



FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI



Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica  
San Juan - Noviembre 2010

## Análisis de las variables de diseño de un ciclón de alta eficiencia para la separación y clasificación de partículas finas

Mariano Delgiorgio<sup>1</sup>, Horacio A. Petit<sup>2</sup>, Leonel O. Pico<sup>3</sup> y Mirta R. Barbosa<sup>4</sup>

<sup>1 y 3</sup> Departamento de Ingeniería Electromecánica – Facultad de Ingeniería

<sup>2 y 4</sup> Departamento de Ingeniería Química – Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Av. Del Valle 5737 – Olavarría Argentina

E-mail: [lpico@fio.unicen.edu.ar](mailto:lpico@fio.unicen.edu.ar)

E-mail: [mbarbosa@fio.unicen.edu.ar](mailto:mbarbosa@fio.unicen.edu.ar)

### RESUMEN

Los separadores ciclónicos son ampliamente utilizados en la purificación de gases y recuperación de polvo en la industria. Por otra parte, la demanda de material particulado de muy pequeño tamaño es creciente y de muy amplio y variado espectro.

En el proceso de purificación de aire se utilizan los llamados ciclones convencionales mientras que para la obtención de material con tamaño de partícula específico son más indicados los ciclones de alta eficiencia. Estos últimos están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas.

En este trabajo se diseña un ciclón de alta eficiencia de tipo Stairmand y se analiza el flujo de gas conteniendo material particulado.

La fluidodinámica involucrada en el diseño es compleja y la descripción matemática del flujo de fluidos requiere el desarrollo de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y acopladas, las cuales no tienen solución analítica exacta. En consecuencia se desarrolla un modelo para simular el flujo del fluido dentro del ciclón empleando métodos numéricos que se basan en la fluidodinámica computacional.

Se analiza la influencia de variables de diseño, tales como el diámetro del ciclón, la velocidad de entrada y la temperatura del aire sobre las eficiencias de separación fraccional y total. La resuspensión de partículas puede ser regulada por medio de la velocidad de entrada.

Por otra parte se observa que la caída de presión se incrementa cuando aumenta la velocidad de entrada, en tanto que disminuye con el aumento de la temperatura.

**Palabras Claves:** ciclones, alta eficiencia, separación de partículas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los separadores ciclónicos se emplean ampliamente en la purificación de gases y recuperación de polvo en la industria. Son esencialmente cámaras de sedimentación en las que la aceleración gravitacional se sustituye por la aceleración centrífuga. Estos equipos constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de la inversión como de la operación. Son de simple construcción dado que no presentan partes móviles, lo que facilita el mantenimiento. Se los puede fabricar en una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas y presiones de operación.

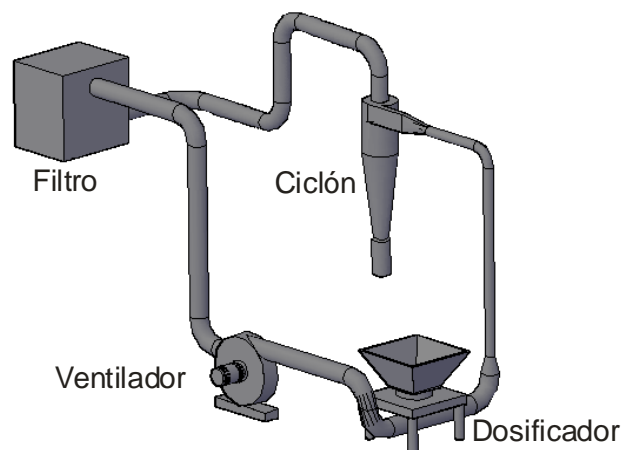
Teniendo en cuenta las proporciones de los ciclones, se los clasifica en tres grandes familias: ciclones convencionales, ciclones de alta eficiencia y ciclones de alta capacidad. La eficiencia de separación depende del tipo de ciclón utilizado.

En los sistemas de recuperación de polvo, el ciclón constituye el elemento fundamental del proceso de separación.

En este trabajo se diseña un ciclón de alta eficiencia de tipo Stairmand [1]. Se aplican y se comparan modelos matemáticos capaces de predecir la eficiencia de colección de partículas y para cada uno de ellos se estudia la influencia de las variables de operación. Por otra parte y a través del Método de Elementos Finitos se simula el flujo en el interior del mismo considerando el modelo de turbulencia Large Eddy Simulation (LES).

## 2. SISTEMA DE SEPARACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE CICLONES

El proceso de separación consta de un sistema impulsor de aire, constituido por un ventilador, un dosificador de polvo, el ciclón donde ocurre la clasificación de las partículas y el filtro para la recolección de las mismas. En la Figura 1 se esquematiza la disposición de los elementos mencionados.



*Figura 1 Esquema del sistema de separación.*

Los ciclones de alta eficiencia logran una mayor separación de partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Pueden remover partículas de  $5 \mu\text{m}$  con eficiencias de hasta 90%, pero tienen mayor caída de presión con lo que se genera una mayor demanda energética.

Los ciclones de alta capacidad pueden separar partículas de 20  $\mu\text{m}$  o mayor tamaño. La Figura 2 muestra un esquema de un ciclón de entrada tangencial. En las Tablas 1, 2 y 3 se presentan las principales características de cada familia de ciclones [1,2].

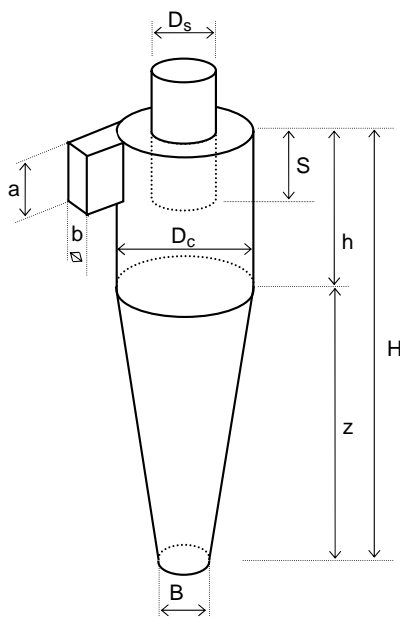


Figura 2 Esquema de un ciclón de entrada tangencial.

La eficiencia total se define como el porcentaje de la masa de partículas entrantes que es separado en el ciclón. Debido a que no existe un método teórico sencillo para su cálculo, se han desarrollado teorías basadas en el comportamiento experimental de los ciclones.

Estas teorías establecen diferentes relaciones entre la eficiencia de colección con el tamaño de las partículas, las relaciones geométricas, el caudal de gas, la temperatura de operación y su influencia sobre las propiedades del gas.

Tabla 1 Características de los ciclones convencionales [1,2]

Dimensión	Relación dimensional	Lapple	Vibco	Muschelknautz D
Diámetro del ciclón	$D_c/D_c$	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	$a/D_c$	0.5	0.4	0.5
Ancho de entrada	$b/D_c$	0.25	0.31	0.15
Altura de salida	$S/D_c$	0.625	0.433	0.9
Diámetro de salida	$D_s/D_c$	0.5	0.4	0.33
Altura de la parte cilíndrica	$h/D_c$	2.0	0.8	0.73
Altura de la parte cónica	$z/D_c$	2.0	1.72	1.68
Altura total del ciclón	$H/D_c$	4.0	2.5	2.4
Diámetro salida de polvo	$B/D_c$	0.25	0.23	0.55
Factor de configuración	G	402.88	237.99	1060.03
Número de cabezas de velocidad	NH	8.0	12.4	11.0
Número de vórtices	N	6.0	4.1	3.12

Tabla 2 Características de los ciclones de alta eficiencia [1,2]

Dimensión	Relación dimensional	Stairmand HE	Storch 4	Tengbergen C
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	1.0	0.3
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.15	0.3
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.68	0.43
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.45	0.33
Altura de la parte cilíndrica	h/Dc	1.5	3.5	0.55
Altura de la parte cónica	z/Dc	2.5	2.7	2.2
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	6.2	2.75
Diámetro salida de polvo	B/Dc	0.375	0.35	0.33
Factor de configuración	G	551.22	229.64	533.12
Número de cabezas de velocidad	NH	6.4	11.8	13.2
Número de vórtices	N	5.5	4.85	5.5

Leith y Licht proponen una teoría que predice las eficiencias de colección del material particulado teniendo en cuenta las propiedades físicas del aire cargado con partículas como así también las proporciones del ciclón [3], según la Ecuación (1).

$$\eta_i = 1 - \exp \left[ -2 \left( \frac{G T_i Q (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right] \quad (1)$$

- donde:
- $\eta_i$ : Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.
  - G: Factor de configuración del ciclón.
  - $T_i$ : Tiempo de relajación para cada partícula, en s.
  - Q: Caudal de gas, en m<sup>3</sup>/s.
  - n: Exponente del vórtice del ciclón.

Tabla 3 Características de los ciclones de alta capacidad [1,2]

Dimensión	Relación dimensional	Stairmand HF	Tengbergen B
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.75	0.85
Ancho de entrada	b/Dc	0.375	0.27
Altura de salida	S/Dc	0.875	1.06
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.75	0.53
Altura de la parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.54
Altura de la parte cónica	z/Dc	2.5	1.35
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	2.9
Diámetro salida de polvo	B/Dc	0.375	0.53
Factor de configuración	G	29.79	101.23
Número de cabezas de velocidad	NH	8.0	13.1
Número de vórtices	N	3.7	2.62

Otro modelo para estimar la eficiencia de remoción de partículas se basa en el número de giros o vórtices externos que la corriente gaseosa realiza en el interior del ciclón [2]. El número de vórtices es común para cada familia de ciclones. Las Tablas 1 a 3 muestran los valores de este número para las principales familias de ciclones.

La Ecuación (2) relaciona la eficiencia del ciclón con los parámetros y condiciones de operación:

$$\eta_i = 1 - \exp\left[\frac{-\pi N \rho_p D_p^2 V_i}{9 \mu b}\right] \quad (2)$$

donde: N: Número de giros  
 $\rho_p$ : Densidad de la partícula, en kg/m<sup>3</sup>.  
 $D_p$ : Diámetro de la partícula, en m.  
 $V_i$ : Velocidad de entrada del gas, en m/s.  
 $\mu$ : Viscosidad del gas, en Pa s.

Dirgo y Leith [4] ajustaron datos experimentales para obtener la Ecuación (3)

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{50}}{x}\right)^{6.4}} \quad (3)$$

donde x es el tamaño de la partícula y  $x_{50}$  el tamaño de partícula crítico o de corte.

Esta expresión ofrece una forma funcional de representar la curva de grado de eficiencia. Los autores indican que la Ecuación (3) describe razonablemente bien el comportamiento de la eficiencia para ciclones de laboratorio.

### 3. DISEÑO DEL CICLÓN

En este trabajo se diseña un ciclón de alta eficiencia, tipo Stairmand, para la separación de partículas de polvo de diámetro menor que 30  $\mu\text{m}$ .

Empleando una planilla de cálculo se obtuvieron las dimensiones del ciclón sobre la base de la Figura 2. Luego, ingresando como dimensión base el diámetro del ciclón y como variable principal de operación la velocidad de entrada ( $V_i$ ), se cambia el diseño original para simular otros ciclones y estudiar la influencia de los parámetros geométricos. La  $V_i$  es una variable de gran importancia dado que si es muy baja permite la sedimentación de las partículas en tanto que si es demasiado grande, puede ocasionar la resuspensión de partículas ya colectadas, con lo que disminuye la eficiencia.

Se ha definido una expresión semiempírica para la velocidad de saltación ( $V_s$ ) [5] para describir el fenómeno de la disminución de la eficiencia de recolección cuando la velocidad de entrada supera determinado valor.

$$V_s = \frac{4.913 W K_b^{0.4} D_c^{0.067} \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1-K_b}} \quad (4)$$

donde  $K_b = b/D_c$  y W es la velocidad equivalente, parámetro que depende de las propiedades del fluido y de la partícula.

Las correlaciones experimentales obtenidas por Kalen y Zenz [5] muestran que para obtener la máxima eficiencia, se debe cumplir que  $V_i = 1.25 V_s$ . Por otro lado, para que no se produzca la resuspensión del material ya recolectado, se debe respetar que  $V_i \leq 1.35 V_s$ .

#### 4. SIMULACIÓN DEL FLUJO

El campo de flujo en un ciclón corresponde a un comportamiento altamente turbulento, describiendo dos helicoides coaxiales, el externo descendente y el interno ascendente. Este flujo puede describirse matemáticamente mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Actualmente no es posible resolver de manera analítica estas ecuaciones, por lo que se recurre a una simulación del comportamiento del flujo mediante modelos numéricos de turbulencia que se implementan computacionalmente (CFD: Computational Fluid Dynamics) [6,7]. Este análisis se efectúa utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF). En particular, en este trabajo se realizaron diferentes modelos computacionales que consideran regímenes de flujo turbulento en estado transitorio y estacionario. Las mallas de elementos finitos constaron de aproximadamente 65000 elementos isoparamétricos de cuatro nodos con interpolación lineal. La Figura 3 ilustra la malla de elementos finitos empleada para la simulación computacional del flujo.

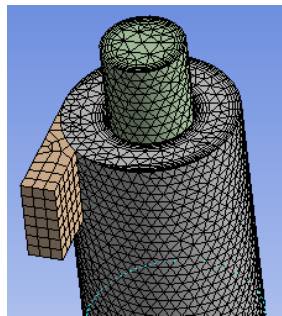


Figura 3 Malla de elementos finitos para la simulación computacional del flujo en el ciclón.

Para el análisis del comportamiento del flujo se consideró el modelo teórico de grandes remolinos (LES: Large Eddy Simulation) [1,7,8]. La CFD cuenta con una técnica llamada simulación numérica directa (DNS) que intenta resolver las ecuaciones del movimiento no estacionario en todas las escalas de flujo turbulento. Sin embargo, las diferencias en tamaño y en escala de tiempo entre los remolinos mayores y menores pueden ser de varios órdenes de magnitud. Estas soluciones demandan mallas tridimensionales muy finas y mucho tiempo de cálculo computacional. Un análisis más simplificado es la simulación de remolinos grandes (LES). La suposición básica es que los remolinos turbulentos más pequeños son isotrópicos; es decir se asume que los remolinos pequeños son independientes de la orientación del sistema de coordenadas y siempre se comportan de manera estadísticamente similar y predecible. En comparación con la DNS, el modelo LES demanda recursos computacionales considerablemente menores.

En la Figura 4 se muestra la simulación numérica del campo de velocidades obtenida por medio del MEF.

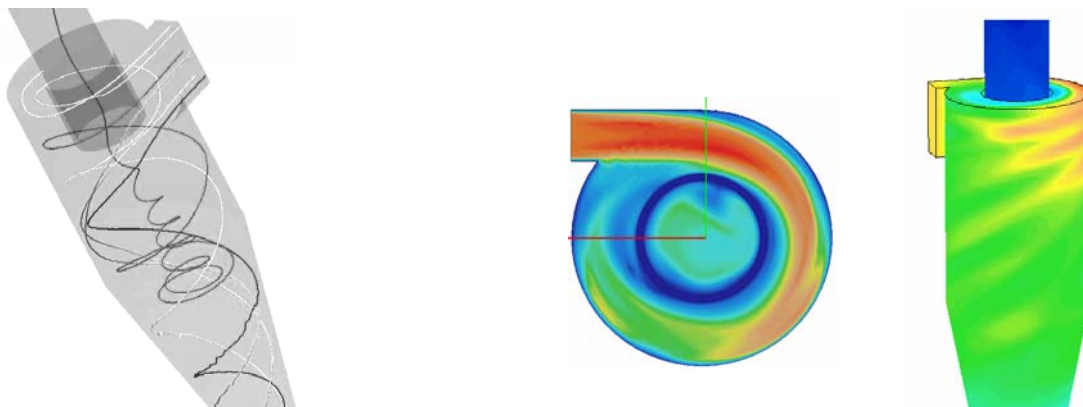


Figura 4 Distribución de velocidades de flujo en el ciclón obtenidas por medio de MEF.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5 muestra la curva granulométrica de una caliza típica de la zona de Olavarría, Provincia de Buenos Aires, la cual se utilizó en el presente desarrollo.

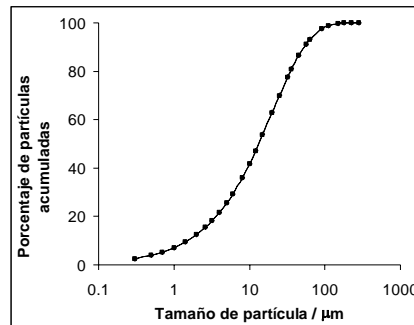


Figura 5 Curva de distribución de tamaño de la caliza utilizada.

Se emplearon las Ecuaciones (1), (2) y (3) para determinar, con cada una de ellas, la curva de grado de eficiencia de tres ciclones de alta eficiencia de tipo Stairmand, variando las velocidades de entrada y trabajando a cuatro temperaturas diferentes.

En la Figura 6 se observa la influencia de la temperatura sobre las curvas de grado de eficiencia obtenidas con un ciclón de 0.35 m de diámetro, para velocidades de entrada de 15 m/s y 19.5 m/s.

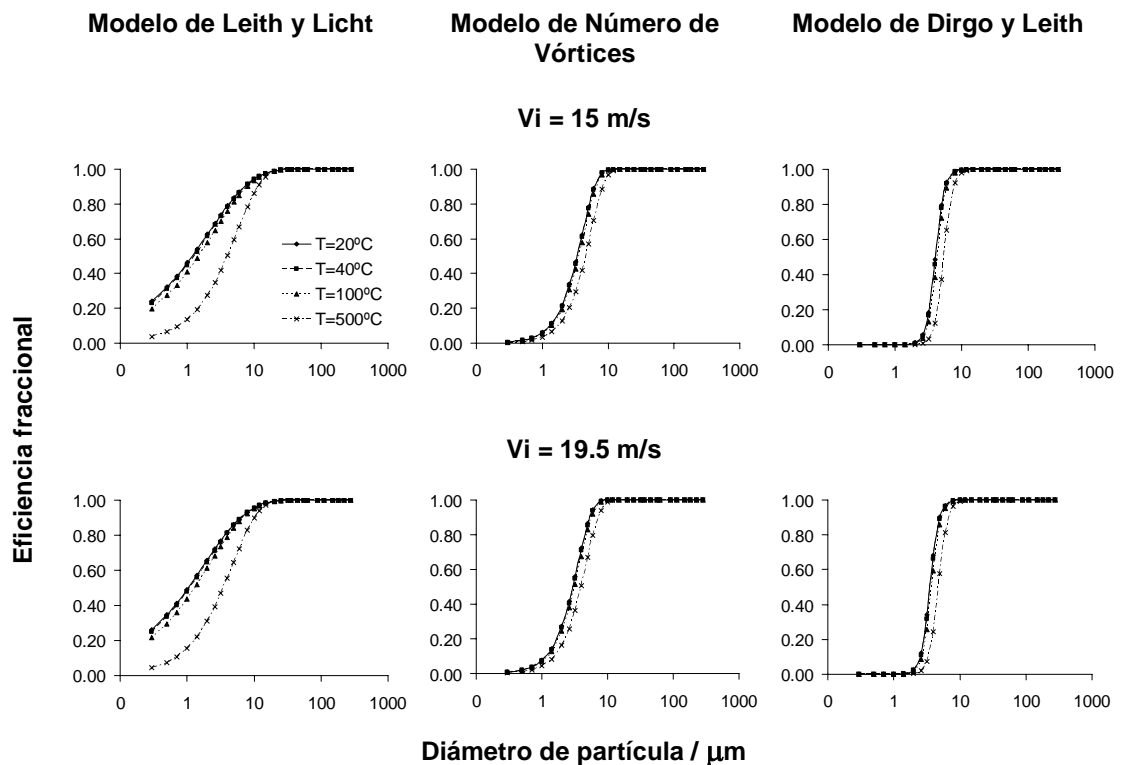


Figura 6 Curvas de grado de eficiencia para un ciclón de 0.35 m de diámetro.

Los modelos de Dirgo y Leith y el modelo de número de vórtices presentan curvas similares, mostrando un valor de  $x_{50}$  mejor definido que el obtenido a partir de la teoría de Leith y Licht.

Por otra parte se calcularon las eficiencias totales a partir de la Ecuación (5).

$$\eta_T = \sum \eta_i m_i \quad (5)$$

en la cual:  $\eta_T$ : eficiencia total  
 $\eta_i$ : eficiencia fraccional  
 $m_i$ : porcentaje másico

La Figura 7 muestra la dependencia de la eficiencia total con el diámetro del ciclón, para diferentes temperaturas y considerando distintas velocidades de entrada. Se observa similitud entre la respuesta obtenida con los modelos de Dirgo y Leith y del número de giros, en oposición al comportamiento predicho por la teoría de Leith y Licht que muestra un aumento de la eficiencia para mayores diámetros. Es de

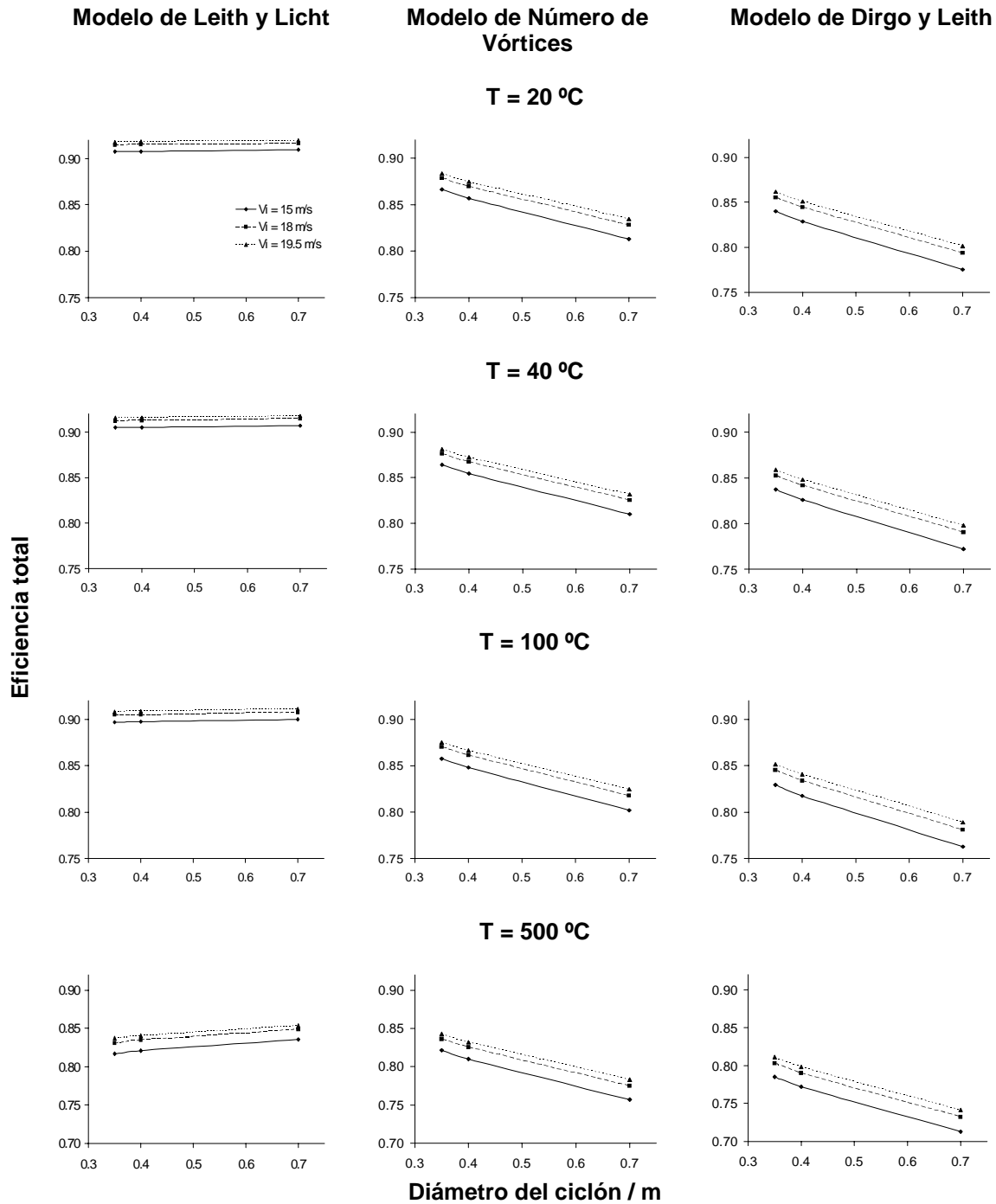


Figura 7 Dependencia de la eficiencia total con el diámetro del ciclón.

destacar que el resultado obtenido con este último modelo contradice la experiencia, que indica que los ciclones de alta eficiencia son de diámetro pequeño.

En la Figura 8 se presenta la variación de la eficiencia en función de la velocidad de entrada para diferentes temperaturas y los tres modelos aplicados. En correspondencia con el análisis anterior, se destaca la fuerte similitud de la respuesta obtenida a partir de las Ecuaciones (2) y (3), y la discrepancia entre ellas y el modelo de Leith y Licht. En todos los casos, se aprecia que la eficiencia total aumenta cuando también lo hace la velocidad de entrada.

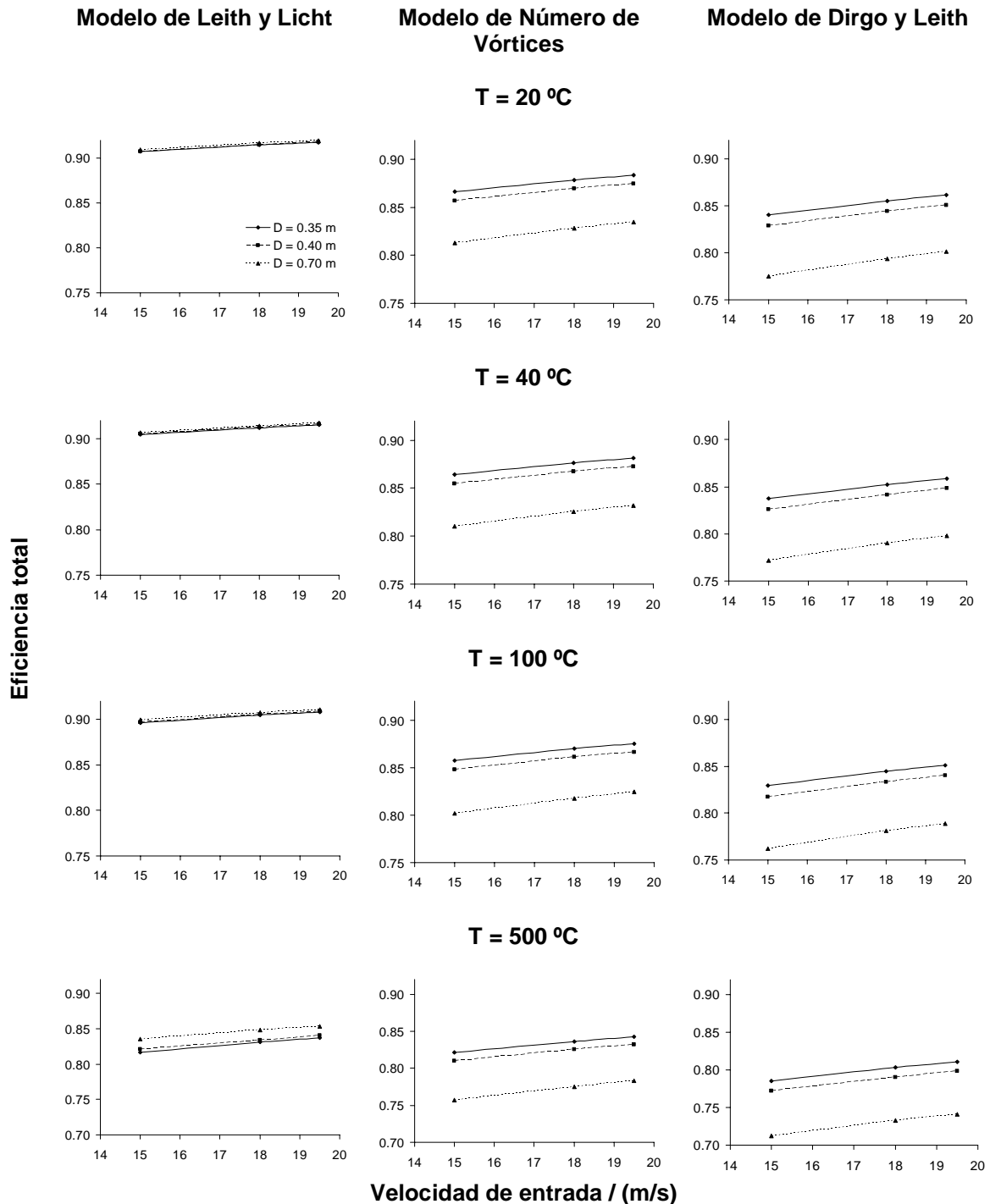


Figura 8 Eficiencia total en función de la velocidad de entrada en el ciclón.

La eficiencia total depende de la velocidad de saltación, la cual resulta condicionante para los ciclones pequeños, en tanto que en los de mayor tamaño tiene poca influencia.

Por otra parte, para cada ciclón y fijadas las condiciones de operación, los resultados obtenidos con todos los modelos aplicados, muestran que para mayores temperaturas, la eficiencia disminuye. Sin embargo, los resultados experimentales parecen contradecir la observación anterior. Esto se produce porque si bien para condiciones de operación fijas ocurre lo que indica la predicción teórica, en la práctica el aumento de temperatura permite incrementar la velocidad de entrada sin exceder el valor predicho por la expresión  $V_i < 1.35V_s$ .

Se calculó además la caída de presión originada por efectos cinéticos y de fricción. Este parámetro resulta importante debido a que se lo puede relacionar directamente con el requerimiento de potencia en el ventilador y el consecuente consumo de energía.

La caída de presión,  $\Delta P$ , puede calcularse empleando la Ecuación (6), propuesta por Shepherd y Lapple [9].

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_i^2 N_H \quad (6)$$

donde  $N_H$  es el número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón, que depende de los parámetros geométricos.

La Figura 9 muestra la caída de presión en función de la temperatura, para diferentes velocidades de entrada, correspondiente a la caliza estudiada. A medida que se incrementa la temperatura, la diferencia de presión disminuye.

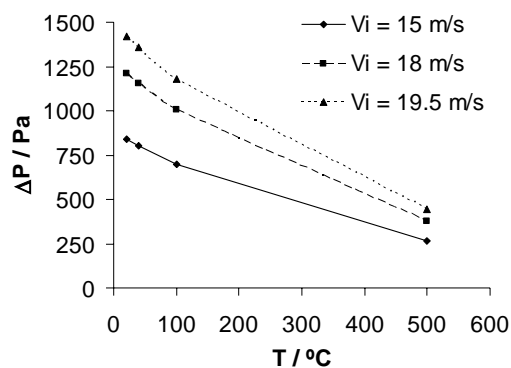


Figura 9 Dependencia de la caída de presión con la temperatura de operación.

## 6. CONCLUSIONES

El comportamiento del flujo turbulento gaseoso presente en un ciclón puede ser descrito por ecuaciones diferenciales de gran complejidad que no tienen solución analítica exacta. La utilización del MEF permitió una adecuada simulación del movimiento del gas en el ciclón de manera relativamente sencilla y práctica.

Las curvas de grado de eficiencia obtenidas con los modelos de Dirgo y Leith y de Número de Vórtices indican una menor eficiencia que las obtenidas por medio del modelo de Leith y Licht, debido a que en este último el peso relativo de los parámetros geométricos es mayor. Esto también se verifica para la eficiencia total en función de la velocidad de entrada, de la temperatura de operación y del diámetro del ciclón.

El aumento de la temperatura produce una disminución de la relación  $V_i/V_s$ , por lo cual es posible incrementar la  $V_i$  sin que se produzca la resuspensión de las partículas. Lo anterior permite obtener una mayor eficiencia del ciclón.

La caída de presión disminuye con el incremento de la temperatura. Este hecho es beneficioso ya que permite reducir los costos energéticos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] A.C. Hoffmann, L.E. Stein, *Gas Cyclones and Swirl Tubes. Principles, Design and Operation*, 2nd Edition, Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] C.A. Echeverri Londoño, *Diseño óptimo de ciclones*, Rev. Ing. Univ. Medellín, **5, 09**, 123-139, 2006.
- [3] D. Leith, W. Licht, *The collection efficiency of cyclone type particle collectors-a new theoretical approach*, AIChE Symp. Ser. **68, 126**, 196-206, 1972.
- [4] J. Dirgo, D. Leith, *Filtration and Separation*, **119**, 125, 1985.
- [5] B. Kalen, F.A. Zenz, *Theoretical Empirical Approach to Saltation Velocity in Cyclone Design*, AIChE Symp. Ser., **70, 137**, 388, 1974.
- [6] W.P. Martignoni, S. Bernardo, C.L. Quintani, *Evaluation of cyclones geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics (CFD)*, Braz. J.Chem.Eng. **24, 01**, 83-94, 2007.
- [7] T.J. Chung, *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge, University Press, U.K., 2002.
- [8] J.J. Derksen, *Simulations of confined turbulent vortex flow*, Comp. & Fluids, **34**, 301-318, 2005.
- [9] C.B. Shepherd, C.E: Lapple, Ind. & Eng. Chem., 32, 1246-1248, 1940.