

Tecnificación de un ciclón para material particulado y postratamiento de gases como sistema de control para hornos de coquización en Samacá (Boyacá)

JOSE JUNIOR DÍAZ ⁽¹⁾, VANESSA MORENO CUY ⁽²⁾, ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ CUERVO ⁽³⁾,
OSCAR BELLON ⁽⁴⁾, DORA BENÍTEZ RAMÍREZ ⁽⁵⁾

(1) jjdiaz@uniboyaca.edu.co

(2) vmoreno@uniboyaca.edu.co

(3) andfelrogriguez@uniboyaca.edu.co

(4) oabellon@uniboyaca.edu.co

(5) dmbenitez@uniboyaca.edu.co

Facultad de Ciencias e Ingeniería
Universidad de Boyacá
Tunja, Colombia

Tecnificación de un ciclón para material particulado y postratamiento de gases como sistema de control para hornos de coquización en Samacá (Boyacá)

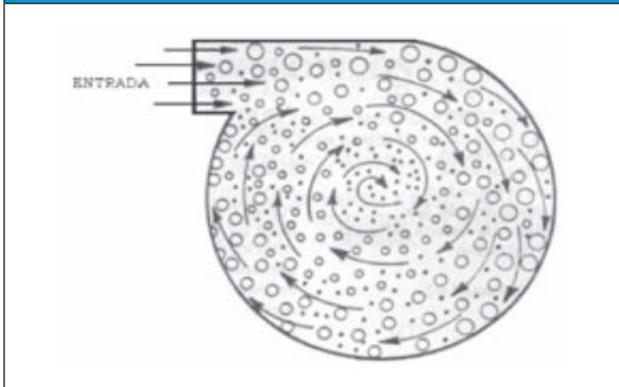
RESUMEN

Palabras clave:

Purificación de aire; material particulado; tratamiento de gases; purificador ciclónico; tecnificación de procesos.

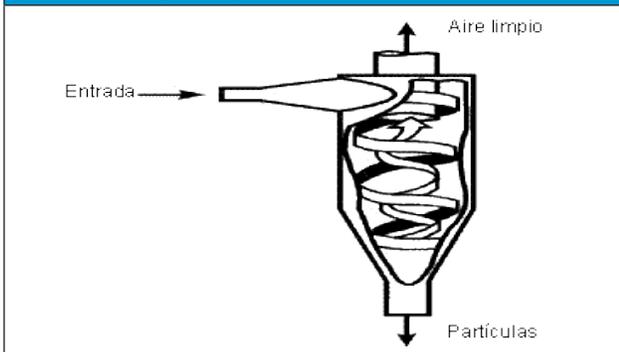
Este trabajo de investigación tiene que ver con el diseño, construcción y tecnificación de un prototipo purificador de aire de tipo ciclónico, complementado con un sistema de post-tratamiento de gases, buscando incrementar la eficiencia de remoción de material particulado y de gases contaminantes emitidos en los hornos de coquización en el municipio de Samacá, Boyacá. Para tal efecto se han instalado sensores para detectar las concentraciones de gases contaminantes como: dióxido de carbono, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico y metano entre otros, a través de la comparación de los flujos, a la entrada y salida del Ciclón; se le ha incorporado un módulo de transmisión inalámbrica de datos que transfiere la información en tiempo real a equipos de recepción para su registro y procesamiento, para cumplir con este requerimiento se ha implementado una interface gráfica de usuario, para su visualización y control. El sistema de postratamiento, consiste de un contenedor tipo embudo que contiene una solución química que busca recoger y neutralizar los gases producto de la coquización, que en condiciones actuales pasan libremente al medio ambiente ayudando a incrementar en la región el problema de lluvias ácidas y otros factores de impacto ambiental negativo. La concentración del aditivo químico en la solución se controla con un sistema en lazo cerrado que monitorea el nivel de pH en su punto de saturación.

Fig. 1. Principio de funcionamiento de un purificador ciclónico de gases. Tomado de [10]



En la figura 1, se muestra un corte transversal de un ciclón en el que el aire de entrada en flujo tangencial es forzado a circular debido a la forma de las paredes del equipo. El movimiento circular hace que las partículas de mayor peso que las moléculas de aire sean desplazadas a una distancia radial mayor. Al chocar con las paredes del ciclón, las partículas pierden velocidad y la gravedad las conduce hacia abajo. El flujo de aire en el centro está libre de material particulado y fluye hacia arriba por el ducto de salida.

Fig. 2. Esquema funcional de un separador ciclónico de partículas. Imagen disponible en [12]



Las chimeneas de los hornos para producción de coque metalúrgico a partir de carbón, son fuentes de material particulado y de gran cantidad de otros componentes también nocivos [13], [14]. Veamos: Primero: existe una descomposición del carbón a temperaturas por debajo de los 700°C en productos primarios consistentes de: agua, monóxido de carbono, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, olefinas, parafinas, hidroaromáticos, compuestos fenólicos y nitrogenados. Segundo: las reacciones térmicas de los produc-

tos primarios ocurren a medida que atraviesan el coque caliente y las paredes a temperatura superior a los 700°C, resultando la formación de hidrocarburos aromáticos y metano, así como producción de grandes cantidades de hidrógeno, cianuro de hidrógeno, bases de piridina, amoníaco, nitrógeno y finalmente la descomposición de los compuestos nitrogenados [15]. Varias de las sustancias mencionadas, generan lluvia ácida y gases de efecto invernadero.

El prototipo diseñado y construido se convierte en un aparato de prueba piloto, útil para trabajar reduciendo la contaminación producto de las emisiones provenientes de las chimeneas de los hornos de coquización. El diseño es una combinación entre separador ciclónico y un sistema de tratamiento de gases mediante reacciones con soluciones de compuestos sódicos y cálcicos.

La tecnificación tiene que ver con la incorporación de elementos electrónicos (Sensores actuadores), mecánicos (motores, estructura del prototipo y sistema de refrigeración), módulos de comunicación (sistemas de comunicación inalámbrica), sistemas computacionales y de programación, para hacer que las tareas de registro de variables, operación automática de suministro de soluciones químicas, control de pH del sistema de tratamiento de gases y control de caudal, entre otros, permitan que la eficiencia del modelo sea alta.

I. METODOLOGÍA

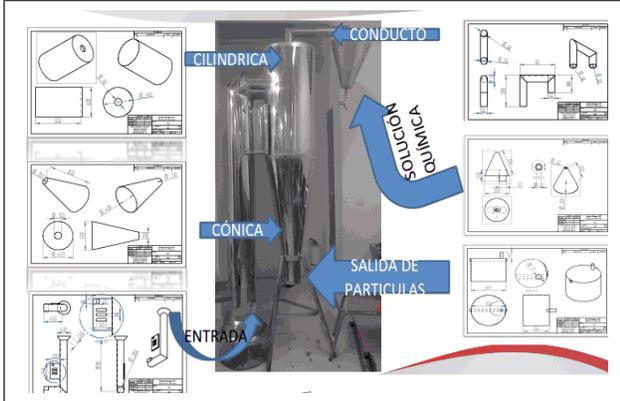
A. Diseño de la Estructura del Prototipo

Dadas las condiciones de operación del ciclón se escoge un material que soporte la temperatura del flujo emitido por la chimenea del horno que oscila entre 800°C y 1200°C. El acero 430 cumple con este propósito.

El dimensionamiento del ciclón de alta eficiencia sigue las orientaciones del Dr Echeverry [10].

Para adaptar el ciclón original, a los requerimientos de la investigación, el ducto de entrada se adecuó a las dimensiones de salida de los hornos de coquización, para el tratamiento químico de gases nocivos se adicionó al ducto de entrada un tanque tipo embudo para alojar la solución encargada de tratarlos, tal como se observa en la gráfica siguiente.

Fig. 3. Planos esquemáticos de construcción del ciclón con modulo para retención de gases nocivos.



La figura 3 indica la correspondencia entre los planos esquemáticos principales y la construcción final del prototipo. Se utilizó el software de diseño asistido SOLID EDGE para la producción de los planos.

B. Selección de los Sensores y Actuadores

A partir de la revisión bibliográfica se determinó que las variables a monitorear serían: temperatura de las emisiones de la chimenea, velocidad del flujo, concentración de gases, pH, masa de material particulado retenido. La temperatura de los gases de salida de la chimenea del horno de coquización se estimó en 700°C aunque no se hizo medición directa, se partió de los valores registrados en la literatura. La velocidad del flujo no se estima menor a 30 m/s, en caso extremo. El pH es un valor estandarizado que puede ir de 0 a 14. Hay diferentes gases que se presentan en la emisión de la chimenea pero por facilidad se escogió el dióxido de carbono (CO₂) por la disponibilidad comercial de sensores a precios relativamente bajos.

TABLA I. LISTA LOS SENSORES Y ACTUADORES SELECCIONADOS

Variable	Referencia del sensor	Rango de operación	Unidades
Temperatura	Termocupla tipo K	0 – 1200	°C
Velocidad de flujo	MAF	0–40	m/s
Gases	MQ-135	0 – 10000	ppm
Nivel de pH	Sonda SEN-10972	0 – 14	Potencial de hidrógeno
Masa de material particulado	Sensor SEN-0029	0 – 10	Kg
Servo Motor	PARALLAX	0 – 12	Kg
Electro Válvula	TORK	0 – 6	Bar

C. Diseño de los circuitos Eléctricos

Los circuitos eléctricos se hicieron y simularon en el Software Proteus versión 7.9 los cuales se diseñaron respecto a la tabla de sensores y actuadores. Las siguientes imágenes o esquemas se pueden observar los diseños electrónicos.

Fig.4. Etapa de Potencia

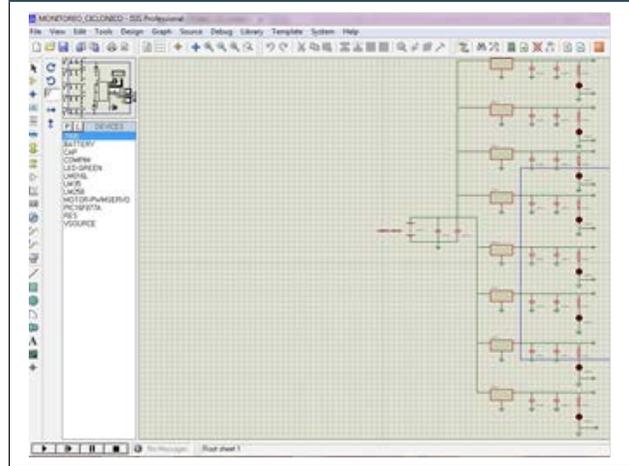
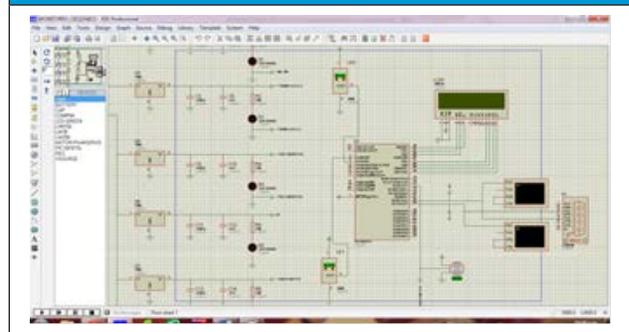


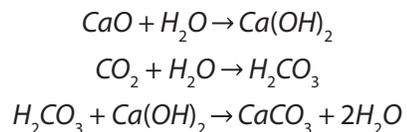
Fig.5. Etapa de Potencia



En las figuras 4 y 5 se pueden observar los circuitos y diseños. Uno de los varios componentes que se pueden observar son el servo motor, los reguladores de voltaje, la etapa de potencia, la etapa de control y la conexión rs232.

D. Reacción Química para Retención de Gases

La cadena de reacciones es considerada para el dióxido de carbono y el vapor de agua, como insumos iniciales, sin tener en cuenta los otros componentes:



$[CO_2] = 1093 \text{ ppm} = 1093 \text{ mg/litro}$ de aire. Pasando los *mg* a *mol* del bióxido carbónico: $1093 \text{ mg de } CO_2 \times \frac{1 \text{ mol}}{44 \text{ ppm}} = 24,84 \text{ mol de } CO_2$. Como 1 mol de bióxido de carbono produce 1 mol de ácido carbónico:

$24,84 \text{ mol de } H_2O = 24,84 \text{ mol de } H_2CO_3$ Calculando la cantidad de $Ca(OH)_2$ que se necesita para neutralizar el ácido teniendo en cuenta que según la reacción: 1 mol del ácido reacciona con 1 mol de la base: $24,84 \text{ mol de } H_2CO_3$ reaccionan con $24,84 \text{ mol de } Ca(OH)_2$; Pasando las moles de la base y del ácido a *mg*: $24,84 \text{ mol de } Ca(OH)_2 \times 74 \text{ mg/1mol} = 1838,16 \text{ mg de } Ca(OH)_2$ $24,84 \text{ mol de } H_2CO_3 \times \frac{62 \text{ mg}}{1 \text{ mol}} = 1512,8 \text{ mg de } H_2CO_3$ 1 mol de CO_2 reacciona con 1 mol de H_2O ; luego 44 mg de CO_2 reaccionan con 18 mg de H_2O , entonces: $1093 \text{ mg de } CO_2 \times \frac{18 \text{ mg de } H_2O}{44 \text{ mg de } CO_2} = 447,14 \text{ mg de } H_2O$.

En conclusión $1093 \text{ mg de } CO_2$ reaccionan con $447,14 \text{ mg de } H_2O$.

Para obtener esta cantidad de base es necesario saber que de acuerdo con la reacción: 1 mol de base se forma a partir de 1 mol de cal viva CaO (óxido de calcio) por tanto:

$24,84 \text{ mol de } Ca(OH)_2$ se producen a partir de $24,84 \text{ mol de } CaO$ Se convierten las moles de CaO a *mg*: $24,84 \text{ mol de } CaO \times 56 \text{ mg/1mol} = 1391,04 \text{ mg de } CaO$ Como 1 mol de CaO reaccionan con 1 mol de H_2O : $56 \text{ mg de } CaO$ reaccionan con $18 \text{ mg de } H_2O$. Luego miramos la cantidad de agua que se necesita para la formación de la base: $1391,04 \text{ mg de } CaO \times \frac{18 \text{ mg de } H_2O}{56 \text{ mg de } CaO} = 447,12 \text{ mg de agua}$. En conclusión para la formación de la base es necesario hacer reaccionar $1391,04 \text{ mg de } CaO$ con $447,12 \text{ mg de agua}$ El ciclón tiene una capacidad de 3 litros de la solución básica. Para la formación del ácido se necesitan $447,14 \text{ mg de } H_2$ y para la formación de la base $447,12 \text{ mg de } H_2O$, para un total de $894,26 \text{ mg de } H_2O$.

Por tanto la solución básica se debe formar a partir de $1391,04 \text{ ppm de } CaO$ lo que significa que se deben utilizar $4173,14 \text{ mg de } CaO$ en 3 litros de agua según la capacidad del ciclón.

E. Transmisión de datos e Interface con el Computador

El dispositivo principal para interactuar con los sensores es la tarjeta programable Arduino UNO. Cada sensor tiene un circuito especial de adecuación para transferir la información a las entradas análogas de la tarjeta y ésta dispone de salidas para controlar actuadores. Debido a las condiciones de operación, principalmente la alta temperatura, se hizo necesario establecer un mecanismo de transmisión inalámbrico para que los datos recolectados y las señales de control fueran enviados sin contacto físico ni cercanía entre la zona de operación y el equipo de cómputo encargado del procesamiento.

Para la transmisión inalámbrica se utilizaron módulos X-BEE que implantan el protocolo ZIGBEE [16]. En el prototipo se instalaron los sensores, el sistema de apertura de salida de partículas y la tarjeta Arduino en una cabina con aislamiento térmico (Figura 5). La figura 4, muestra los elementos utilizados a nivel electrónico para las operaciones de registro y control.

Adicionalmente, también se incluyó un módulo X-BEE para la transferencia de datos desde el módulo en el prototipo hacia el computador. El módulo inalámbrico se configuró para una comunicación half-duplex, lo que permitió recibir y enviar información desde y hacia el computador.

F. Diseño de la Interface Gráfica

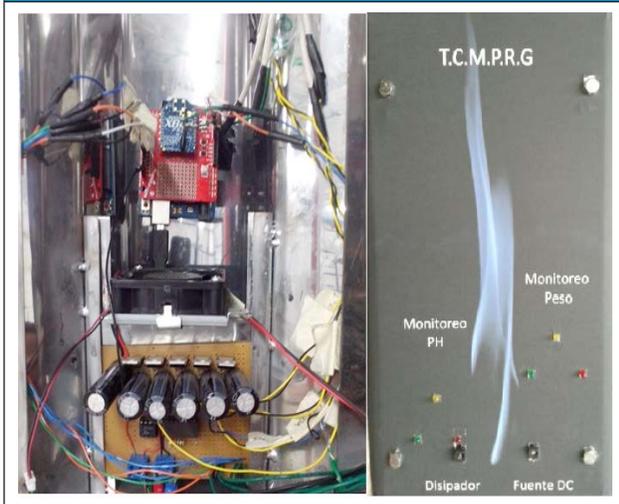
Se utilizó la herramienta GUI de MATLAB que permite diseñar interfaces con todos los elementos típicos de una interface gráfica. Se incluyó el registro gráfico de cada una de las variables medidas en función del tiempo. De igual forma se configuró el código para que cada medición se guardara como un archivo compatible con EXCEL.

La ventana con la que interactuaba el usuario, contiene botones para iniciar la medición, seleccionar el puerto serial por el que se efectuaba la transmisión. Se incluyó la posibilidad de configurar opciones de calibración de sensores, ajuste del factor de escala de los mismos y la selección de la entrada análoga donde se requiera conectar un sensor particular (Figura 6).

Fig. 6. Dispositivos utilizados para monitorizar la operación del prototipo de purificador ciclónico.



Fig. 7. Distribución física de sensores, actuadores y la tarjeta programable Arduino UNO en una cabina protegida de las altas temperaturas de los gases emitidos por la chimenea.



Finalmente se realizó una prueba de campo en la planta de coquización de la empresa FRANCOAL en Samacá. La prueba permitió evaluar el desempeño del prototipo.

Pasos para la Construcción del Código de Programación:

Fig. 8. Apariencia de la interface gráfica para manejar el registro y control de la operación del purificador ciclónico mediante la herramienta GUI de Matlab.



La información se procesó de la siguiente manera:

- Lecturas análogas de los sensores acondicionadas mediante circuitos de filtrado y amplificación, recibidas en las entradas análogas de la tarjeta programable.
- Código abierto residente en la tarjeta Arduino UNO para manejar la transferencia de datos entre los sensores y la tarjeta así como una señal de activación proveniente desde el equipo para accionar el electroimán encargado de la apertura de la tapa móvil en el fondo de la tolva de recolección al llegar a un límite determinado de masa de material particulado.
- Módulos X-BEE conectados y configurados en modo transparente tanto en el circuito en la cabina del prototipo como en el computador que procesaba la información.
- Código en el entorno MATLAB encargado de organizar los datos enviados desde el prototipo en matrices donde cada columna corresponde a una variable, incluida el tiempo, y cada fila es la medición de los datos adquiridos en un intervalo de muestreo. La interface gráfica desarrollada en Matlab, incorpora los datos y los muestra en la ventana que se ve en la figura 6. Además, se agregó código para activar la señal de apertura de compuerta y de nivel de pH, por fuera del rango deseado.
- El sistema de control para mantener el pH de la solución química en la etapa de tratamiento de gases compara la lectura actual de potencial de

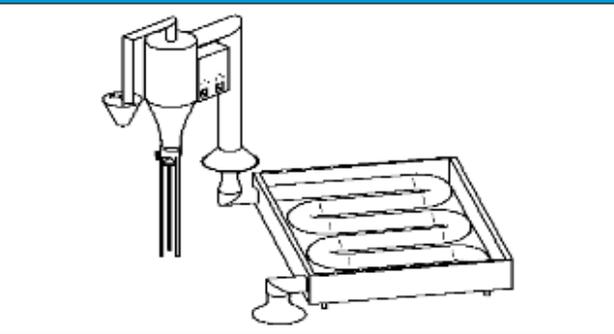
hidrógeno con el valor de consigna (7.0) para liberar o retener una solución alcalina al tanque de tratamiento. El tipo de control fue Todo/Nada.

II. MEJORAS

A. Diseño de la Estructura del Prototipo

La práctica aplicada del prototipo permitió observar inconvenientes y daños que se presentaron en los circuitos y sensores empleados, debido a las altas temperaturas a que eran sometidos, por lo cual se incorporó un sistema de refrigeración. En la figura 7 se puede observar la estructura final.

Fig. 9. Diseño Final en 3D del ciclón separador de PM y Tratamiento de Gases.



En la siguiente imagen se puede observar el prototipo construido con el sistema de refrigeración a escala, apto para un horno de coquización de 43m³.

Fig. 10. Construcción final del ciclón separador de PM, Tratamiento de Gases y sistema de refrigeración.



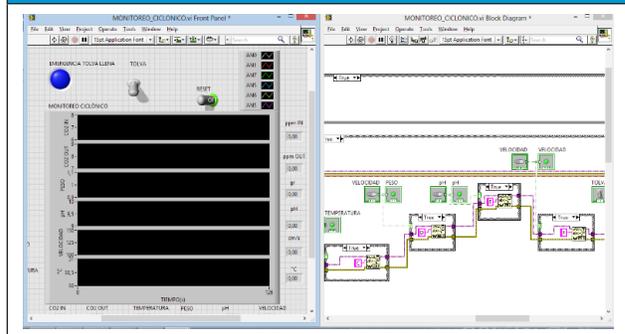
B. Diseño de la Interface Gráfica

Se mejoró esta parte con el uso de un software llamado Labview donde se desarrollo una interface más asequible para poder monitorear y visualizar el comportamiento de las variables en el proceso interno del ciclón, también se puede usar los actuadores de forma manual o automáticos.

La interface se puede controlar y visualizar con un ordenador remoto o dispositivo android que tenga acceso a internet.

El dispositivo de control que se implemento para hacer la interfaz con el entorno gráfico fue el microcontrolador Pic 18F4550 con transmisión y recepción de datos por vía inalámbrica gracias a los módulos Xbee.

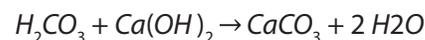
Fig. 11. Interface Gráfica Final de Usuario Labview.



III. RESULTADOS

Los diseños se concretaron en un prototipo que se puso en funcionamiento recibiendo el flujo de gases de la boquilla del horno de coquización (Figura 10). Los registros en computador expuestos en la interface gráfica mostraron que la concentración de CO₂ a la entrada fue de 568ppm y a la salida de 10,567ppm, es decir, el dióxido de carbono removido alcanzó el 97,8%.

Por su parte, en la etapa de tratamiento de gases, la solución química reacciono produciendo cal disuelta en agua. Es decir:



En la tolva de recolección se recogieron 498 g de partículas sólidas de diferentes tamaños. No se realizó estudio microscópico del material.

Fig. 12. Purificador ciclónico operando sobre el flujo emitido por una chimenea en un horno de coquización.



Se registró que el flujo de salida del purificador en el tubo que llevaba hacia el tanque, presentaba una velocidad de 12 m/s . El prototipo estuvo funcionando por 20 minutos alcanzando una temperatura máxima de 680°C . Los valores representan la temperatura del flujo de emisiones que ingresa al purificador al recorrer alrededor de 2m del ducto de entrada. No se instalaron termopares para chequear la temperatura de la cobertura metálica externa.

Los datos recolectados fueron guardados en formato digital acumulando más de 1500 registros que mostraron que la operación del prototipo durante el tiempo de prueba está sometida a condiciones relativamente estables en todas las variables medidas.

IV. CONCLUSIONES

Debido a la presencia del tanque con la solución química justo en el camino de salida del flujo de gases, la eficiencia del prototipo alcanza el 97,8%. La razón es que el porcentaje de material particulado que sale con el flujo central en el ducto superior entra en contacto con la solución siendo atrapada por el agua de la misma. Al humedecerse una partícula se precipita al fondo del contenedor en vez de es-

parcarse en la atmósfera. La adición del tanque con solución acuosa de óxido de calcio a la salida del prototipo ha representado un valor agregado al llevar a la remoción total de material particulado del flujo de salida.

Es necesario en futuros diseños calcular la dimensión precisa de los conductos de salida para evitar que el 2,2% de la emisión pase a la atmósfera.

La transferencia de calor por conducción se redujo desde el gas hacia la estructura metálica mediante la aplicación de un sistema de refrigeración.

REFERENCIAS

- [1] O. A. Bellón Hernández y D. M. Benítez Ramírez, «Tecnificación de equipos de control y monitorización de material particulado para mejorar la calidad del aire en zonas de explotación y coquización de carbón en Boyacá», en Memorias del II Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automática, Bogotá, Colombia, 2013, pp. 153-162.
- [2] D. M. Benítez y A. Ramos, «Estructuración de un programa de reducción de la contaminación del aire en el municipio de Samacá como insumo para la elaboración del diagnóstico y declaración de área fuente de contaminación de aire». CORPOBOYACA - Universidad de Boyacá, 2012.
- [3] Alcaldía de Samacá, «Plan de Desarrollo Municipal 2012 - 2015. : "Comprometidos con Samacá"». Salamandra Grupo Creativo, 2012.
- [4] J. Benavides y J. Rosso, «Propuesta de Estructura para la Minería de Carbón en Boyacá», presentado en Congreso Nacional de Minería, Paipa, Boyacá, 2012.
- [5] M. G. Corradine, «Proyecto reactivación de unidades artesanales para menores extrabajadores de la minería del carbón en Boyacá. Primer informe de avance. / Artesanías de Colombia», D1199970.pdf, dic. 1999.
- [6] A. M. Peláez, «UNPeriodico: En Boyacá, minería de carbón sofoca las aguas», 10-dic-2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/en-boyaca-mineria-de-carbon-sofoca-las-aguas.html>. [Accedido: 13-jun-2013].
- [7] A. Parker, Contaminación del aire por la industria. Reverte, 1983.
- [8] «Insisten en cierre de minas en Samacá», El Diario, 01-feb-2013.
- [9] J. M. Ospina Díaz, F. G. Manrique Abril, y J. A. Guío Garzón, «Salud y trabajo: minería artesanal del carbón en Paipa, Colombia», Av. En Enferm., vol. 28, n.o 1, pp. 107-115, 2010.
- [10] C. A. Echeverri Londoño, «Diseño óptimo de ciclones», Rev. Ing. Univ. Medellín, vol. 5, n.o 9, pp. 123-139, jul. 2006.
- [11] H. D. Hesketh, Air Pollution Control: Traditional Hazardous Pollutants, Revised Edition. CRC Press, 1996.
- [12] «PAG8». [En línea]. Disponible en: [Envigado \(Colombia\), 21 y 22 de octubre de 2015](http://www.diqui-

</div>
<div data-bbox=)

ma.upm.es/old_diquima/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/CICLONES/PAG8.htm. [Accedido: 07-jul-2014].

[13] M. A. Díez, R. Álvarez, y C. Barriocanal, «Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking», *Int. J. Coal Geol.*, vol. 50, n.o 1-4, pp. 389-412, may 2002.

[14] S. Tao, X. Li, Y. Yang, Raymond M. Coveney, X. Lu, H. Chen, y W. Shen, «Dispersion Modeling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Combustion of Biomass and Fossil Fuels and Production of Coke in Tianjin, China», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, n.o 15, pp. 4586-4591, ago. 2006.

[15] M. Ardila, P. Triviño, y J. Torres, «RNA PARA PREDECIR MICUM DEL COQUE A PARTIR DE LA COMPOSICIÓN MACERAL DEL CARBÓN», *Rev. Latinoam. Metal. Mater.*, vol. 1, n.o 3, pp. 1355-1365, 2009.

[16] A. Elahi y A. Gschwender, *ZigBee Wireless Sensor and Control Network*. Pearson Education, 2009.