partes. Primero se registró minuciosamente cada instrumento, equipo y proceso, desde el almacenamiento del carbón en roca hasta que es inyectado como combustible gaseoso en el horno túnel, esto se hizo con ayuda del

personal que labora en planta, se utilizaron cámaras digitales y planos.

En la segunda parte se tomaron diferentes valores de temperatura del horno túnel, los valores de la parte exterior del horno con una cámara térmica y los valores del interior se tomaron de los registros SCADA de la planta.

1) Registro de datos técnicos del PICF

La información asociada a los módulos de equipo del PICF se organiza en: entradas, salidas y características de cada uno, ver tabla I, esta información se utiliza para diseñar los módulos de equipo en CADSIM Plus.

TABLA I
INFORMACIÓN TÉCNICA DE MÓDULOS DE EQUIPO DEL PICF

Módulo de equipo	Entrada (s)	Características del módulo	Salida(s)
Transportador de bandas	Rocas de carbón de tamaño promedio entre 12 y 50 mm	Velocidad de rotación del motor:240RPM Angulo de elevación de la banda con respecto al suelo: 30° Altura inicial: 1m Altura final: 2.902m Ancho de la banda: 80cm	Rocas de carbón de tamaño promedio entre 12y 50mm
Molino de bolas Y zaranda vibratoria	Rocas de carbón de tamaño promedio entre 12y50mm	Velocidad del motor del molino 1800 RPM Seguidor de leva para la zaranda Transformación de movimiento rotacional a traslaciones por brazo Su funcionamiento depende del operario	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200µm carbón pulverizado de tamaño promedio mayor a 200 µm
Ducto transportador de Zaranda vibratoria asilo grande contenedor	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15a 200 µm	Voltios del motor trifásico 4000v Potencia del motor 15HP Velocidad de rotación promedio 3540RPM Caudal presente en la tubería 1900 CMF Largo: 16,543m	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15a200µm
Silo grande	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200 µm	Detector de nivel Soliphant IIFTM30DR Alto: 16,543 m Diámetro: 7.2 m Capacidad de almacenamiento: 9 toneladas	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200 µm
Transportador Helicoidal	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200 µm	Motor trifásico marca Meco de 3HP y 240 voltios de potencia y con una velocidad de rotación promedio de 600RPM. Angulo de inclinación de 1 5°. Longitud: 8,261m	pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200 µm.
Silo pequeño	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15a 200 µm	Detector de nivel Soliphant IIFTM30DR Detector de nivel manual Capacidad de almacenamiento 2 toneladas Filtro de mangas recupera el carbón pulverizado para reutilizarlo Longitud:5,4m	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200µm
Rotoesclusa	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200 µm	Motor trifásico de 1hp 240 voltios y con una velocidad de rotación promedio de 480RPM Maneja dos velocidades en el variador de 22 a 32Hz	Carbón pulverizado de tamaño partícula promedio 15 a 200µm
Ventilador de paletas industrial	Nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, hidrógeno	Motor 5 Hpa 4000v,caudal 1326CFM (cubic feet per minute)y velocidad de rotación promedio de 2451rpm	Nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, hidrógeno.
Ducto transportador	Carbón, Nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, hidrógeno	Alineación de aluminio diámetro inicial :9" Diámetros intermedios:8" a6", Diámetrofinal:5" Longitud:27	Carbón, Nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, hidrógeno
Electroválvulas	Aire comprimido Señal eléctricas de PLC	Bobinas, gato neumático de doble efecto y seis inyectores con seis mangueras Electroválvula marca MINDMAN 5-2de¼ con una bobina que funciona a 110voltios	Aire comprimido Señal eléctrica desde PLC
Inyectores	Carbón fluidificado	Gato neumático de doble efecto: 32-40 Vástago: 12mm	Carbón fluidificado

2) Registro de temperatura de horno túnel

Se recolectó información de diferentes valores de temperatura dentro y fuera del horno, la temperatura

ambiente y del aire que se mezcla con el carbón (aire primario) se registró durante un periodo de 24 horas, ver Fig. 1.

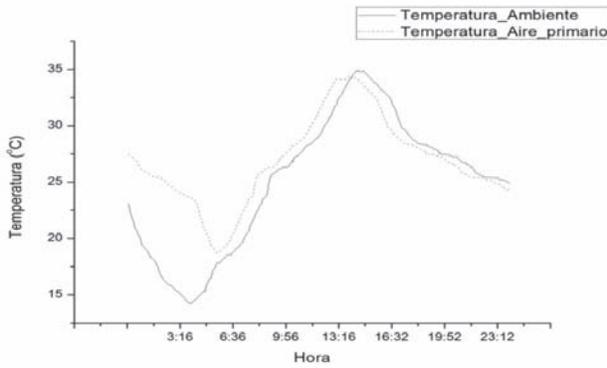


Fig. 1. Registro de la temperatura ambiente y del aire primario en un periodo de 24 horas.

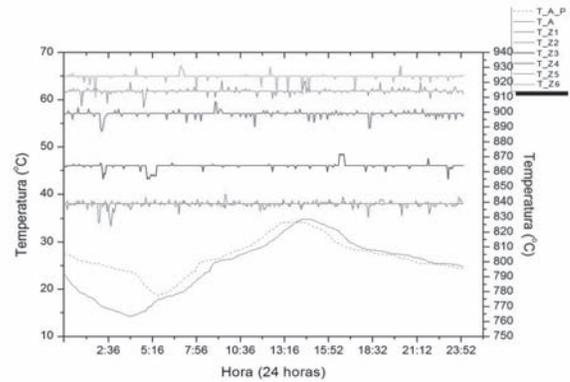


Fig. 2. Temperatura de las seis zonas del horno túnel durante 24 horas.

Las temperaturas de las seis zonas de quema del horno se toman de los registros SCADA de la planta, ver Fig. 2. Se observa la temperatura de las zonas 1 (T_Z1), 2 (T_Z2), 3 (T_Z3), 4(T_Z4), 5(T_Z5) y 6(T_Z6) durante un periodo de 24 horas junto con la temperatura ambiente (T_A) y de aire primario (T_A_P).

B. Modelado ISA del PICF

Para el proceso de modelado se realizó el modelado del proceso usando la norma ISA S88, obteniendo los modelos de proceso, físico y de control procedimental, además se hizo el diagrama P&ID usando ISA S5 [26].

1) Modelos ISA S88 del PICF

Haciendo uso de la norma ISA S88, se organiza la información recolectada en tres modelos: de proceso, físico y de control procedimental, (véanse las tablas II, III y IV). Estas consignan de manera detallada la información relacionada con el PICF. El modelo de proceso se organizó en dos (2) etapas, siete (7) operaciones y veintiocho (28) acciones. El modelo físico está organizado en dos (2) unidades, siete (7) módulos de equipo y ocho (8) módulos de control. El modelo de control procedimental se organizó en un (1) procedimiento, dos (2) procedimientos de unidad, siete (7) operaciones y veintinueve fases (29) [26].

TABLA II
MODELO DE PROCESO DEL PICF

Proceso	Etapas de proceso	Operación del proceso	Acción del proceso
INEYECCIÓN DE CARBÓN PULVERIZADO	Adecuación de carbón mineral	Distribuir carbón mineral	Comprobar funcionamiento del motor del transportador de banda.
			Cargar rocas de carbón mineral en transportador de banda manualmente
			Transportar por una distancia de 8 m las rocas de carbón mineral
		Pulverizar carbón mineral	Verificar que el molino de bolas este encendido y en funcionamiento
			Triturar rocas de carbón mineral con tamaño en el molino de bolas
			Verificar que la zaranda vibratoria este encendida y en funcionamiento
			Filtrar el carbón triturado
		Contener carbón pulverizado	Devolver el carbón triturado que no cumpla con el tamaño promedio
			Verificar nivel del silo grande
	Fluidificación de carbón pulverizado	Incorporar flujo de aire primario	Almacenar el carbón pulverizado en el silo grande
			Encender motor de ventilador de paletas
		Dosificar carbón pulverizado	Succionar aire primario
			Encender transportador helicoidal
			Transportar carbón pulverizado desde silo grande hasta silo pequeño
			Verificar nivel del silo pequeño
			Verificar que la rotoesclusa este encendida y en funcionamiento
			Dosificar el carbón pulverizado necesario utilizando la rotoesclusa
		Inyectar carbón pulverizado fluidificado	Fluidificar el carbón pulverizado mezclándolo con flujo aire
			Verificar que el ducto no estén taponados
			Verificar que el PLC este encendido y en funcionamiento
			Verificar que las electroválvulas neumáticas estén en funcionamiento
		Filtrar carbón pulverizado fluidificado	Verificar que los actuadores neumáticos estén encendidos y en funcionamiento
			Verificar que sensores, las termocuplas estén en funcionamiento
			Inyectar carbón pulverizado fluidificado al horno túnel según se requiera
			Verificar funcionamiento del filtro de mangas
			Filtrar carbón fluidificado que no se utilizó en la inyección al horno.
			Recuperar carbón pulverizado de la mezcla
			Liberar aire sobrante de la mezcla al ambiente.

TABLA III
MODELO FÍSICO DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE CARBÓN FLUIDIFICADO

Celda de proceso	Unidad	Módulo de equipo	Módulo de control
Captación de carbón pulverizado.	Acondicionamiento	Trasporte de banda	Paso de material
		Molino de bolas	Motor a.c. trifásico 1
		Zaranda	Motor a.c. trifásico 2
		Silo contenedor	Motor a.c. trifásico 3
	Inyección	Transportador helicoidal	Nivel 1
		Silo presurizado	Motor a.c. trifásico 4
		Inyectores	Nivel 2
			Velocidad

TABLA IV
MODELO DE CONTROL PROCEDIMENTAL DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE CARBÓN FLUIDIFICADO

Procedimiento de unidad	Operación	Fase	Descripción de fase
Acondicionamiento	Distribución de carbón mineral	Verificación de material	Verificar que las rocas de carbón en el almacén
		Comprobación encendido del motor	Comprobar funcionamiento de transportador de banda.
		Cargar rocas de carbón mineral	Cargar rocas de carbón mineral en transportador de banda manualmente
		Transportar rocas de carbón	Transportar 8 m las rocas de carbón mineral
	Pulverización de carbón mineral	Verificar funcionamiento de molino de bolas	Verificar que el molino de bolas este encendido y en funcionamiento
		Trituración de rocas de carbón mineral	Triturar rocas de carbón mineral en el molino de bolas
		Verificación del funcionamiento de la zaranda	Verificar que la zaranda vibratoria este encendida y en funcionamiento
		Zarandeo de carbón triturado	Zarandear el carbón triturado,
	Almacenar carbón pulverizado	Devolución de carbón triturado	Devolver el carbón triturado
		Verificación de nivel del silo grande	Verificar nivel del silo grande de dosificación
Inyección	Incorporar aire	Almacenamiento de carbón pulverizado	Almacenar en el silo grande contenedor el carbón pulverizado
		Verificación del funcionamiento del motor del ventilador	Verificar motor de ventilador este encendido y en funcionamiento
	Dosificar carbón pulverizado	Succión de aire	Succionar aire primario desde el ambiente
		Verificación del funcionamiento del motor del transportador	Verificar motor de el transportador helicoidal este encendido y en funcionamiento
		Trasporte de carbón pulverizado	Transportar carbón pulverizado al silo pequeño
		Verificación de nivel del silo pequeño	Verificar nivel del silo pequeño
		Verificación del funcionamiento de rotoescusa	Verificar que la rotoescusa este encendida y en funcionamiento
		Dosificación de carbón	Dosificar el carbón pulverizado con roto esclusa
	Inyección de carbón fluidificado	Fluidificar aire	Fluidificar el carbón pulverizado con aire
		Verificación de taponamiento	Verificar que el ducto no esté taponado
		Verificación PLC	Verificar funcionamiento del PLC
		Verificación Electroválvulas	Verificar electroválvulas en funcionamiento
		Verificación actuadores neumáticos	Verificar funcionamiento de actuadores
	Filtrar carbón pulverizado	Verificación termocuplas	Verificar termocuplas en funcionamiento
		Inyectar carbón fluidificado	Inyectar carbón pulverizado fluidificado
		Verificación filtro	Verificar funcionamiento del filtro de mangas
		Filtrar carbón	Filtrar carbón fluidificado sobrante
		Recuperar carbón	Recuperar carbón pulverizado de la mezcla
Liberar aire		Liberar aire sobrante de la mezcla	

2) Diagrama P&ID del PICF

El diagrama P&ID del PICF tuvo como base la información de los modelos ISA S88 y la norma ISA S5, (véase la Fig. 3). En el diagrama están ocho (8) módulos de equipo y siete (7) módulos de control descritos en el modelo físico, el horno, un PLC que recibe señales eléctricas de los transmisores de temperatura y este envía señales del mismo tipo a las electroválvulas que regulan el paso de combustible a los inyectores, un camión y un compresor de aire, las flechas indican el flujo de carbón en la planta.

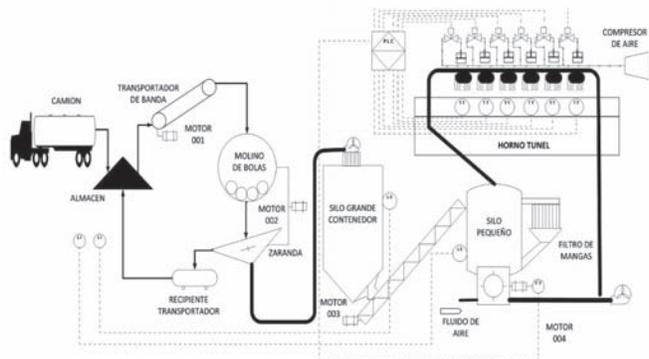


Fig. 3. Diagrama P&ID del proceso de inyección carbón de planta 1 de la ladrillera La Sultana.

C) Implementación del PICF en CADSIM Plus

Los módulos de equipo simulados en el CADSIM Plus se diseñaron teniendo en cuenta la información de la tabla I. Primero se definió el flujo másico para el carbón pulverizado que fluye de la zaranda hasta el silo presurizado, el valor fue 41.6 kg/h, luego se definió la cantidad de carbón y aire que se transporta en el ducto y los inyectores, (véase la Fig. V),

δm_i ($i= 1, 2, \dots, 6$) es el flujo en cada inyector, δm_7 es el flujo en el ducto antes de los inyectores y δm_8 el flujo después de ellos.

En CADSIM Plus se diseñaron ocho (8) módulos de equipo, (véase la Fig. 4), a cada módulo se le asignaron entradas, salidas y parámetros propios de cada uno, algunos fueron construidos uniendo módulos existentes y otros se tomaron de librerías del software.

TABLA V
MODELO DE CONTROL PROCEDIMENTAL DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE CARBÓN FLUIDIFICADO

	Flujo másico, <i>kg/h</i>	Carbón, <i>kg/h</i>	Aire, <i>kg/h</i>
δm_7	2292.62	41.6	2250.95
δm_1	343.89	6.19	337.69
δm_2	343.89	6.19	337.69
δm_3	353.98	6.37	347.60
δm_4	368.42	6.63	361.78
δm_5	373.69	6.72	366.96
δm_6	378.51	6.81	371.70
δm_8	45.85	0.83	45.03

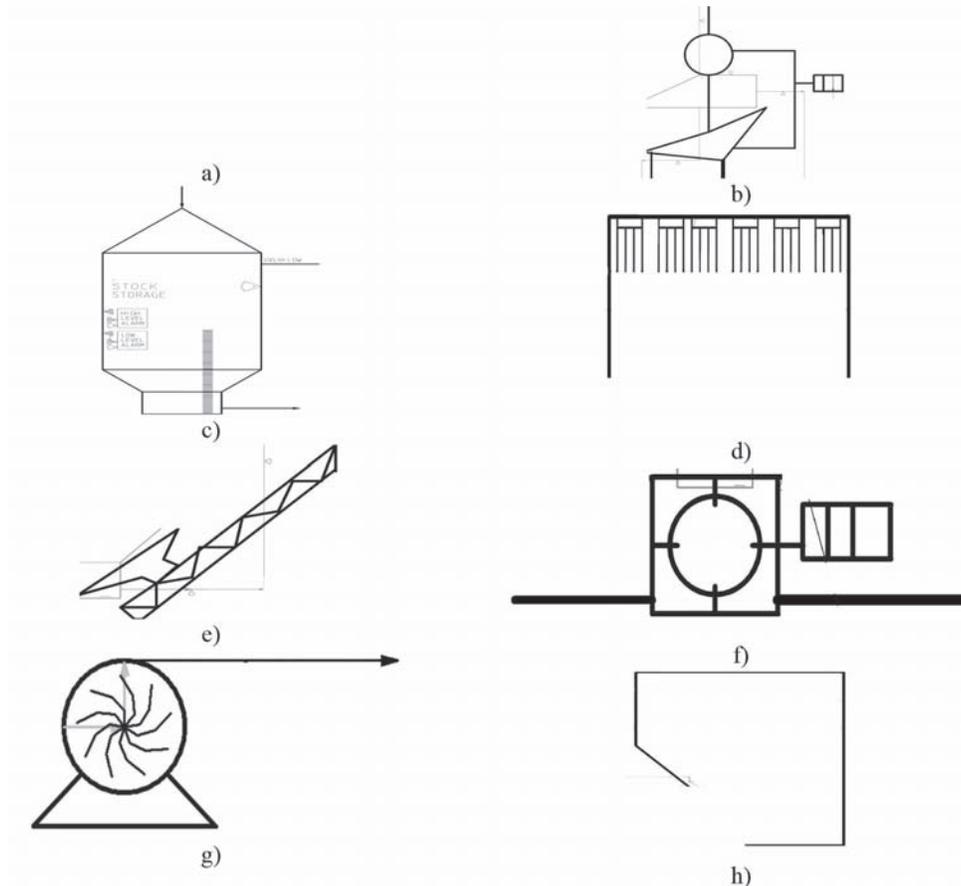


Fig. 4. Módulos de equipo diseñados en el CADSIM Plus, a) transportador de bandas, b) molino de bolas y zaranda, c) silo, d) inyectores, e) transportador helicoidal, f) rotoescusa, g) ventilador de paletas y h) ducto transportador.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Simulación del PICF en CADSIM Plus

Para simular el PICF como sistema proveedor energético en el CADSIM PLUS se requirió crear un nuevo módulo llamado “horno”. Este tiene las características físico-químicas básicas de un horno industrial, para ello se tuvieron en cuenta consideraciones termodinámicas y datos de temperatura registrados del horno túnel en la sección II.A.2.

1) Módulo horno

El horno está dividido en seis (6) zonas, (véase la tabla VI), por cada zona se calculó: el calor producido por el combustible, el calor absorbido por la carga, la pérdida de calor en las paredes y el calor utilizado en otros procesos [27].

TABLA VI
BALANCE DE ENERGÍA EN CADA ZONA

Zona	Calor producido por el combustible MJ/h	Calor absorbido por la carga MJ/h	Pérdida en las paredes MJ/h	Otros MJ/h
1	203.42	80.64	11.18	111.60
2	203.42	80.64	11.18	111.60
3	209.39	85.00	10.67	113.72
4	207.93	76.00	11.07	131.86
5	221.05	72.00	11.22	134.71
6	223.09	75.50	11.28	136.91

B. Simulación del PICF

Los módulos de equipo y los elementos se integraron para simular el PICF como un proceso único, (véase la Fig. 5), con la herramienta del CADSIM Plus Adjust Time Step / Speed se simuló el PICF y el horno en un tiempo equivalente a 24 horas. Se obtuvieron las curvas de temperatura de las seis zonas de combustión, (véase la sección III.C).

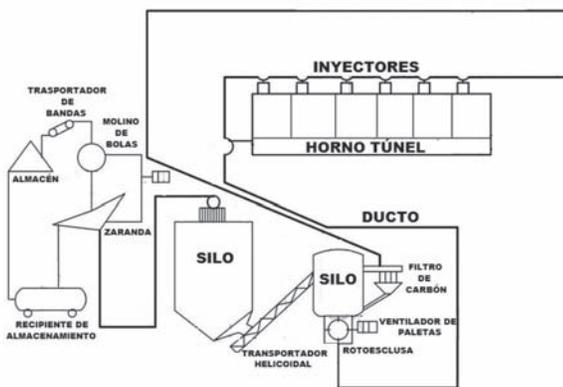


Fig. 5. Esquema de la simulación del PICF en el CADSIM Plus.

C. Simulación del PICF con mejoras técnicas

La mejora técnica del PICF consistió en usar un intercambiador de calor para aprovechar el calor desperdiciado del horno (gases de combustión y calor remanente en bóveda) para calentar el aire primario que se mezcla con el carbón pulverizado, el intercambiador es un tubo de aluminio de 253.58

pies de largo y 6 pulgadas de diámetro, con la utilización de los calores remanentes del horno y el intercambiador el carbón fluidificado alcanza una temperatura de 100 °C. Se diseñó un módulo intercambiador de calor en CADSIM Plus, (véase la Fig. 6), las características de este módulo se definen mediante consideraciones de transferencia de calor [27].

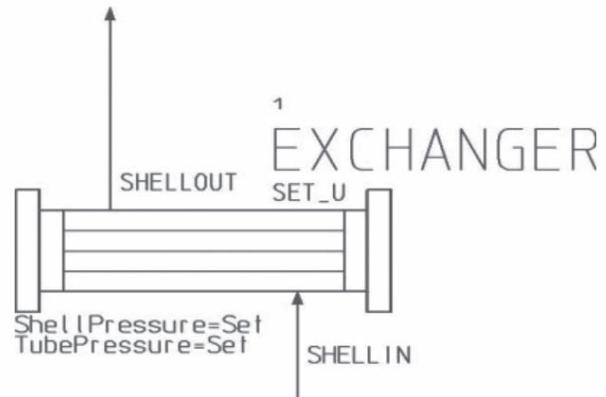


Fig. 6. Módulo “EXCHANGER” utilizado por el CADSIM Plus para simular un intercambiador de calor.

Se realizó la simulación del PICF simultáneamente en las seis (6) zonas de temperatura en un periodo equivalente a 24 horas, tanto para el PICF sin mejoras técnicas (Z1_SMT, Z2_SMT, Z3_SMT, Z4_SMT, Z5_SMT, Z6_SMT) como para el PICF con mejores técnicas (Z1_CMT, Z2_SMT, Z3_SMT, Z4_SMT, Z5_SMT, Z6_SMT), las dos curvas de cada zona se compararon ante la variación de la temperatura ambiente (T_A), (véase la Fig. 7).

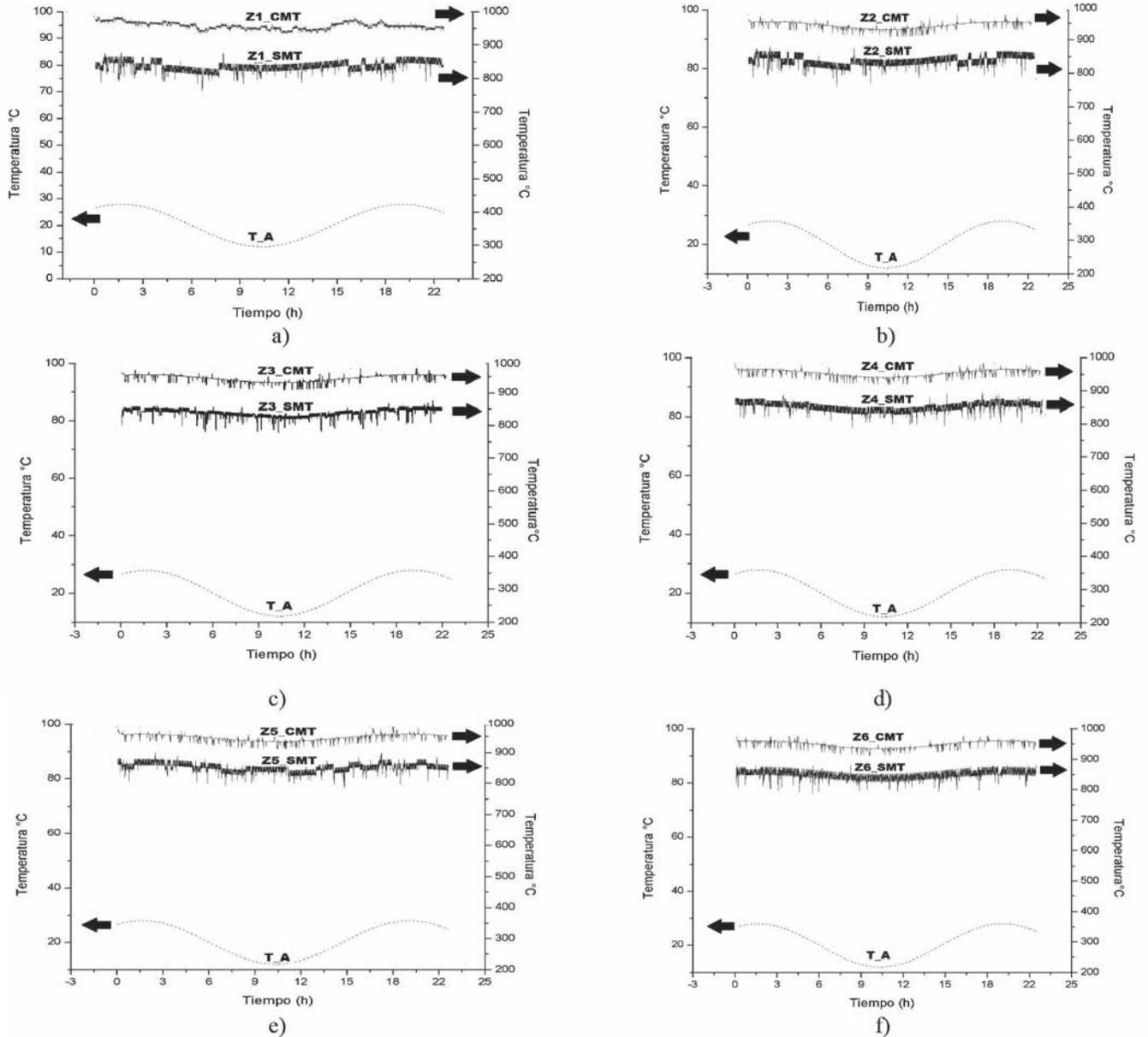


Fig. 7. Comparación de la variación de las curvas de temperatura de cada zona: a) zona 1, b) zona 2, c) zona 3, d) zona 4, e) zona 5 y f) zona 6 de la simulación del PICF con y sin mejoras técnicas con el cambio de la temperatura ambiente, para cada zona se separaron las curvas con y sin mejoras técnicas 100 °C por efectos de comparación.

En la comparación de la variación de las curvas, se aprecia que en las obtenidas de la simulación del PICF con mejoras técnicas hay una menor oscilación alrededor del valor deseado. Al calentar el carbón fluidificado a 100 °C se están utilizando aproximadamente 20 MJ, teniendo en cuenta la energía aproximada que genera un kilo de carbón antracita, esto significa un ahorro de 0.6 kg/h de carbón para cada zona, es decir 3.6 kg/h de carbón en la planta. Este ahorro a largo plazo es significativo: mensualmente se ahorrarían 2678.4 kg de carbón; considerando una (1) tonelada de carbón a un

costo de US \$64 (\$ 156.224 pesos colombianos, consultado enero de 2015), permitiría un ahorro de aproximadamente US \$171,52 (\$ 418.680 pesos Colombianos), sin contar los gastos de transporte; adicionalmente este ahorro estaría acompañado de un impacto ambiental positivo.

Se realiza un análisis estadístico de las curvas de temperatura de cada una de las zonas, para las simulaciones del PICF sin (S_M) y con mejoras técnicas (C_M), ver tabla VII.

Tabla VII
Valores Desviación Estándar De Las Simulaciones Con Y Sin Mejoras Técnicas

Sin y con mejoras Técnicas	Desviación Estándar (°C)					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
S M	16,72672	16,72672	13,12678	15,01614	16,27582	15,23399
C M	10,64475	10,69856	10,69856	10,81206	11,04569	10,62379

El valor de desviación estándar en todas las zonas es más grande para las curvas en la simulación del PICF sin mejoras técnicas (S_M). Para las curvas obtenidas de la simulación del PICF con mejora técnicas (C_M) hay un valor de la desviación estándar promedio de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ y para la simulación sin mejoras técnicas (S_M) la desviación estándar promedio fue de $\pm 15^{\circ}\text{C}$, esto significa que los valores de temperatura obtenidos están más cerca del valor deseado. Se calculó el coeficiente de correlación

a cada curva de temperatura para las dos simulaciones tomando como referencia la curva de temperatura ambiente, ver tabla VIII. La correspondencia más alta con la curva de temperatura ambiente la tuvieron las curvas de simulación del PICF sin mejora técnicas, de lo que se infiere que ante las variaciones de temperatura ambiente la simulación del PICF con mejoras técnica tuvo menor correlación con la temperatura ambiente.

TABLA VIII
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PARA LAS CURVAS OBTENIDAS DE LA SIMULACIÓN DEL PICF CON Y SIN MEJORAS TÉCNICAS

Sin y con mejoras Técnicas	Coeficiente de correlación					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Z
S M	0.76093	0.76093	0.740388	0.77974	0,72341	0,75765
C M	0.69722	0.63442	0.634429	0.60387	0,50599	0,57897

IV. CONCLUSIONES

Se modeló, diseñó y simuló el proceso de inyección de carbón fluidificado de la planta 1 de la ladrillera La Sultana.

En el modelamiento se usó ISA S88, en el diseño y simulación la herramienta CADSIM Plus. Se aplicó una metodología de cuatros pasos: recolección y organización de información, modelamiento ISA, diseño de módulos de equipo y simulación.

Se recolectó información de la planta 1, documentándose de manera detallada: proceso, equipos e instrumentación relacionados con la fluidificación e inyección del carbón, se organizó las características técnicas principales de los equipos del PICF, además se registró los seis (6) valores de temperatura de la zona de combustión del horno túnel, la temperatura ambiente y la del aire primario en un periodo de 24 horas.

Se realizó el modelado ISA S88 del PICF de la planta 1 de la ladrillera La Sultana. El modelo de proceso se organizó en dos (2) etapas, siete (7) operaciones y veintiocho (28) acciones. El modelo físico que se desarrolló está organizado en dos (2) unidades, siete (7) módulos de equipo y ocho (8) módulos de control. El modelo de control procedimental desarrollado se organizó en un (1) procedimiento, dos (2) procedimientos de unidad, siete (7) operaciones y veintinueve fases (29). Junto a los modelos ISA S88 se realizó el diagrama P&ID del PIFC.

Se diseñaron e implementaron ocho (8) módulos de equipo en el CADSIM Plus de acuerdo a los modelos ISA S88, a estos módulos se les asignaron las características consignadas en la tabla I. Se diseñó un módulo “horno” con la información recolectada del horno túnel, que se incorporó

en CADSIM Plus con los ocho (8) módulos del PICF, con ello se hizo la simulación del PICF en un tiempo equivalente a 24 horas obteniéndose curvas de temperatura en las seis (6) zonas de combustión.

Se diseñó un intercambiador de calor para que el carbón fluidificado elevara su temperatura de 30°C a 100°C , este intercambiador se diseñó en CADSIM Plus y se incorporó a la Simulación del PICF con el “horno”, de esta simulación se obtuvieron las curvas de temperatura de las seis zonas de combustión, estas se compararon con las curvas de la simulación del PICF sin el intercambiador de calor.

Gráficamente se observó una menor oscilación alrededor del valor deseado en las curvas de la simulación del PICF con mejoras técnicas, se calculó que el ahorro de carbón incorporando la mejora técnica en el PICF sería de US \$171,52 mensuales. Estadísticamente se encontró que las curvas de temperatura obtenidas de la simulación del PICF con mejoras técnicas tuvieron una desviación $\pm 5^{\circ}\text{C}$ menos que las curvas sin mejoras técnicas. Se demostró una menor correlación de las temperaturas de la zona de combustión con el ambiente en la simulación con mejoras técnicas, el valor fue de 0.3 unidades menores que el obtenido sin mejoras técnicas.

Nota: Los resultados estadísticos arrojados por el que se mencionan en el resumen

AGRADECIMIENTOS

Al gerente Oliverio Cubillos, al ingeniero de procesos Carlos Guzmán y demás personal de la planta 1 de La Sultana, por su gran colaboración en la recolección de la información.

REFERENCIAS

- [1] L. García, "Tecnología de fabricación de arrabio con la inyección de combustibles y otros materiales por toberas en el horno alto," *Rev. Met.*, vol. 34, no. 1, pp. 51–59, 2000.
- [2] R. M. Juan C., Edgar F., Lourdes S., Ivan T., Alfredo N., Enrique Q., Juan M., Yuri L., "ahorro de energía en la industria cerámica." *Colciencias*, Bogotá-Colombia, pp. 6–10, 2006.
- [3] and S. F. S. Yaroshevskii, L. G. A. Formóse, A. Isidro, "Mejoras tecnológicas en el proceso de inyección de carbón pulverizado en el horno alto," *Rev. Met.*, vol. 32, no. 2, pp. 103–116, 2000.
- [4] J. B. Pessoa-filho, "Thermal Radiation in Combustion Systems," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 21, no. 3, pp. 537–547, 2000.
- [5] E. Mart, M. Meis, D. Rivas, and F. Varas, "Bases de datos de simulación numérica para la predicción del calentamiento de piezas en hornos." in *XXI Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones*, 2009, pp. 1–9, 2009.
- [6] J. B. Takeuchi, "Diseño y construcción de un horno de cerámica." *Universidad Carlos III de Madrid*, pp. 1–40, 2009.
- [7] J. C. J. Oliver , S. Oller, "A plasticity model for simulation of industrial powder compaction processes," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 3, no. 20–22, pp. 3161–3178, 2003.
- [8] G. C. Giovanni T., L. Orazi , A. Fortunato, "Laser Ablation of Metals: A 3D Process Simulation for Industrial Applications," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 130, no. 3, pp. 1–11, 2008.
- [9] K. A. M. Hutchingsa, "Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 13, no. 3151, p. 3156, 25AD.
- [10] J. B. Tanguy F., Marie-Françoise R., "No TitleSimulation of heterogeneously MgO-catalyzed transesterification for fine-chemical and biodiesel industrial production," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 67, no. 1–2, pp. 136–148, 2006.
- [11] H. S. Weifeng H., "Modeling, Simulation and Optimization of a Whole Industrial Catalytic Naphtha Reforming Process on Aspen Plus Platform1," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 584–591, 2008.
- [12] Q. Y. Zhenjiang Y., Yun C., Dachun F., "Process Development, Simulation, and Industrial Implementation of a New Coal-Gasification Wastewater Treatment Installation for Phenol and Ammonia Removal," *Sch. Chem. Eng.*, vol. 46, no. 6, pp. 2874–2871, 2011.
- [13] J. T. Walters J., Wei-Tsu W., Anand A. , Guoji L. , David L., "No TitleRecent development of process simulation for industrial applications," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 98, no. 2, pp. 205–211, 2003.
- [14] A. P. Dadam, "Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production," *Rev. la Soc. Bras. Ciencias Mecánicas e Ing.*, vol. 4, pp. 297–304, 2009.
- [15] A. M. R. Alves, Julio E., "Distributed continuous process simulation: An industrial case study," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 32, no. 6, pp. 1195–1205, 2008.
- [16] R. Avecillas, "Proyecto de diseño de un horno túnel para planta procesadora de arcilla BELLA AZHUQUITA," *Politécnica Salesiana*, 2009.
- [17] J. A. Shan-Wen D., Wei-Hsin C., "Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace," *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 576–581, 2010.
- [18] W.-H. C. Shan-Wen D., "Numerical prediction and practical improvement of pulverized coal combustion in blast furnace," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 33, no. 3, pp. 327–334, 2007.
- [19] Y. J.-I. Adilson J., Nogami Hi., "Numerical investigation of simultaneous injection of pulverized coal and natural gas with oxygen enrichment to the blast furnace," *Iron Steel Inst. Japan*, vol. 42, no. 11, pp. 1203–12011, 2003.
- [20] Z. Guti, "Modelamiento y simulación de un horno túnel industrial." *Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia- sede Medellín*, 2010.
- [21] Villanueva j., "la simulación de procesos, clave en la toma de decisiones," *Rev. DYNA*, vol. 83, pp. 221–227, 2008.
- [22] J. Banks., "methodology," in *handbook of simulation*, 1st ed., J. Banks, Ed. Atlanta, 2001, pp. 55–335.
- [23] F. B. M. Rebolledo1, "uso de inteligencia artificial para la optimización de un modelo de simulación aplicado a un proceso de remanufactura de pino radiata.," *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 3, no. 2–1, pp. 52–62, 2001.
- [24] N. M. de L. Y. Rodríguez, "Metodología para la simulación hidrológica de eventos extremos máximos en ausencia de datos hidrométricos a escala horaria," *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 19, no. 4, pp. 119–127, 2010.
- [25] Isasmendi G., "Modelado y simulación de hormigón proyectado Para su uso en aplicaciones de entrenamiento en tiempo real," *Universidad de Navarra*, 2012.
- [26] ISA, ISA. ANSI/ISA-S88.01-1995, 2006.
- [27] M. M. J. Cerón, "Propuesta de un Sistema de Monitoreo del Proceso de Inyección de Carbón Pulverizado de la Ladrillera 'La Sultana – Bloques Ladrillos y Acabados Cerámicos S.A.'," *Universidad del Cauca*, 2013.
- [28] H. Dorado, "Simulación de un Proceso de Inyección de Carbón Pulverizado, Caso de Estudio Ladrillera la Sultana," *Universidad del Cauca*, 2015.



Hevert Orlando Dorado Espinosa

nació en Bolívar-Cauca, Colombia, el 19 de Julio de 1983. Se graduó en 2011 en la Universidad del Cauca como Ingeniero Físico y recibió el título de Magister en Automática en la misma universidad en 2015. Ha trabajado en investigaciones sobre propiedades eléctricas de cerámicos obtenidos con arcillas del Cauca.

También ha realizado investigación sobre automatización de procesos y sistemas de inyección de carbón pulverizado. Actualmente ejerce como docente de física en secundaria.

Juan Fernando Flórez Marulanda Magister en Electrónica y Telecomunicaciones, investigador del Departamento de Electrónica e Instrumentación. Áreas de desempeño: control de procesos, instrumentación industrial, control inteligente robótico y procesamiento de imágenes.