

## Flujo de gases de combustión, en el dimensionamiento de ciclones a adaptarse en tubos de escape, para el control de partículas.

Flow of combustion gases, in the dimensioning of cyclones to adapt in exhaust pipes, for the control of particles.

Álvaro Ramiro Chávez Sánchez<sup>1\*</sup>; Segundo Seijas Velásquez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Posgrado.Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II S/N

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II S/N Trujillo – Perú

\*Autor correspondiente: [alvarocs777@gmail.com](mailto:alvarocs777@gmail.com) (Chávez, A.)

Autor correspondiente: [mabesei@yahoo.com](mailto:mabesei@yahoo.com) (Seijas, S.)

---

### RESUMEN

El presente trabajo tuvo como propósito dimensionar un separador ciclónico para adaptarse en los tubos de escape de vehículos a motores diésel, según el flujo de gases de combustión, con la finalidad de disminuir las emisiones de partículas de hollín al medio ambiente, en motores con antigüedad promedio de 10 años. Se evaluó las propiedades físicas y los flujos de salida de los gases de combustión de acuerdo a la potencia del motor diésel, evaluando la eficiencia del ciclón en la captación de partículas, para ello se empleó un ciclón construido en acero inoxidable AISI 316L con diámetro 5,7cm; altura total: 20,0 cm; altura de entrada 2,85 cm. anchura de entrada al ciclón: 1,33cm. Mediante los ensayos piloto se pudo elaborar un algoritmo de programa, teniendo como variable de entrada el flujo volumétrico de gases de combustión. La velocidad máxima de los gases de combustión en la salida del tubo de escape fue de 15,2 m/s con una eficiencia de 28%.

**Palabras clave:** Gases de combustión, Dimensionamiento de ciclones, control de partículas, tubo de escape de vehículos.

---

### ABSTRACT

The purpose of this work was to design a cyclone separator to adapt in the exhaust pipes of vehicles to diesel engines, according to the flow of combustion gases, in order to reduce the emissions of soot particles to the environment, in engines with antiquity average of 10 years. The physical properties and the outflows of the combustion gases were evaluated according to the power of the diesel engine, evaluating the efficiency of the cyclone in the capture of particles, for this a cyclone was used constructed in stainless steel AISI 316L with diameter 5, 7cm; Overall height: 20,0 cm; height of entrance 2,85 cm. width of entrance to the cyclone: 1,33cm. Through the pilot tests it was possible to develop a program algorithm having as input variable the volumetric flow of combustion gases. The maximum speed of the combustion gases at the outlet of the exhaust pipe was 15,2 m / s with an efficiency of 28%.

**Keywords:** Combustion gases, Cyclone sizing, particle control, vehicle exhaust pipe

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Un gran problema que afronta la sociedad actual, es sin duda el problema de la contaminación ambiental que está alterando las condiciones de vida del mundo en que vivimos. Los niveles de contaminación atmosférica de las principales ciudades de nuestro país, y en especial la ciudad de Trujillo, está asociado con el incremento del parque automotor y la congestión vehicular que en ellas se produce (Villanueva, 2014.).

La libre importación de vehículos usados que tuvo vigencia por más de 10 años en nuestro país, trajo consigo un vertiginoso crecimiento del parque automotor. La mayoría de estos vehículos, procedentes de países desarrollados como el Japón vinieron equipados con motores que tenían altos índices de desgastes y con ello altos niveles de producción de emisiones contaminantes. En Japón, la existencia de normas drásticas de control de contaminación ambiental, y la existencia de impuestos a los vehículos contaminantes, convertían en chatarra estos vehículos que eran sacados de circulación por haber cumplido el tiempo límite de vida útil, e incluso antes de cumplirla, por los altos costos en impuestos que implicaba su circulación. Todo esto

propició la creación de un gran negocio de importación de vehículos usados, convirtiendo a nuestro país en un inmenso depósito de vehículos contaminantes, que sumado a la ya existencia de un parque automotor obsoleto, trajo consigo que el parque automotor hoy por hoy sea uno de los factores que más contribuye a la contaminación.

Dentro de este vertiginoso crecimiento del parque automotor, uno de los factores que más influye en la contaminación atmosférica de las principales ciudades de nuestro país, lo constituye los vehículos de transporte público, pues debido al trabajo continuo que realizan, éstos presentan altos índices de desgaste y por ende altos índices de emisiones contaminantes (Reyes y Valcárcel 2008).

Dentro de los principales contaminantes atmosféricos emitidos por los tubos de escape de los vehículos, podemos mencionar el dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , el monóxido de carbono  $\text{CO}$ , óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ , Óxidos de Azufre  $\text{SO}_x$ , hidrocarburos no quemados y material particulado, que son partículas sólidas en forma de hollín que dan lugar a los humos negros, pues los gases de combustión no presentan coloración, y cuyas dimensiones varían entre 0,01 a 100 micras (Morawska, *et al.*, 2004)

Pero dentro de estos contaminantes, el material particulado es el que destaca, pues éste no solo es dañino por sí mismo, sino que es dañino también por aumentar, posibilitar o coadyuvar los efectos de los otros contaminantes. Entre otras cosas, es dañino por sí mismo, porque altera la composición del aire que respiramos, alterando el clima, retarda el crecimiento de las plantas y reduce la visibilidad de los objetos pues absorbe y dispersa la luz, así mismo, también es dañino por sí mismo por sus efectos directos sobre la salud (Benítez, 1993, Morawska, *et al.*, 2004; Bernaola 2013)

El particulado entre 0,1 y 3 micras pueden burlar los mecanismos de purificación del aire del sistema respiratorio, al ser estos poco efectivos para esos tamaños, fallan tanto la filtración de los pelos nasales y de la membrana mucosa, como la filtración por difusión browniana que son los mecanismos de limpieza del aire que se respira. Así, las partículas con tamaños en ese rango de valores entran en lo más profundo de los pulmones, en los alvéolos pulmonares, bloqueando los flujos de aire y esto está relacionado epidemiológicamente con bronquitis, asma, enfisema, pulmonía y enfermedades cardíacas. Estas partículas pueden permanecer largo tiempo en los alvéolos pulmonares y ser absorbidos dentro del sistema circulatorio (Bocanegra, 2015).

El material particulado, en asociación o convergencia con otros contaminantes del aire desata una serie de fenómenos perniciosos. Sirve de transporte eficiente hacia los pulmones, de sustancias tóxicas que se adhieren o se absorben a sus superficies submicrónicas en la combustión. Tóxicos como el arsénico, cadmio, silicio, siempre presentes en pequeñas cantidades durante la combustión, así como el dióxido de azufre, son algunas de las sustancias que se depositan sobre las partículas logrando acceso al interior de los pulmones (Linares y Diaz, 2008).

En el fenómeno de las lluvias ácidas el material particulado actúa como un catalizador, favoreciendo la oxidación del  $\text{SO}_2$  para dar  $\text{SO}_3$  que deriva finalmente en ácido sulfúrico, también posibilita la condensación del vapor de agua, favoreciendo la disolución del  $\text{SO}_2$  en las gotas condensadas, donde se forma el  $\text{SO}_3$  que deriva en ácido sulfúrico y en lluvia ácida (Morawska, *et al.*, 2004)

Existen en la industria diversos equipos o aparatos de separación de material particulado, los cuales son usados en calderas, hornos, sistemas de molienda cerrados, etc. para evitar la contaminación y para separar diferentes tamaños de partículas o polvos. El tipo de separador más empleado en la industria para separación de material particulado o polvos, es el separador ciclónico, en el cual los gases cargados de polvo penetran tangencialmente en una cámara cilíndrica o cónica, por uno o varios puntos y salen por una abertura central superior, eliminando el material particulado que tiende a bajar (Sánchez 2011; Azadi y Azadi 2012; Elsayed, K., Lacor, C. 2013). Las partículas de polvo, en virtud de la inercia, tienden a moverse interiormente hacia la pared del separador ciclónico, cayendo a un receptor. Un ciclón es esencia una cámara de sedimentación, en que la separación de partículas se hace en la parte inferior de forma cónica del ciclón, mediante la acción de las fuerzas centrífuga y centrípeta. Los separadores ciclónicos ofrecen uno de los procedimientos menos costosos para separar polvos o partículas, desde su punto de vista de funcionamiento y de la inversión. (Ramírez y Ramírez, 2004), (Jiménez, et al., Claudia 2008) (Rubio y Rafael, 2014) (Lingjuan Wang, 2004).

(Rojas J. 2015). Teniendo en cuenta que los gases de combustión de motores de combustión interna de vehículos usados tienen un alto contenido de material particulado, con una velocidad conveniente por lo tanto se puede acoplar un ciclón a la salida de los tubos de escape principalmente para el caso de partículas superiores a 10 micras, puesto que las partículas de menor tamaño debido a su menor masa, pueden ser arrastradas por los gases de combustión y salir por la abertura central superior del separador ciclónico (Mantilla, *et al* 2009) (Leonel O. y Barbosa 2013).

## 2. MATERIAL Y METODOS

### 2.1 Material de Estudio

Vehículos con motor diésel con antigüedad mayor a 10 años. (CERTULL, 2014), (Ingeniería DICTUC S.A, 2007:152).

Marca: Cummins 4BT3.9 Turbo Diesel Truck Engine 140 hp (2010).

La población que comprendió el estudio, estuvo orientado para el distrito de Trujillo y alrededores; considerando los microbuses petroleros con más de 10 años de antigüedad.

La muestra representativa, lo constituyo 04 microbuses petroleros de servicio público que circulan por la ciudad de Trujillo y alrededores, para ello se tomó muestras de emisiones de gases de combustión, mediante muestreo por conveniencia, midiendo la concentración de material particulado.

Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia considerando un valor de  $Z = 1,96$ ; una significancia ( $\alpha$ ) de 5 % y una confianza  $(1-\alpha)$  del 95 %;  $T =$  error de estimación igual al 5%.

### 2.2 Métodos y Técnicas.

Se empleó el diseño experimental de tipo factorial con una matriz de:  $4^1$ , considerando la variable independiente: flujo de gases de combustión, con tres replicas por cada ensayo; obteniendo el valor promedio del flujo de gases, temperatura y densidad del material particulado empleando el Método gravimétrico de referencia, datos necesarios para dimensionar el ciclón ,estableciendo relación matemática entre potencia del motor y el flujo de gases emitidos para finalmente elaborar software para el dimensionamiento del ciclón.

### 2.3 Procedimiento

Se efectuó los ajustes de operación en el motor de prueba y se procedió a la ejecución experimental, determinando el caudal promedio y la velocidad promedio de los gases de combustión en la salida del tubo de escape, lo cual nos permitió realizar los cálculos para obtener los parámetros de diseño obteniendo modelos matemáticos que nos permita finalmente elaborar un programa computarizado en JAVA, y con ello construir un separador ciclónico de mayor eficiencia de captación de partículas, teniendo en cuenta un rango de velocidades de 6 a 21 m/s. (Echeverri 2006).

La concentración de material particulado por unidad de tiempo, el cual constituyó el flujo másico que ingresa al ciclón, se determinó mediante el equipo de retención de material particulado Hi-Vol, determinándose el peso de material particulado captado en cada caso. La eficiencia de retención, será determinada en base al cociente de masa de material particulado captado y la masa de material particulado que ingresa al separador ciclónico. El separador ciclónico de mayor eficiencia, sirvió para determinar el dimensionamiento óptimo.

### 2.4 Equipos e instrumentos

- Analizador de gases de combustión KIGAZ 150. SAUERMANN IBÉRICA PUMPS AND INSTRUMENTS, S.L.U.
- Caudalímetro tipo turbina CONTAFLOW; con cabezal de lectura, 2"Ø NPT

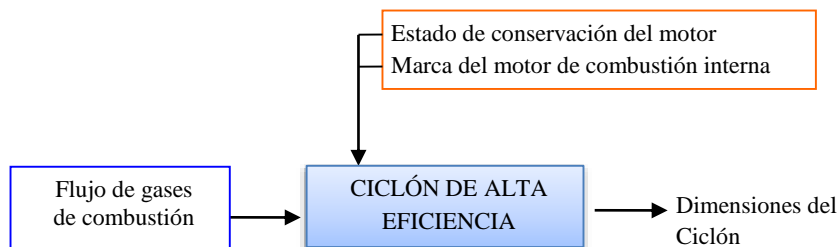


Figura 1. Esquema del experimental para determinar el flujo de gases de Combustión en el dimensionamiento del ciclón

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Tabla 1.** Composición promedio de los gases de combustión provenientes del motor diésel usado

Componente	Composición	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Promedio $\Sigma$ (kg/m <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub>	0,0897	1,1770	0,1053
CO	0,0997	0,9700	0,0967
H <sub>2</sub> O	0,0401	0,9000	0,0361
NO <sub>x</sub>	0,7705	0,8100	0,6241
	1,000		0,8622
Material particulado total		1,06g/m <sup>3</sup>	840,00

**Tabla 2.** Propiedades físicas de los gases de combustión provenientes del motor diésel usado

Motor Cummings 4BT3.9 Turbo Diesel Truck Engine 140 hp.

Propiedades del flujo de gases de combustión	Valor promedio
Temperatura de salida	185°C
Densidad	0,8622 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	0,00002385 Pa.s
Densidad promedio del material particulado ( Hollín)	840,00 kg/m <sup>3</sup>

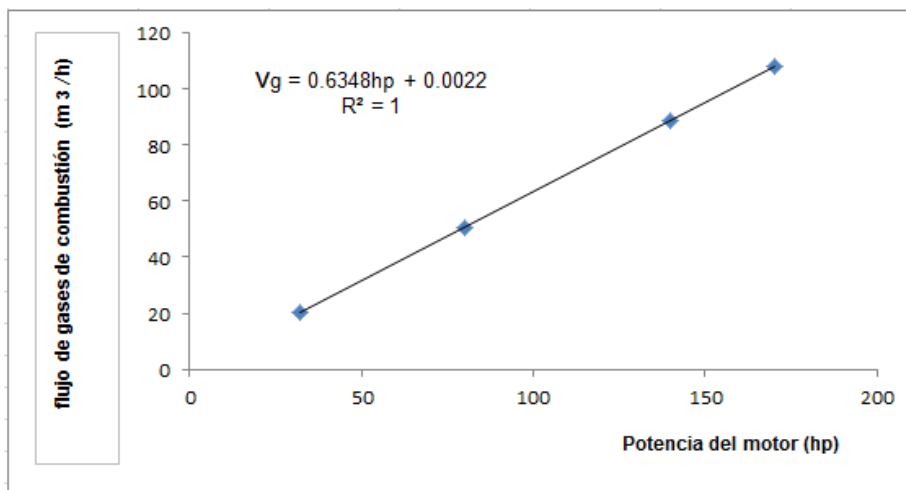
**Tabla 3.** Flujo y temperatura de gases de combustión a la salida por el tubo de escape

Motor diésel: 140 hp (año: 2008)

Tiempo de funcionamiento del motor (min)	Flujo de gases promedio (m <sup>3</sup> /min )	Temperatura de los gases de combustión (°C)
8	1,48	175
12	1,40	185
15	1,25	185
20	1,25	185

**Tabla 4.** Flujo de gases de combustión en función de la potencia del motor

Potencia del motor (hp)	Flujo de gases promedio (Vg: m <sup>3</sup> /h )	Flujo másico de gases promedio (m <sub>g</sub> : kg/h)
32	20,316	17,52
80	50,784	43,80
140	88,872	76,63
170	107,916	93,05



**Figura 2.** Flujo de gases de combustión a la salida por el tubo de escape según la potencia del motor

**Tabla 5.** Determinación del diámetro, dimensiones de entrada y eficiencia del ciclón a partir del flujo de gases de combustión

Flujo de gases (m³/h)	Altura de entrada al ciclón (m)	Anchura de entrada al ciclón (m)	Diámetro del cilindro (m)	Eficiencia (%)
20,316	0,0200	0,0185	0,0400	17,60
50,784	0,0320	0,0290	0,0631	26,60
88,872	0,0417	0,0390	0,0834	28,0
107,916	0,0460	0,0430	0,0920	28,20

Calculo de las dimensiones empleando todas las relaciones de Stairmand (Pico y Barbosa, 2013) para lo cual recomienda los siguientes ratios:

H = Altura de entrada del ciclón = 0,5 DCN

W = Anchura de entrada del ciclón = 0,4674 DCN

L = Longitud total del cilindro del ciclón = 3,5 DCN

D<sub>e</sub> = Diámetro de salida del gas = 0,5 DCN

D<sub>d</sub> = Diámetro de salida del material particulado = 0,2 DCN

DCN = Diámetro del ciclón

Según Echeverri (2006) la velocidad de gases a la entrada de un ciclón debe estar entre 15.2 a 27.4 m/s.

#### Cálculo de la contra presión en el tubo de escape

Se debe considerar que la contra - presión producida por los gases de escape al salir del motor no alcance el límite impuesto por el fabricante del motor.

$$P = \frac{6,32 (L \times Q^2)}{(D^5) (T+273)} \tag{1}$$

P: Contra presión en la tubería de escape de gases de combustión en Pa.

L: Longitud total de la tubería recta en m

Q: Caudal de gases de combustión en m³/s

D: Diámetro del tubo de escape en m

T: temperatura de los gases de escape = 185 °C

Para emplear el caudal de gases de combustión en función de la potencia del motor se determinó la ecuación siguiente:

$$Q = 0,0002hp - 5E-05 \text{ en m}^3/\text{s} \tag{2}$$

Reemplazando en la ecuación de contra presión:

$$P = 6,32 (L \times 0,0002hp - 5E-05)^2 / (D^5) (185+273)$$

$$P = 0,0138 (L \times 0,0002 \text{ hp} - 5E-05)^2 / (D^5)$$

**Cálculo de la Velocidad equivalente:**

$$V_e = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho_g)}{3 \times \rho^2}} \tag{3}$$

La corriente gaseosa son gases de combustión a 185°C

Densidad ( $\rho$ ):  $\rho = 0,8622 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad ( $\mu$ ):  $\mu = 0,00002385 \text{ kg/ms}$

$$V_e = 3 \sqrt{\frac{4 \times 9,8 \times 0,00002385 \times (840 - 0,8622)}{3 \times 0,8622^2}} = 0,7059 \text{ m/s}$$

**Número de cabezas de velocidad (NH), para familias de ciclones.**

$$NH = K \times \frac{a \times b}{D_s^2} \quad NH = 16 \times \frac{0,6 \times 0,24}{0,6^2} = 6,4 \tag{4}$$

**Cálculo de la Velocidad de Saltación:**

Para el diseño de ciclones es importante evaluar la velocidad de entrada, pues constituye un parámetro fundamental. Velocidades muy bajas producirían sedimentación de partículas al reducirse el efecto de la fuerza centrífuga, reduciéndose la eficiencia de recolección. Velocidades muy altas pueden re-suspender partículas previamente colectadas, disminuyendo también la eficiencia. La experiencia indica que la velocidad de entrada al ciclón debe situarse en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. (Echeverri L, 2006).

Echeverri L, (2006) indica que los estudios de Kalen y Zenz propusieron la existencia de una “velocidad de saltación” en el ciclón para explicar por qué la eficiencia de colección algunas veces descendía con incrementos en la velocidad de entrada. De lo anterior se puede observar que lo ideal es trabajar con velocidades de entrada lo suficientemente altas para aprovechar el efecto de la aceleración centrífuga, sin sobrepasar la velocidad que implica re-suspensión del material ya colectado.

$$V_S = \frac{4,913 \times W \times K_b^{0,4} \times D_c^{0,067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K_b}} \tag{5}$$

- $V_i = 15,2 \text{ m/s}$
- $K_b = \frac{H}{DCN} = 0,5$
- $V_e = 0,7059 \text{ m/s}$
- $DCN = 0,092 \text{ m}$

Reemplazando datos:  $V_S = \frac{4,913 \times 0,7059 \times 0,5^{0,4} \times 0,092^{0,067} \times \sqrt[3]{15,2^2}}{\sqrt[3]{1 - 0,5}} = 22,84 \text{ m/s}$

Relación entre velocidades:  $\frac{V_i}{V_s} = \frac{15,2}{22,84} = 0,6655 \text{ m/s}$

Como  $0,6655 < 1,35$ , no hay suspensión del material particulado.

**Cálculo de la caída de presión**

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times V_i^2 \times NH \tag{6}$$

$\rho = 0,8622 \text{ kg/m}^3$

$V_i = 15,2 \text{ m/s}$

$NH = 6,4$  Relación de Stairmand, (Pico y Barbosa 2013)

Reemplazando valores:  $\Delta P = \frac{1}{2} \times 0,8622 \times 15,2^2 \times 6,4 = 637,45 \text{ Pa}$

$$\Delta P = 637,45 \text{ Pa} = 2,54 \text{ PulgH}_2\text{O}.$$

$\Delta P$  = Caída de presión en el ciclón: Pa.

$\rho$  = Densidad del gas portador:  $\text{kg/m}^3$ .

$V_i$  = Velocidad de entrada del gas en el ciclón: m/s.

NH = Número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón.

El valor de NH es común para cada familia de ciclones.

La pérdida de presión en un ciclón depende del cuadrado de la velocidad de entrada, por lo tanto, a mayor velocidad de entrada mayor pérdida de presión; lo anterior implica en la práctica el sacrificar un poco de eficiencia para disminuir los requerimientos de energía.

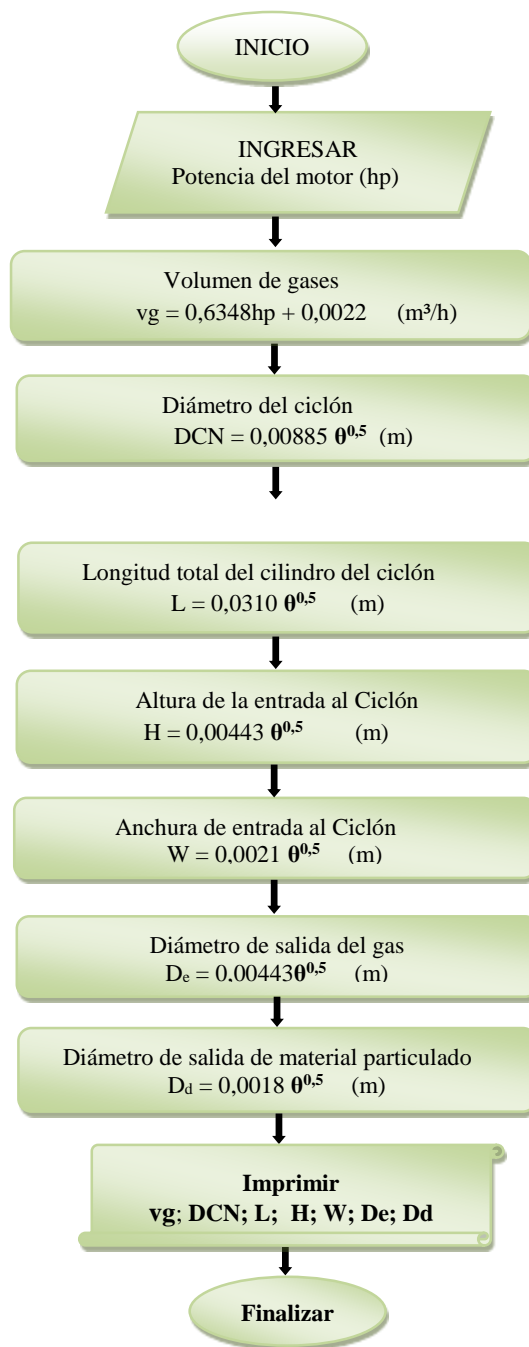


Figura 3. Algoritmo para dimensionar el separador ciclónico óptimo.



Figura 4. Software para dimensionar ciclón acoplado a tubos de escape de vehículos diésel usados

La composición de los gases de combustión provenientes de un motor diésel con antigüedad mayor a 10 años, muestra un alto contenido de material particulado. (Tabla 3.1) Se determinó un valor promedio de 1,06g / m<sup>3</sup>, valor 10 veces mayor a los emitidos por vehículos cero kilómetros de similares características (Morawska, et al. 2004; Bernaola 2013). Se evaluaron vehículos con promedio de 10 años de antigüedad teniendo en cuenta que en Trujillo están registradas 37 empresas de micros y combis de servicio de transporte público (CERTULL, 2014) y que sobrepasan los 30 años de antigüedad, además de tener en cuenta que en los primeros años de uso los vehículos presentan un mayor desgaste, tal como determinaron los estudios de Servicios de Ingeniería que los vehículos de más de nueve años de antigüedad se deterioraron los primeros nueve años a una tasa constante y los años posteriores la tasa se consideró como despreciable, es decir cero, (Ingeniería DICTUC S.A,2007). Teniendo en cuenta la relación deterioro – emisiones para motores diésel, se puede identificar los principales componentes que al deteriorarse causarán un efecto negativo en la formación de emisiones dentro de él. En primer lugar el deterioro del sistema de admisión de aire puede ser causado debido a desgaste de las uniones en las tuberías o sellos el cual generaría que el flujo de aire no atravesase el filtro. Aire no filtrado generará que material particulado entre a la cámara de combustión aumentando emisiones de MP. Sin embargo, cuando es un motor turbo cargado, el desgaste en el turbocompresor tal como daños en las hélices, o desajustes de estas por el tiempo de uso puede causar poca elevación de la masa de aire creando una mezcla más rica en combustible. Además la turbulencia disminuirá, reduciendo la calidad de la mezcla restante y una menor compresión del motor. Esto genera que la potencia disminuya aumentando el consumo de combustible, por la mayor inyección de combustible (Sánchez, 2011).

La evaluación del flujo y temperatura de los gases de combustión a la salida del tubo de escape en motores diésel se efectuaron después de 15 minutos, teniendo en cuenta que en 10 segundos a ralentí el motor se calienta, ello se hace para asegurar de que la bomba del aceite ha tenido tiempo suficiente para que el aceite haya comenzado a lubricar todo el motor, sin superar las 2500/3000 rpm hasta que el indicador de temperatura del motor de la instrumentación marque su temperatura normal aproximadamente 90°C. En la Tabla 3.3 se observa que a partir de los 15 minutos se estabiliza la temperatura de salida de los gases de escape en 185°C y un flujo de gases de 1,25m<sup>3</sup> / min. Tanto la temperatura de los gases de escape como el flujo de material particulado, denotan un motor con cierto desgaste teniendo en cuenta que la temperatura normal no supera los 140°C. La mayor proporción de material particulado se presenta a un régimen entre 2000- 3000 rpm a una presión media efectiva de 3bar (Reyes y Valcárcel, 2008).

La Tabla 3.4 muestra el flujo de gases de combustión en función de la potencia del motor; donde se evaluaron 4 vehículos del mismo año de fabricación y marca, de diferente potencia, y mediante el programa EXCEL se determinó una relación del volumen de gases de escape en función de la potencia del motor:  $V_g = 0,6348hp + 0,0022$  en m<sup>3</sup>/h

Rubio (2014) en su tesis de doctorado: “Determinación de la distribución de tamaño y número de partículas provenientes de motores diésel operando en tráfico real con equipos embarcados”; evaluó un motor de 140



hp con emisiones de  $1,40 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $84,0 \text{ m}^3/\text{h}$ ), que al reemplazar en la ecuación para 140hp se determina un valor de  $88,87 \text{ m}^3/\text{h}$ ; valores muy cercanos a los evaluados por el autor, determinándose partículas finas en el orden de  $0,1$  a  $2,5 \mu\text{m}$ .

Para el diseño del ciclón se emplearon las consideraciones de Stairmand para ciclones de alta eficiencia, determinando su diámetro, dimensiones de entrada y la eficiencia del ciclón a partir del flujo de gases de combustión (Tabla 3.5). La máxima eficiencia obtenida en la captación del material particulado fue de 28,20%. Esta baja eficiencia se debe al tamaño de partículas del hollín emitido por los tubos de escape, comparados con los resultados efectuados de Echeverri, 2006, que determinó los intervalos de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones, donde se observa una eficiencia comprendida entre 60 a 95% para MP10, mientras que para un tamaño de partícula de MP2,5; la eficiencia está comprendida entre 20 a 70%.

#### 4. CONCLUSIONES

La temperatura de los gases de escape de motores diésel con tiempo de operación promedio de 10 años, superan la temperatura de  $140^\circ\text{C}$ , debido a una combustión incompleta, dando como resultado una menor eficiencia y mayor emisión de material particulado. (Inquemados sólidos).

El flujo de gases de combustión y la concentración de material particulado, puede determinarse en función de la potencia del motor diésel, estableciéndose una relación directa entre ambas variables.

El material particulado contenido en los gases de combustión tiene tamaño variable y una concentración promedio de  $1060 \mu\text{g}/\text{m}^3$  superando el valor máximo permisible en el aire establecido por D.S. N° 003-2008-MINAM en  $50 \mu\text{m}/\text{m}^3$  para un periodo de 24 horas y vigente desde el año 2010.

Se justifica el empleo de un ciclón acoplado al extremo del tubo de escape de un vehículo con motor diésel y antigüedad mayor a 10 años, a fin de captar el material particulado principalmente de tamaño mayor a  $2,5 \mu\text{m}$ .

El diseño del ciclón puede determinarse de acuerdo a las relaciones de Stairmand, para ciclones de alta eficiencia, mediante el programa computarizado, ingresando la potencia del motor diésel, considerando la velocidad de gases de escape de  $15 \text{ m/s}$ . La eficiencia del ciclón depende del tamaño de partícula, determinándose un mínimo de eficiencia de 28%.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azadi y Azadi. 2012. An analytical study of the effect of inlet velocity on the cyclone performance using mathematical models. *Powder Technology*, 217.
- Benitez, Jaime. 1993. *Process engineering and design for air pollution control*. Inc. Englewood Cliffs. Editorial Prentice Hall. New Jersey, USA. 446 pp.
- Bernaola 2013 Aplicación de métodos simplificados de evaluación del riesgo químico con efectos para la salud, Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. INSHT: 46-50. NIPO 211-08-008-1
- Bocanegra, C.A. 2015. Contaminación Atmosférica. – “Impactos e Indicadores Ambientales en la Ciudad de Trujillo”. Vol. 1: 74-79.
- Echeverri 2006. Diseño óptimo de ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín Print version ISSN 1692-3324. vol.5 no.9 Medellín*
- Elsayed, K., Lacor, C. 2013. The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES, *Computers & Fluids*, 71: 224–239.
- Ingeniería DICTUC S.A 2007. DIVISIÓN DE MEDIO AMBIENTE CHILE, Evaluación de Nuevas Medidas de Control de Emisiones para el Sector Transporte en la Región Metropolitana: 152
- Jiménez José A; Claudia del C. Gutiérrez; Juan G. Barbosa, Luis A. Moreno 2008. Patrones de Flujo en un Sistema de Separación Ciclónico Instituto Politécnico Nacional, Vol. 19(1): 29-36.
- Leonel O. Pico y Mirta R. Barbosa 2013. Análisis de las condiciones de operación de un ciclón de alta eficiencia a través de simulación de flujo. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Mendoza. Buenos Aires.
- Linares y Díaz 2008. Efecto de las partículas de diámetro inferior a  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) sobre los ingresos hospitalarios en niños menores de 10 años en Madrid. *Gac Sanit Vol.23 N°3 versión impresa ISSN 0213-9111*
- Lingjuan Wang, May 2004. Theoretical Study of Cyclone Design. B. Eng., Anhui Institute of Finance and Trade, China.

- Mantilla, Juan Miguel; Falla, Camilo Andrés y Gómez, Jorge Arturo 2009. Simulación del flujo de gas en ductos de escape de motores de combustión interna: primera parte: aspectos teóricos. Vol.29, n.1, pp.115-125. ISSN 0120-5609.
- Martínez 2014. Precipitador electrostático. <https://prezi.com/gmcv5dsrfvht/precipitador-electrostatico>
- Morawska, Lidia, Ristovski, Zoran, Jayaratne, Rohan, Keogh, Diane U. 2004. Ambient Nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: characteristics, ambient processing and implications on human exposure. International Laboratory for Air Quality and Health, Queensland University of Technology, 2 George Street, Old 4001, Australia. Vol.5 N°.9 Medellín.
- Ramírez D y Ramírez J.2004. Los separadores ciclónicos: dimensiones de un colector ciclónico Centro de productos Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Reyes José y Valcárcel Ronmel 2008. Monitoreo de temperatura de los gases de escape del motor de combustión interna utilizando micro controlador (PIC) y asistida por PC.
- Rubio Caldera, José Rafael 2014. Determinación de la Distribución de Tamaño y Número de Partículas Provenientes de Motores Diésel. Tesis doctoral, Escuela E.T.S.I. Industriales (UPM), Ingeniería Energética y Fluido mecánica.
- Rojas J. 2015. Separador ciclónico: Simulación dinámica de un separador ciclónico cilíndrico gas-líquido GBM [www.arqueoactiva.eu](http://www.arqueoactiva.eu).
- Sánchez J. 2011. Contaminantes del aceite en los Motores Diésel I – Hollín.
- Villanueva, O. 2014. Central Regional de Transporte Urbano de la Libertad. (CERTULL)

## ANEXOS

### PROGRAMA FUENTE EN JAVA NETBEANS 8.2 PARA DETERMINAR DIMENSIONES ÓPTIMAS DEL CICLÓN

```
// Propiedades de Inicialización de la Interfaz de Dimensionamiento.
public FrmDimensiones_Ciclon() {
    initComponents();
    this.setTitle("Dimensiones del Ciclón");
    this.setLocationRelativeTo(null);
    this.setResizable(false);
    this.getContentPane().setBackground(Color.white);
}
// Operaciones del Botón Calcular
private void btnCalcularActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
    float HP = Float.parseFloat(txtEntrada.getText());
    float Vg = (float)(0,6384*HP + 0,0022);
    float DCN = (float) (0,00885 * Math.pow(Vg,0,5));
    float L = (float) (0,0310 * Math.pow(Vg,0,5));
    float H = (float) (0,00443 * Math.pow(Vg,0,5));
    float W = (float) (0,0021 * Math.pow(Vg,0,5));
    float De = (float) (0,00443 * Math.pow(Vg,0,5));
    float Dd = (float) (0,0018 * Math.pow(Vg,0,5));
    txtVg.setText("" + Vg);
    txtDCN.setText("" + DCN);
    txtL.setText("" + L);
    txtH.setText("" + H);
    txtW.setText("" + W);
    txtDe.setText("" + De);
    txtDd.setText("" + Dd);
// Operaciones del Botón Limpiar
private void btnLimpiarActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
    txtVg.setText("");
    txtEntrada.setText("");
    txtDCN.setText("");
    txtL.setText("");
    txtH.setText("");
    txtW.setText("");
    txtDe.setText("");
    txtDd.setText("");
// Operaciones del Botón Imprimir
```

```

private void btnImprimirActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
PrinterJob job = PrinterJob.getPrinterJob(); //crea un trabajo de impresion que se asocia con la impresora predeterminada
job.setPrintable(this); //Se pasa la instancia del Formulario (JFrame)
if (job.printDialog())
{
try
{ job.print();
}
catch (PrinterException ex)
{
JOptionPane.showMessageDialog(null, "No Se Logró Imprimir Por El Siguiente Motivo" + ex);
public int print(Graphics graphics, PageFormat pageFormat, int pageIndex) throws PrinterException {
if (pageIndex == 0){
Graphics2D g2d = (Graphics2D) graphics;
g2d.translate(pageFormat.getImageableX(), pageFormat.getImageableY());
g2d.scale(0.67,0.67);
this.printAll(graphics);
return PAGE_EXISTS;
}
else
return NO_SUCH_PAGE;
}
}
// Operaciones del Botón Salir
private void btnSalirActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
cerrar ();
}
public void cerrar(){
Object [] opciones ={"Aceptar","Cancelar"};
int eleccion = JOptionPane.showOptionDialog(rootPane,"En realidad desea realizar cerrar la aplicacion","Mensaje de
Confirmacion",
JOptionPane.YES_NO_OPTION,
JOptionPane.QUESTION_MESSAGE,null,opciones,"Aceptar");
if (eleccion == JOptionPane.YES_OPTION)
{
System.exit(0);
}else{
// El software no se cierra.
// Ejecución de la Interfaz Desde la Clase Principal
package ciclon;
import Formularios.FrmDimensiones_Ciclon;
public class Ciclon {
/**
* @param args the command line arguments
*/
public static void main(String[] args) {
FrmDimensiones_Ciclon obj = new FrmDimensiones_Ciclon();
obj.setVisible(true);
}
}
}

```

**TABLA A-1 MEDICIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL FLUJO DE GASES DE COMBUSTIÓN EFECTUADO EN VEHÍCULOS CON ANTIGÜEDAD PROMEDIO DE 10 AÑOS PARA DIFERENTES POTENCIAS DE MOTOR**

$x_i$	Mediciones Flujo de gases ( $m^3/h$ )	$\bar{x}$	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$\sum(x_i - \bar{x})^2$	$s^2$	s
X1	19,98	20,316	- 0,336	0,1129	0,2258	0,1129	0,3360
	20,316		0	0			
	20,652		- 0,336	0,1129			
X2	50,558	50,785	- 0,0226	0,0510	0,1021	0,05105	0,2259
	50,784		0	0			
	51,01		- 0,226	0,0510			
X3	88,844	88,872	- 0,0280	0,0008	0,0133	0,0066	0,0814
	88,844		- 0,0280	0,0008			
	88,98		0,1080	0,0117			
X4	107,812	107,916	- 0,1040	0,0108	0,0216	0,0108	0,1040
	107,916		0	0			
	108,02		0,1040	0,0108			

Dónde:

$x_i$  : Dato i que esta entre (o, n)

$\bar{x}$  : Promedio de los datos

n: Numero datos

$s^2$ : Varianza

s : Índice de dispersión

X1; X2; X3; X4: Potencia de motores Diésel