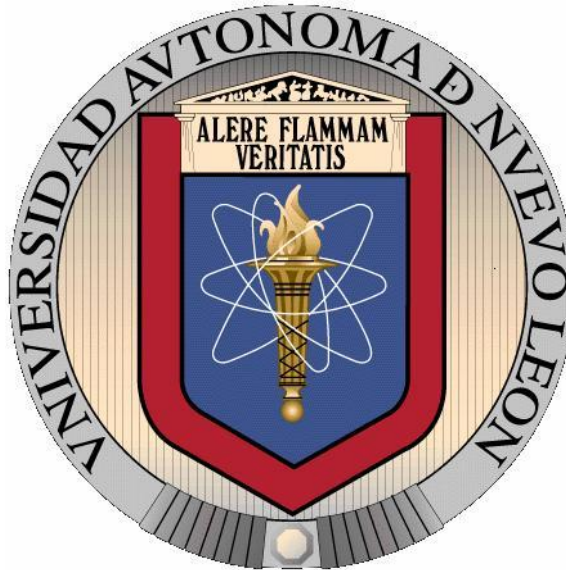


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**Modelo Matemático de Ciclones Industriales Para Optimización de la
Producción de Cemento**

(Diseño de un ciclón para manejar alto contenido de partículas)

Por:

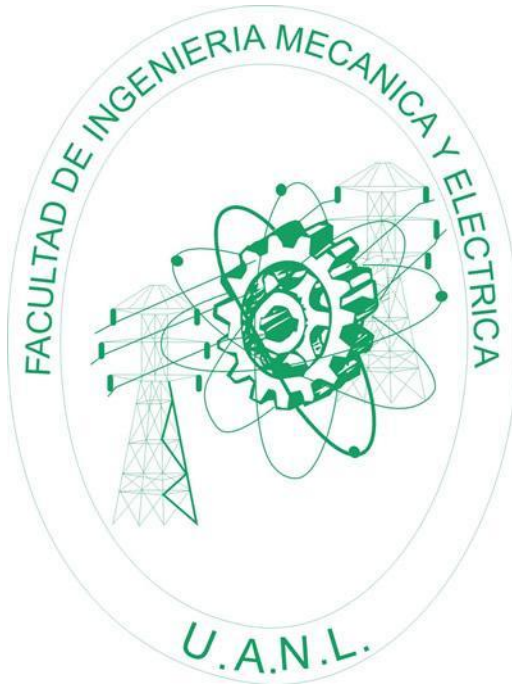
MC. Eleazar Morales Guerra

**Como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ingeniería de Materiales**

CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO 2013

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE GRADUADOS**



**Modelo Matemático de Ciclones Industriales Para Optimización de la
Producción de Cemento**

(Diseño de un ciclón para manejar alto contenido de partículas)

Por:

MC. Eleazar Morales Guerra

**Como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ingeniería de Materiales**


CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO 2013

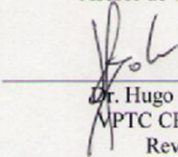
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de Tesis, recomiendan que la tesis "Modelo Matemático de Ciclones Industriales para Optimización en la Producción de Cemento (Diseño de un ciclón para manejar alto contenido de partículas)", realizada por el M.C. Eleazar Morales Guerra, sea aceptada para su defensa como opción al grado de DOCTOR EN INGENIERÍA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES.

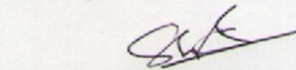
El comité de Tesis:



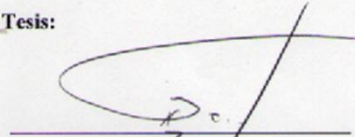
Dr. Tushar Kanty Das Roy
Asesor de Tesis



Dr. Hugo Bolio Arceo
MPTC CEMEX
Revisor



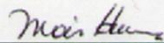
Dr. Shaji Sadasivan
Revisor



Dr. Guadalupe Afán Castillo Rodríguez
Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez
Revisor



Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdirector de Estudios de Postgrado

Febrero 2013

RESUMEN

Área de Estudio: Dinámica de fluidos computacional (CFD) por sus siglas en inglés, Fenómenos de transporte, Métodos Numéricos. Tecnología del Cemento, Colección de partículas y Diseño de Ciclones.

Se estudiaron tres casos a escala real de ciclones en la industria del cemento utilizando modelado computacional (CFD). El primer caso, un ciclón de alto volumen con problemas de estabilidad en la operación, instalado en una de las plantas de CEMEX. En el segundo caso, se realizaron modificaciones en las condiciones de operación del ciclón anterior y se evaluó la respuesta del sistema para resolver el problema de inestabilidad. Finalmente, en el tercer caso se propuso una nueva geometría optimizada a otras condiciones de operación para resolver el problema de inestabilidad.

El estudio se hizo mediante un modelo matemático resuelto numéricamente mediante el uso Fluent ®. El modelo se basó en la ecuación de Navier Stokes (NS) en régimen turbulento estabilizado.

El análisis se hizo en un marco de referencia de Euler para la fase gaseosa, y de Lagrange para la fase sólida. Se utilizó el modelo de esfuerzos de Reynold (RSM) para simular la turbulencia. La fase sólida se manejó mediante el modelo de fase discreta (DPM) y la distribución de tamaños se desarrolló con la ecuación de Rosin - Rammler.

En los tres casos se obtuvieron los perfiles o estructuras coherentes para: La velocidad de gases, caída de presión, turbulencia y el tiempo de residencia de las partículas. Los resultados coinciden con los valores de mediciones físicas a los equipos en operación.

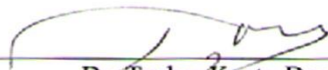
En los tres casos estudiados las estructuras coherentes encontradas para el perfil de velocidad, caída de presión y turbulencia de la fase gaseosa se comportan como atractores. El atractor tiene una dependencia débil de la geometría del sistema y de las condiciones de operación.

El tiempo de residencia de las partículas tiene una dependencia fuerte de la geometría y de las condiciones de operación en los tres casos. La solución de la dinámica sólido – gas se comporta como un conjunto límite para el caso uno y dos (incluso puede divergir).

En el caso tres, la solución de la dinámica del sistema gas – sólido se comporta como un atractor, además, fija junto con el tiempo de residencia de los gases un criterio para evaluar si el ciclón opera en condiciones estables, o bien, se romperá el “equilibrio” dinámico y entrará en una operación inestable (se rompen las simetrías de las ecuaciones).

Como resultado del trabajo se obtienen las siguientes conclusiones:

- 1) Se encontró un criterio de diseño de ciclones. El tiempo de residencia de las partículas en el ciclón debe estar cercano al tiempo de residencia de los gases $\tau_p < 2.5 \tau_g$ para asegurar una operación en estado estable, aún y cuando, el tiempo de residencia de las partículas no es un concepto nuevo, lo novedoso de este enfoque es el usarlo como un criterio para evaluar el comportamiento de la solución de la dinámica del sistema, ya sea como un conjunto límite, o bien, como un atractor.
- 2) El criterio del tiempo de residencia de las partículas es una condición necesaria y suficiente para garantizar una operación estable, esto se comprobó porque al modificar la geometría del ciclón con problemas de estabilidad (casos I y II), y usar la geometría propuesta a las nuevas condiciones de operación (caso III), el sistema arrancó y está trabajando a plena capacidad. El llevar el sistema a plena capacidad y estabilizarlo se logró en 24 horas.
- 3) La modificación de la geometría del sistema y el cambio en las condiciones de frontera (caso III), permitió operar el sistema en forma estable con el incremento de capacidad de producción de 3800 a 4600 toneladas/día.



Dr. Tushar Kanty Das Roy
Director de la Tesis

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi esposa Margarita Ofelia Cantú García, a mis hijas Claudia, Erika y Ofelia por su apoyo, paciencia y comprensión.

También dedico este trabajo a la memoria de mi mamá MLGA, porque con su ejemplo de vida, siempre me motivó a superarme.

Eleazar Morales Guerra

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis, es producto de varios años de trabajo, tiene contribución directa e indirecta de muchas personas. Sin la ayuda de todos ellos, no me cabe la menor duda que este trabajo no habría visto la luz. Mi agradecimiento para las siguientes personas:

El Dr. Tushar Kanty Das Roy, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL, por haberme dado la oportunidad de entrar al programa de doctorado, además, el Dr. Tushar me ha brindado su confianza y apoyo para trabajar con absoluta libertad al escribir este trabajo.

El Dr. Hugo Bolio Arce, Vicepresidente de Tecnología de CEMEX, autorizó realizar mediciones de campo, estas mediciones permitieron validar la exactitud de los resultados de la simulación al comparar y validar el modelo matemático.

El Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez, el Dr. Shuji Sadasivan y el Dr. Simón Martínez Martínez, hicieron una revisión profunda de la tesis y permitieron dar el rigor científico a este trabajo.

El Dr. José Luis Cantú Mata, el Dr. Juan Carlos Solís Galván, el Ing. Carlos Medina Ayala, el Ing. Emiliano Quiroga Morales, el Ing. Conrado Gaytan de la Cruz, el Ing. Daniel Santos Morales y la Lic. Erika L. Morales Cantú, hicieron una revisión de la estructura y del contenido, importante para clarificar ideas y marcar el camino para escribir la tesis.

El Dr. Svetoslav Nenov, y el Dr. Drumi Bainov, de la Universidad de Química y Tecnología Metalúrgica de Plovdiv, Bulgaria, por invitarme a exponer el modelo matemático desarrollado en este trabajo en el Congreso “Fourth International Conference Of Applied Mathematics and Computing”. El congreso fue celebrado en Plovdiv, Bulgaria del 12 al 18 de Agosto del 2007 con la participación de personas de más de 50 países.

El Dr. Stefan Turek de la Universidad de Dortmund, Alemania me permitió usar el paquete FeatFlow++. Este paquete se usó para explorar las primeras versiones del modelo.

Deseo dar las gracias a los compañeros de trabajo y amigos Ing. Raúl Quintal Avilés, Ing. Jesús Verdín Curiel, Ing. Jorge Pablo García García, con los que en diferentes momentos discutí algunas de las ideas que dieron forma al trabajo.

El Ing. Manuel González y el Ing. Salvador Rodríguez por darme la oportunidad de trabajar en la industria del cemento.

PRÓLOGO

El uso de ciclones como un primer paso para separar partículas en suspensión en una corriente de fluidos, es una práctica común. Los ciclones operan con eficiencias de colección de 96% para partículas con un rango de tamaño muy amplio (1.8 a 200 micras o mayores). El rango de trabajo va de temperatura ambiente a temperaturas extremas de 1250 °C en cámaras de combustión ciclónicas.

Las características anteriores, aunadas al bajo mantenimiento por no tener piezas móviles, los hacen ideales para aplicaciones donde se requiere poner en contacto una corriente de partículas con un gas e intercambiar calor, como es el caso en la torre de intercambio de calor usada en la industria del cemento.

El diseño de ciclones se hace tradicionalmente aplicando factores de escalamiento que conservan la similitud geométrica y dinámica del sistema. La similitud dinámica se conserva utilizando números adimensionales como el número de Reynold o el número de Euler.

A partir de los 70's con el rápido desarrollo de la tecnología de computadoras, se ha hecho popular estudiar sistemas complejos por simulación en computadora. En el caso de la aerodinámica de gases y partículas en un ciclón, se utilizan métodos de Dinámica de fluidos computacionales (CFD).

En este trabajo se estudiaron tres casos a escala real de ciclones en la industria del cemento, utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD). El primer caso, un ciclón con problemas de estabilidad de operación instalado en una de las plantas de CEMEX en Egipto. En el segundo caso, se modificaron las condiciones de operación del ciclón anterior, y se evaluó la respuesta para resolver el problema de inestabilidad. Finalmente, en el tercer caso se propuso una nueva geometría a otras condiciones de operación para resolver el problema de inestabilidad y trabajar en forma estable con el incremento de producción del sistema de 3800 a 4600 toneladas/día.

El estudio se hizo mediante un modelo matemático resuelto numéricamente con el uso de un paquete comercial de aplicación general, Fluent ®. El modelo se basó en la ecuación de Navier Stokes (NS) en régimen turbulento estabilizado y varios modelos auxiliares.

El análisis de los casos estudiados se hizo aplicando a los resultados conceptos como el de estructura coherente, el cual permite ver en forma global el comportamiento de las propiedades locales de: velocidad, presión y turbulencia. También se aplicaron conceptos como el de atractor, y conjunto límite, para analizar el comportamiento de la solución de la dinámica del sistema aunado al tiempo de residencia de los gases y las partículas. Además, se analizó la trayectoria de partículas.

El tiempo de residencia de las partículas tiene una dependencia fuerte de la geometría y de las condiciones de operación. Finalmente, se encontró que la solución de la dinámica del sistema se comportó como un conjunto límite para el caso uno y dos (incluso puede divergir), y como un atractor para el caso tres, fijando un criterio de diseño para el ciclón.

A continuación se da una leve descripción del contenido de los capítulos de la tesis:

Capítulo No 1: Introducción.

Se hace una retrospectiva del uso de ciclones en la industria del cemento, se puede apreciar que en el área de diseño existe una oportunidad, tanto en el sentido teórico aplicando conceptos como el de estructura coherente, atractor y/o el de conjunto límite. En el sentido práctico se ve que es necesario clarificar los criterios de diseño para responder a la tendencia en el mundo de normas ambientales más estrictas.

Capítulo No 2: Flujo de fluidos en régimen laminar y turbulento.

Se define el problema a resolver en el trabajo, se describe el objetivo de la investigación y se plantean hipótesis para resolver el problema.

Se introduce la ecuación del tensor de esfuerzos combinados, ϕ_{ij} = tensor de esfuerzos viscosos + tensor de esfuerzos convectivos. La ecuación se simplifica considerando la viscosidad isotrópica e independiente del tiempo.

La turbulencia se puede representar con modelos de una o dos ecuaciones algebraicas, como por ejemplo el conocido modelo $k - \epsilon$, o bien, con un modelo más completo como: El Reynold Stress Model (RASM), con siete ecuaciones diferenciales para representar el comportamiento altamente rotacional del flujo de fluido dentro del ciclón.

Se introduce además un modelo para tomar en cuenta la interacción gas – partícula por medio de un coeficiente de arrastre, C_D .

Capítulo No 3: Métodos numéricos.

Se introducen los algoritmos de volumen finito con los que se resolvió el problema. Este método es un caso particular del método de diferencias finitas, para transformar en discretas las ecuaciones diferenciales parciales de conservación. El resultado de la transformación es un conjunto de ecuaciones algébricas.

El sistema de ecuaciones algebraicas se resolvió con el algoritmo de matrices tridiagonales (MTDA), o bien, con el método de Gauss – Sidel. Los algoritmos de estos métodos se modifican con una técnica Multi-Nivel para acelerar la velocidad de convergencia y mejorar la estabilidad al iterar.

Capítulo No 4: Resultados y discusión.

La ecuación de Navier – Stokes, y la ecuación de continuidad en régimen turbulento se resolvieron numéricamente para el flujo de gases en el ciclón con alta concentración de partículas. La solución es válida en un rango de temperaturas muy amplio, los casos estudiados se resolvieron a temperatura extrema (más de 900°C). Los gases interactúan con la fase de partículas sólidas en suspensión a través de un coeficiente de arrastre C_D .

Se obtuvieron perfiles de velocidad, caída de presión y energía cinética turbulenta. Se analizó el comportamiento global de las estructuras coherentes y los atractores resultantes.

Se encontró un criterio para decidir si la solución encontrada es físicamente estable o inestable.

Capítulo No 5: Conclusiones.

- Se comprobó que el modelo matemático propuesto es capaz de detectar cuando el diseño o las condiciones de trabajo producen una operación estable o inestable.
- Los resultados de las simulaciones tienen una aproximación de ingeniería buena, mayor al 95% al compararlos contra valores medidos físicamente en el colector de polvo tipo Jet pulse y transformados a la etapa III por balance de materia y energía. Las mediciones de pesada física se hicieron en la planta de CEMEX en Egipto, antes y después de las modificaciones.
- Se encontró una condición necesaria y suficiente para evaluar la estabilidad de operación de un ciclón (nuevo diseño o existente), en el tiempo de residencia de las partículas.

Febrero 2013
E.M.G.

ÍNDICE

Resumen
Dedicatorias
Agradecimientos
Prólogo
Tabla de contenido
Índice de tablas
Índice de figuras
Lista de abreviaturas y símbolos

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Antecedentes	
1.2 Definición del problema	
1.3 Objetivo de la investigación	
1.4 Hipótesis	
1.6 Metodología	
1.6 Justificación	
1.7 Estado del arte	
2. FLUJO DE FLUIDOS EN RÉGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO.	29
2.1 Introducción	
2.2 Flujo laminar	
2.3 Distribución de velocidad en flujo turbulento	
2.4 Modelos de turbulencia	
2.5 Ecuación de conservación de flujo multi-fase	
3. MÉTODOS NUÉRICOS.	48
3.1 Transformación de las ecuaciones de conservación en forma discreta	
3.2 Solución de ecuaciones	
3.3 Estrategia de solución	
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	56
4.1 Introducción	
4.2 Casos de estudio I, II y III	
4.3 Discusión de resultados	

5. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS... 74

- 5.1 Conclusiones**
- 5.2 Trabajos futuros**

REFERENCIAS 77

- Artículos
- Tesis
- Libros
- Direcciones e-mail

APÉNDICE A.- Tablas Discusión Bibliografía
APÉNDICE B.- Modelo Fluent (Casos I, II y III)

Indicé de tablas:

Tabla No 1-1; Estado del arte (Tesis sobre modelación de ciclones con CFD).

Tabla No 1-2: Estado del arte (Artículos matemáticas sobre atractores y estructuras coherentes).

Tabla No 1-3: Estado del arte (Artículos en CFD).

Tabla No 1-4: Estado del arte (Modelación física).

Tabla No 2-1: Ecuación del esfuerzo viscos (Simplificación del caso general).

Tabla No 2-2: Ecuación de esfuerzo combinado.

Tabla No 2-3: Ecuaciones de conservación en régimen turbulento (Componente “x”).

Tabla No 2-4: : Ecuaciones de conservación en régimen turbulento (Componente “x”).

Tabla No 2-5: Modelos de turbulencia.

Tabla No 2-5: Modelos de turbulencia (Continuación).

Tabla No 2-6: Modelos de turbulencia k - ϵ .

Tabla No 2-7: Modelos de turbulencia RASM.

Tabla No 2-8: Ecuaciones de continuidad y momentum.

Tabla No 2-9: Ecuaciones de continuidad y momentum para interacción fase gas –fase sólida.

Tabla No 2-9 (Continuación): Ecuaciones de continuidad y momentum para interacción fase gas –fase sólida.

Tabla 4-1: Geometría de Ciclón para el caso I y II

Tabla No 4-2: Geometría Ciclón caso III

Tabla Estado del arte Tesis.

Tabla Estado del arte artículos CFD.

Tabla Estado del arte en modelación física.

Indicé de figuras:

- Fig. 1-1 Ciclón alta eficiencia
Fig. 1-2 Ciclón alto flujo
Fig. No 1-3 Diagrama de flujo de la metodología para resolver el sistema de ecuaciones de conservación (Masa. Momentum) para un ciclón
Fig. No 2-1 Oscilación del componente de velocidad alrededor de un valor medio.
Fig. 3-1 Celda de control
Fig. 3-2 Volumen de control
Fig. 3-3 Diagrama de flujo Algoritmo Secuencial
Fig. 3-4 Plano Nodos con MXN ecuaciones
Fig. 3-5 Estrategia de solución Multi - Nivel
Fig. No 4-1 Ciclón caso I y II, $V_{Inicial} = 13.2$ [m/s]
Fig. No 4.2 Ciclón caso III $V_{Inicial} = 18.3$ [m/s]
Fig. No 4-3 Malla Caso I y II 104110 celdas
Fig. No 4.4 Malla Caso III con 18377 celdas
Fig. No 4-5 Caso I Perfil de velocidades [m/s]
Fig. No 4-6 Caso I Perfil de presiones [pulgadas CA]
Fig. No 4-7 Caso I Perfil de Turbulencia [m^2/s^2]
Fig. No 4-8 Caso I Perfil de Velocidad en el plano X-Z [m/s]
Fig. No 4-9 Caso I Perfil de Presiones en el plano X-Z [pulgadas CA]
Fig. No 4-10 Caso I Perfil de Turbulencia en plano X-Z [m^2/s^2]
Fig. No 4-11 Caso I tiempo de residencia [s]
Fig. No 4-12 Perfil de velocidad [m/s]
Fig. No 4-13 Perfil de presiones [pulgadas CA]
Fig. No4-14 Perfil de turbulencia [m^2/s^2]
Fig. No 4-15 Perfil de Velocidad [m/s]
Fig. No 4-16 Perfil de presión [pulgadas CA]
Fig. No4-17 Perfil de Turbulencia [m^2/s^2]
Fig. No 4-18 Caso II Tiempo de residencia de partículas [s]
Fig. No 4-19 Caso II Tiempo de residencia de partículas [s]
Fig. No 4-20 Perfil de velocidad [m/s]
Fig. No 4-21 Perfil de presiones [pulgadasCA]
Fig. No 4-22 Perfil de turbulencia [m^2/s^2]
Fig. 4-23 Perfil de velocidad [m/s]
Fig. No 4-24 Perfil de presión [pulgadas CA]
Fig. No4-25 Perfil de turbulencia [m^2/s^2]
Fig. No 4-26 Tiempo de residencia caso III [s]
Fig. No 4-27 Perfiles de velocidad en planos "X-Y"
Inicial = 18.3[m/s]
Fig No 4-28 a) Gráfica dP vs t EI-L5
b) Gráfica dP vs t EI-L6
c) Gráfica torque del horno vs t
d) Grafica Temperatura vs t

Lista de abreviaturas y símbolos

CFD	: Fluido Dinámica computacional
NS	: Ecuación de Navier Stokes
ANS	: Ecuación de Navier Stokes promedio
RSM	: Modelo de esfuerzos de Reynolds
DPM	: Modelo de fase discreta
RASM	: Modelo de esfuerzos de Reynolds promedio
k - ϵ	: Modelo de turbulencia k - ϵ
RNG	: Modelo de turbulencia RG
MTDA	: Algoritmo Matrices triagonal
Re	: Número de Reynolds
U.K	: Reino Unido
CHAM	: Compañía Concentration Heat and Momentum Ltd
PHOENICS	: Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code
°C	: Grados Celsius
τ_p	: Tiempo de residencia de partículas
τ_g	: Tiempo de residencia de gases
τ_{ij}	: Tensor de esfuerzos combinados
CD	: Coeficiente de arrastre de partículas
LModelo	: Criterio de similitud (L ~Longitud)
LPrototipo	: Criterio de similitud (L ~Longitud)
Modelo	: Criterio de similitud (t ~tiempo)
Prototipo	: Criterio de similitud (t ~tiempo)
FModelo	: Criterio de similitud dinámica (FModelo)
FPrototipo	: Criterio de similitud dinámica (FPrototipo)
τ_{ij}	: Tensor de esfuerzo molecular
τ_{ij}	: Tensor de esfuerzos viscoso
P_{ij}	: Tensor de presión
$\rho u_i u_j$: Tensor de transporte convectivo
u	: Velocidad instantánea
v'	: Fluctuación de velocidad
\bar{v}	: Velocidad promedio
$v_i = v_i(x, y, z, t)$: Componente de velocidad en dirección "i"; i=x,y,z
μ_{ijkl}	: Viscosidad $\tau_{ij} = \mu_{ijkl} \frac{du_k}{dy_l}$
$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: Derivada parcial de "ui" con respecto a "xj"
μ_{eff}	: Constante de viscosidad de dilatación
N	: Normal
dS	: Diferencial de área
\vec{i}	: Vector
$\frac{\sqrt{v_z'^2}}{\langle v_z \rangle} \neq 0$: Intensidad de la turbulencia
$\overline{v_x v_y} \neq 0$: Esfuerzo de Reynolds
p	: Presión instantánea
P	: Presión media
p'	: Componente de variación instantánea de la presión
∇	: Operador gradiente
∇^2	: Operador Laplaciano
$\tau_{ii} = \rho \overline{v_i v_i}$: Tensor de esfuerzo turbulento

$\tau_{ij}^{(v)}$: Tensor de esfuerzo viscoso (Ley de Newton de la viscosidad)

$\overline{v_i v_j v_k}$: Ecuaciones de variación para los esfuerzos de Reynolds ($\overline{v_i v_j v_k v_l}$)

$\tau_{ij}^t = -\mu^t \frac{d\overline{u_i}}{dx_j}$ Ecuación de viscosidad turbulenta (□□t: Viscosidad turbulenta, □□□□ viscosidad, □□□ viscosidad aparente)

$L = \kappa \frac{\left(\frac{du}{dy}\right)}{\left(\frac{d^2u}{dy^2}\right)}$: Expresión para "L" (Longitud de mezclado de Von Karman)

$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C$; □=0.41, C=0.52

$\tau^t = \rho L^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$: Ecuación de Von Karman para el esfuerzo turbulento

$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$: Viscosidad efectiva.

$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$: Viscosidad turbulenta.

$p' = p + \frac{2}{3} \rho k$

k : Energía cinética turbulenta

□ : Epsilon (Velocidad de disipación de energía)

$\frac{Du_i u_j}{\partial t}$: Derivada material (Modelo RASM)

Pij: Producción de esfuerzo.

Dij: Convección difusión.

□□ij : Término de esfuerzo de presión se puede descomponer en dos partes.

□□ij: Disipación.

D : Diámetro del ciclón

Ds: Diámetro superior

De: Diámetro del vortex

H: Altura total del ciclón

h1: Altura del cilindro

h2: Altura del cono superior

h3: Altura del cono medio

h4: Altura del cono inferior

h5: Altura del cono inferior 2

S: Altura del vortex

a: Altura de la entrada

b: Ancho de la entrada

B: Diámetro salida de polo

V: Velocidad

CA: Columna de agua

mbar: mili - bar

k : Energía cinética turbulenta m²/s²

Lista de abreviaturas y símbolos (Continuación)

Fak : Fuerza Arquímedes,

Fk : Fuerza de Stock,

Fg : Fuerza gravitacional,

Faf: Fuerza por curvatura del espacio)

Rep : Número de Reynolds para la fase sólida (Partículas).

Γ : Coeficiente de difusividad

Δx_i : Diferencial de longitud

Σ : Sumatoria

SIMPLE (Semi – Implícito –)

SIMPLER (Simple review)

$x_i^{(k)}$: Variable proceso iterativo (Método numérico)

Ty: Matriz

ci:

$x^{(k)} = T_1 x^{(k)} + T_2 x^{(k-1)} + c$: Forma matricial de sistema de ecuaciones algebra

|

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los separadores ciclónicos son muy usados en la industria como un primer paso de limpieza de gases, cámaras de combustión, o también como intercambiadores de calor [33].

Los ciclones son simples de fabricar dada su geometría, pero difíciles de diseñar, ya que trabajan con fluidos en régimen turbulento, con partículas en suspensión que se deben separar. Para esto existen dos procedimientos de diseño de uso común en la actualidad; a través de formulas experimentales obtenidas por modelación física [54], o por medio de ecuaciones de diseño que se deducen a partir de principios de conservación (Continuidad, Momentum, Energía). Las ecuaciones de diseño no se pueden resolver en forma analítica y se deben emplear técnicas numéricas para resolver los modelos matemáticos que resultan de problemas de uso práctico.

En el caso de diseño por modelación física, las correlaciones experimentales usadas tienen al menos tres limitantes: En primer lugar, se obtienen en pruebas con gases “limpios” (baja concentración de partículas). Como segunda instancia, las pruebas se deben realizar a temperatura ambiente, debido a que hacer experimentos a temperaturas altas es muy costoso [44] y finalmente en tercer lugar, la aplicación del resultado de estas ecuaciones tiene un uso limitado al rango de trabajo donde fueron probadas [35].

El escalamiento de ciclones usando ecuaciones de diseño obtenidas a partir de simplificar una teoría (aplicar principios de conservación: masa, momentum y energía) para flujo de fluidos en régimen turbulento multifase (gas – sólido) también tiene una limitante: no existe una solución analítica para los casos de interés práctico, sin embargo, con el uso de computadoras y técnicas conocidas como “Dinámica de fluidos computacional”(CFD) se pueden resolver numéricamente modelos de uso en ingeniería [2].

El modelo matemático que representa a las ecuaciones de conservación antes mencionadas, es un tensor simétrico de segundo orden conocido en dinámica de fluidos como ecuación de Navier Stokes (NS) [10]. La ecuación de NS requiere de validación experimental cuando se aplica a flujo de fluidos en régimen turbulento [55], porque matemáticamente existe una jerarquía sin fin de ecuaciones que se tiene que resolver. Para resolver problemas de flujo donde se desea calcular el campo de velocidad (gas, partículas) y la caída de presión como es el caso al diseñar un ciclón, se debe “truncar” esta jerarquía (Problema de “taponamiento”) mediante la introducción de factores empíricos unificados en un modelo de turbulencia [46].

El hecho de usar factores experimentales que requieren validación en las ecuaciones de diseño reconcilia esta metodología (Ecuación de diseño) con las correlaciones obtenidas por modelación física, y hace necesario revisar los criterios de diseño desde un punto de vista unificado, esto es, encontrar las simetrías del sistema cuando se cambia de escala

(entendiendo como una simetría lo que permanece constante o invariante cuando se hacen transformaciones – Ecuaciones de conservación.) [45].

La pregunta a contestar desde un punto de vista teórico es: ¿Cómo se relacionan los principios de similitud de modelación física con las simetrías en las ecuaciones de Navier – Stokes? Entendiendo la similitud de modelación física como las relaciones que permanecen constantes en los cambios de escala del modelo al prototipo^[56]; y la simetría, como lo que permanece constante o invariante en una transformación (Relaciones, Números adimensionales, Ecuaciones), por ejemplo: los principios de conservación de masa, energía, y momentum.

El área de oportunidad desde el punto de vista de ingeniería al usar modelos matemáticos para representar la física de ciclones con alta concentración de partículas, se traduce en tener la capacidad para detectar y resolver problemas de estabilidad de operación relacionados con las condiciones de trabajo, o bien, errores de diseño (Simetrías rotas).

En la actualidad hasta donde se revisó, no existen registros literarios sobre el estudio de las simetrías de ciclones en donde se analice desde un punto de vista unificador los criterios de diseño, lo cual se desarrollará a lo largo de esta investigación.

Como antecedente más cercano en la industria del cemento solamente existen trabajos de modelación física publicados a nivel laboratorio de ciclones y de pruebas hechas a nivel planta piloto con gases calientes y de prototipo a escala industrial ^{[39],[30]}, sin embargo, en CFD solamente existen simulaciones de ciclones a nivel laboratorio, o bien, pruebas de modelos de turbulencia ^[28].

1.1 Antecedentes.

Al revisar la bibliografía se observa que la forma o geometría de los ciclones no ha cambiado de manera significativa en los últimos 100 años ^{[33],[34]}, sin embargo, se han hecho modificaciones en detalles como por ejemplo, el ángulo de la voluta (entrada de gases y partículas al ciclón) que cambia la caída de presión para una eficiencia de colección fija, o bien, en el número de entradas y la forma de conexión ^[32].

Los ciclones se pueden clasificar de acuerdo a su uso en la industria del cemento en dos categorías: la primera como de alta eficiencia de colección (85 – 95 %) con elevada caída de presión (5 pulgadas de columna de agua), y la segunda como alto flujo con moderada eficiencia de colección (75 – 85%) y caídas de presión en el orden de 3 pulgadas de columna de agua.

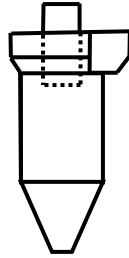


Fig. 1-1 Ciclón
alta eficiencia

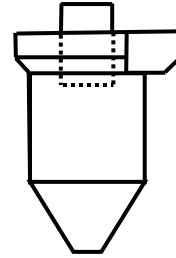


Fig. 1-2 Ciclón
alto flujo

Los dos tipos básicos de ciclones utilizan la energía obtenida del gradiente de presión en la corriente de fluido para crear un campo de velocidades rotacional [43]. El patrón de flujo causa que se rompa el equilibrio de flujo en suspensión gas – sólido, las fases se separan de una manera rápida y “brusca” por la fuerte acción de la fuerza centrífuga (se rompe la simetría) [57].

Desde 1934 en la industria del cemento surge la idea de precalentar la materia prima usando ciclones, pero la implementación práctica debió esperar hasta 1952 cuando Fritz Müller desarrolló un precalentador de cuatro etapas instalado en Bomke and Bleckmann cemento [34]. El objetivo fue mejorar la eficiencia térmica, el consumo de energía eléctrica y la caída de presión del sistema.

Existen varios proveedores líderes de tecnología en la industria del cemento a nivel mundial como: FLSmith, KHD Humbolt, Polysius, entre otros. Destacando que cuando cada uno de ellos tiene sus diseños particulares de ciclones, los principios básicos son similares. Sin embargo, la literatura especializada aplicada al diseño a escala industrial en la producción del cemento es escasa.

En el caso de diseño por modelación física, se han encontrado artículos como “Design methods for cyclone preheater of rotary kilns plants” [39] y en “Further development of the cyclone preheater on the basis of model investigations” [35] donde se define un procedimiento para diseño de ciclones en tres pasos: primero se hace modelación física en frío, seguida por modelación a temperatura en planta piloto (muy laboriosas y caras) y finalmente prototipo a plena escala. También en “Design methods for cyclone preheater of rotary kilns plants” [39], se muestran los principales problemas y diferencias de diseño de un ciclón tradicional y los usados para una línea de calcinación con precalentador en la industria del cemento, como son el efecto de temperaturas altas y una separación parcial de partículas, así como, el efecto de cambios en la geometría de ciclones.

Existen dos casos documentados de modelos analizados a través de CFD en la industria del cemento: uno .” Computational Fluid Dynamic for cyclone evaluation and design Part I and II publicado en ZKG en 2002 [18] donde se explica un modelo de ciclones (CFD) de la etapa superior de un precalentador. El segundo caso se presentó en la reunión de usuarios de Fluent Europa en Harrogate, U.K “Cement Rotary kiln Preheater Top Cyclone” [16]. El artículo contiene simulaciones en 2D con simetría axial

en flujo turbulento, así como un caso en estado estable en 3D, calculando la eficiencia de colección y la caída de presión, comparando los resultados contra datos de laboratorio.

1.2 Definición del problema

Simular un ciclón a escala industrial en operación estable con alto contenido de partículas, usando un modelo matemático (ecuación de Navier Stokes NS y un modelo de dispersión de partículas DPM) en régimen turbulento.

1.3 Objetivo de la investigación.

Encontrar los criterios de diseño, o bien, el atractor al que tiende el espacio de fases de un ciclón a escala industrial, a través de un modelo matemático resuelto numéricamente que garantice la estabilidad de operación con alta concentración de partículas.

1.4 Hipótesis.

- La dinámica de la fase de sólidos en suspensión en un ciclón tiene una solución en un espacio de fases que se comporta como un atractor dependiente de la geometría del sistema y las condiciones de operación.
- El criterio a seguir para decidir si un ciclón está correcta o incorrectamente diseñado es el tiempo de residencia de las partículas.
- La solución de la ecuación de NS y el modelo de turbulencia Reynolds Average Stress Model (RASM) con las condiciones de frontera existentes en un ciclón converge, es consistente y estable para una carga de partículas de 37 a 93 kg/s a temperaturas extremas (para este caso 900 °C).

1.5 Metodología.

Se elaboró un modelo matemático basado en la ecuación de Navier Stokes (NS) en régimen turbulento estabilizado para las fases Gas - Sólido. El sistema de diez ecuaciones diferenciales parciales (Continuidad, Momentum, Energía y 7 ecuaciones del modelo de turbulencia), se resolvieron en forma numérica aplicando el método de volumen finito [24] mediante el uso de un programa comercial de uso general FLUENT® adaptado para resolver el modelo propuesto.

La elaboración del modelo requiere de los siguientes pasos:

1. Pre – Procesado

- Construcción de una geometría en tres dimensiones.
- Elaborar una malla para resolver en forma discreta las ecuaciones de conservación. (Continuidad, Momentum, Energía)

2. Solución

- Seleccionar el tipo de ecuación a resolver - Estado estable o transiente.

- Proponer los modelos físicos para simular la turbulencia.
- Fijar los valores de las propiedades físicas de los fluidos y las partículas.
- Establecer las condiciones de frontera para resolver el sistema de ecuaciones resultantes.
- Definir los criterios de convergencia de las variables de proceso.
- Escoger el proceso de solución numérica (Secuencial o simultáneo) del sistema de ecuaciones.
- Fijar los criterios de relajación de las ecuaciones al resolverse numéricamente.
- Fijar el número de iteraciones.
- Elaborar planos para revisar los perfiles de velocidad de gases.
- Calcular los valores de caída de presión y eficiencia de colección de partículas.
- Monitorear la convergencia, consistencia y la estabilidad de la solución.

3. Post – Procesado.

- Elaborar planos para revisar los perfiles de velocidad de gases,
- Calcular los valores de caída de presión y eficiencia de colección de partículas.

4. Analizar resultados para validar o modificar el modelo.

- Comparar los resultados de la modelación contra los resultados obtenidos durante mediciones físicas del sistema con la geometría y las condiciones originales(caso I antes de modificar) Vs. la geometría propuesta a las nuevas condiciones de operación (caso III después de la modificación)

Diagrama de la solución a través de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) de un problema general de flujo de fluidos:

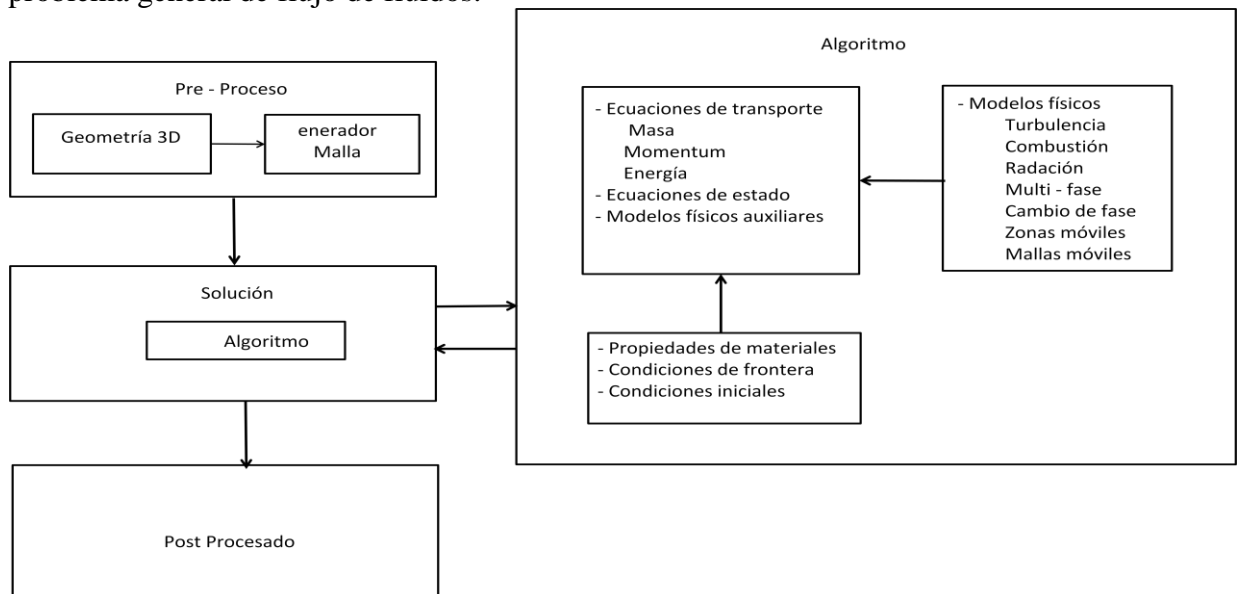


Fig.1-3 Diagrama de flujo de la metodología para resolver el sistema de ecuaciones de conservación (Masa, Momentum) para un ciclón

1.6 Justificación.

La estabilidad de operación de los sistemas industriales se está llevando a límites tecnológicos por el incremento de combustibles alternos y el endurecimiento de regulaciones ambientales, por lo tanto, se requieren modelos más precisos para optimizar el diseño o la selección de equipos de desempolvo.

En la literatura especializada que se revisó se encontraron las siguientes áreas de oportunidad:

- Solamente se encuentran modelos matemáticos resueltos usando métodos numéricos para ecuaciones que dependen del tiempo_{[26],[27],[28]}. El modelo propuesto se resuelve en forma numérica usando una solución en estado estable independiente del tiempo.
- La mayor parte de los trabajos publicados de ciclones se concentran en validar modelos de turbulencia que representen la compleja aerodinámica en el interior de ciclones usando datos experimentales obtenidos con ciclones a nivel laboratorio, con baja concentración de partículas y a temperatura ambiente. El modelo propuesto trabaja con ciclones a escala industrial y alta concentración de partículas (0.7 kg sólido/kg gas) y temperaturas extremas (900°C)_[44].

La solución de la ecuación de Navier Stokes en régimen turbulento y/o multi fase por medio de paquetes comerciales del tipo CFD o MEF (Método de Elementos Finitos) es sensible a pequeños cambios, por ejemplo, si se cambia el sistema operativo (Unix por Windows) el resultado de un problema “difícil” de resolver puede cambiar o divergir. Entonces el uso de criterios dinámicos para cruzar la información es importante.

1.4 Estado del arte.

A continuación se hace una breve revisión de la literatura de CFD, modelos matemáticos y modelación física. En el anexo I se hace una revisión exhaustiva de literatura. La tabla No 1-1 tiene información de tesis que se revisaron para construir el modelo usado para la simulación de los casos a resolver.

Tabla No 1-1; Estado del arte (Tesis sobre modelación de ciclones con CFD):

Autor	Aportación
Henrik Tryggeson _{[1][1]}	Sugiere una forma analítica de resolver la ecuación de NS reformulada para flujos interiores basada en estructuras coherentes en una geometría cónica.
Emiliano Quiroga Morales _[2]	Uno de los primeros <i>trabajos en 3D usando un modelo de turbulencia de Reynolds Stress</i> con 7 ecuaciones (RASM) para resolver la ecuación de Navier Stock en un ciclón operando con gases limpios (libres de partículas). Los resultados se comparan contra mediciones experimentales a nivel laboratorio.
Marcela Kotuska da Silva Florianópolis - Sc _[3]	Utiliza <i>una malla híbrida</i> refinada con celdas hexagonales en la pared para acelerar la convergencia disminuyendo los efectos de difusión numérica.
Arnold Frank Moene _[4]	Estudia el <i>efecto de la forma de entrada en dos tipos de separadores ciclónicos</i> : el primero, un separador con entrada axial y en el segundo se estudia el efecto de entrada tangencial.
Vinay R. Uddandam _[5]	Hace uso de Fluent y Gambit para modelar un ciclón precipitador electrosfático a escala piloto. El objetivo es entender la operación para optimizar y cumplir con el endurecimiento de las normas ambientales
Lingjuan Wang _[6]	Se hace un estudio teórico de nuevos métodos para calcular la caída de presión en un ciclón y analizar la operación a escala laboratorio (aerodinámica de gases)
Hemdan Hanafy Shalaby _[7]	Estudia el modelo de turbulencia Large Eddy Simulation en un ciclón. con geometría tipo Stairmand. La ecuación de NS se resolvió con dos códigos, uno desarrollado y otro comercial (CFX)
Luis Eduardo Gomez _[8]	Estudia experimentalmente en un hydro-ciclón un modelo para representar el flujo rotacional en dos fases con algunos modelos auxiliares en un marco de referencia Euler-Lagrange.

En la tabla No 1-2 están contenidos artículos sobre temas matemáticos relevantes:

Tabla No 1-2: Estado del arte (Artículos matemáticas sobre atractores y estructuras coherentes):

Autor	Aportación
Sen-Zhong Huang _[9]	<i>La dimensión del flujo de fluidos turbulento gobernado por la ecuación de Navier Stokes es en general infinito. La dependencia del tiempo de las fuerzas externas aplicadas es también de dimensión infinita.</i>
Sen-Zhong Huang _[10]	<i>Para un sistema de reacción - difusión, con las condiciones de frontera de Newman, se puede construir un patrón de flujo con complejidad arbitraria</i>
I. Roulstone, B. Banos, J.D. Gibbon and V.N. Roubtsov _[11]	<i>En flujo turbulento la estructura coherente con una solución real y otra compleja co-existen para la ecuación de Navier Stokes. La presión en flujo incompresible en 3D para la ecuación de Navier Stokes y la de Euler es de la forma de la ecuación de Poisson.</i>
Giancarlo Alfonsia,*, Carlo Restanob, Leonardo Primavera _[12]	Se estudia el flujo turbulento $Re = 40000$ alrededor de un cubo en un canal rectangular. <i>El campo de velocidades se puede descomponer en un número limitado de ecuaciones (cinco ó siete).</i>
Grzegorz Lukaszewicz _[13]	<i>Investiga la existencia de la solución de dimensión finita relación entre el atractor de dimensión finita del atractor para flujos turbulentos en dos dimensiones con condiciones de frontera mixtas no estándar.</i>
Ricardo M. S. Rosa _[14]	<i>Analiza algunos resultados rigurosos en 2D y 3D para la teoría convencional estadística de la turbulencia. Los resultados se basan en el concepto de solución estadística estacionaria, relacionada con la noción de ensamble promedio para la turbulencia.(Energía cinética media).</i>
Mojtaba Izadi1, Youssef Belhamadia2, and Stevan Dubljevic _[15]	Usa el método de volumen finito para resolver la ecuación de NS y caracterizar el flujo de mezclado multifase (Lagrangiano) en términos de las barreras de transporte de tiempo finito de Lyapunov

En la tabla No 1- 3 se incluye información de modelación de ciclones con CFD:

Tabla No 1-3: Estado del arte (Artículos en CFD)

Artículos	Aportación
E.D. Cristea, E.Malfa ,A. Coghe _[16]	<i>Hace una simulación en 2D con simetría axial y compara los resultados contra mediciones del perfil de velocidad con LDA. Tiene en proceso un caso en 3D</i>
H.F.Meier, K. Ropelato, M. Mori, K.J.J. Less, H. Forester. _[18]	<i>Simula la operación de un ciclón en 2D con simetría axial para representar el caso en 3D. Predice la caída de presión y la eficiencia de colección. Encontró una especie de “estado estable” para las partículas de 20 micras en ciclones usados en la industria del cemento.</i>
Klaus Bernert Thomas Frank Hellfried _[19]	<i>Efecto de usar algoritmos de solución en paralelo con Multigrid para flujos en multi-fase. Se resuelve las ecuaciones de flujo turbulento (ANS) incompresible con una estrategia simple en una malla de 3174400 celdas con volumen finito.</i>
Kyoungwoo Park, Chol-Ho Hong, Ji-Won Han, Byeong-Sam Kim, Cha-Sik Park, and Oh Kyung Kwon _[20]	<i>Usa el método RSM, $k-\epsilon$. RNG para simular la turbulencia y estimar la caída de presión en un ciclón (gases limpios).</i>
Khairy Elsayed_, Chris Lacory _{[21], [21] [22]}	<i>Estudia el efecto de modificar la entrada en un ciclón en la eficiencia de colección.</i>
Alex C. Hoffmann , Weiming Peng _[23]	<i>Estudia el efecto de Guías de flujo en la caída de presión mediante medición directa en el vortex con flujo reverso.</i>
H.W.A. Dries W. Peng, P. Boot, A. Udding AG, Groningen, The Netherlands A.C. Hoffmann * H.W.A. Dries, A. Ekker and J. Kater _[24]	<i>Compara los resultados de datos obtenidos a través de CFD contra datos medidos con Laser Doppler. El trabajo confirma que la velocidad radial es axialmente constante en el vortex tanto para la geometría del cilindro, así como para la combinación de cilindro cono (Ciclón “tradicional”).</i>
G. Gronald, J.J. Derkse _[25]	<i>Usa dos modelos LES para simular la operación de la fase gaseosa de un ciclón. Uno de los modelos se hace discreto con un método de volumen finito y el otro con un método de lattice de Boltzman. Los resultados se comparan contra datos publicados de mediciones con LDA (Lasser Doppler Anemómetro).</i>
Jinyu Jiao , Ying Zheng , Guogang Sunb, Jun Wang _[26]	<i>Se Usa Fluent 6.0 para modelar un ciclón, el espacio del ciclón se divide en tres zonas: Entrada, Separación y Descarga. Se usó el modelo RSM, Se estudió el efecto de que el vortex sea ranurado y gire.</i>
Arkadiusz Kepa _[27]	<i>Se simula la operación de un ciclo en estado inestable, se usa extracción de gas para estabilizar la simulación. Se usaron la ecuación de NS para gases con un modelo RSM para la turbulencia y DPM para los sólidos.</i>
H. Shalaby, K. Pachler, K. Wozniak, G. Wozniak _[28]	<i>Realiza una comparación de diferentes modelos de turbulencia en un ciclón</i>
Taketo OYAGI _[29]	<i>Se estudia la caída de presión entre el ducto de salida de gases y el de partículas aplicable a ciclones, y, a una cámara de combustión ciclónica.</i>
Jolius Gimibun _[30]	<i>Utiliza FLUENT para hacer el análisis de la aerodinámica de un ciclón operando a temperatura extrema. Proporciona un método relativamente económico comparado contra simulación física a altas temperaturas.</i>
Luqman Chuah _[31]	<i>Utiliza Fluent 6.0 para predecir la velocidad axial y tangencial con una precisión con una desviación de ± 0.5 m/s.</i>
W. P. Martignoni _[32]	<i>Compara el efecto de tener dos entradas simétricas vs el diseño tradicional de una sola entrada.</i>

En la tabla No 1- 4 se hace una revisión de artículos sobre simulación física:

Tabla No 1-4: Estado del arte (Modelación física):

Artículo	Aportación
American Petroleum Institute ^[33]	<i>Recolección de datos experimentales publicados. y no publicados por Kaiser Ing.</i>
H. Ramesohl, Cologne, Germany, "40 years of Humboldt preheaters", ZKG No 8/1993 (pp.E232 – E243) ^[34]	
W. Kreft, H.W. Thiemeyer and R. Beyer, Bekum ^[35]	<i>Define un procedimiento para diseño de ciclones vía modelación física en frío, seguida por modelación a temperatura en planta piloto (muy laboriosas y caras) y finalmente prototipo. La carga de polvo es menos importante que la velocidad de entrada, (a más velocidad de entrada por tiempo-menor eficiencia). La eficiencia solo es buena en un rango pequeño de velocidad.</i>
Wolfgang H. Koch, William Licht ^[36]	<i>Propone un procedimiento iterativo (prueba y error) de diseño. Se modifica geometría de ciclón propuesta y velocidades hasta alcanzar valores deseados de dP (caída de presión) y eficiencia de colección.</i>
Tulsi D. Taward, Frederick A. Zenz ^[37]	<i>Evalúa el efecto de la concentración de partículas en el cálculo de la eficiencia de colección.</i>
Akira OGAWA, Axel Rolf Winkler, Tsutomu OONO, Hayato OKABE, Taketo OYAGI, Noriaki AKIBA, Kazuya OGAWA, Wataru OONO, Seiiti SINYA, Masaharu WASHIZ ^[38]	<i>Se discute a detalle los resultados experimentales del efecto sobre la caída de presión del sentido del flujo de los gases en una cámara cilíndrica (Modificación del momentum angular para diferentes velocidades de entrada)</i>
L.M. Ludera ^[39]	<i>Muestra los principales problemas y diferencias de diseño en una línea de calcinación con precalentador en la industria del cemento, como son el efecto de temperaturas altas y separación parcial de partículas, así como el efecto de cambios en la geometría de ciclones.</i>
G Ramachandran, Jhon Dirgo, Henry Feldman ^[40]	<i>Obtiene un procedimiento de diseño de ciclones óptimo. La curva de diseño se obtuvo estudiando el comportamiento experimental de 98 ciclones y haciendo un análisis estadístico para la caída de presión variando la geometría del ciclón.</i>
Dominique Bonvin, D. A. Mellichamp, ^[41]	<i>Se analizan las ecuaciones diferenciales que representan al sistema. Se relacionan las variables del prototipo y del equipo real para usar el criterio de similitud dinámica y cambiar de escala.</i>
Lingjuan Wang, Calvin B. Parnell Jr, Ronald E Lacey ^[42]	<i>Se hace un balance de fuerzas y se plantean las ecuaciones diferenciales que rigen la dinámica del sistema, se usa el criterio de Barths (diámetro de corte d50) para estimar la eficiencia de colección. Se hacen mediciones experimentales y se ajusta una curva para tomar en cuenta la distribución de tamaño de partículas.</i>
G. Ramashndran, PC Raynor, D Lehith ^[32]	<i>Estudia el caso de ciclones con "pantallas" deflectoras rotacionales a separar partículas de aceite de una corriente de gases para escala industrial.</i>
P. A. Patterson, R. J. Munz, []	<i>El efecto de la carga de polvo tiene una influencia fuerte en la eficiencia de colección. Este efecto se ve incrementado a alta temperatura.</i>

1.7.1 Origen de la Dinámica de fluidos Computacional (CFD).

El origen de la Dinámica de fluidos Computacional como un producto comercial puede fijarse en los 70's, cuando Brian Spalding y Brian Launder en el Imperial Collage en U.K. proponen popularizar el modelo $k-\epsilon$ de turbulencia para usos industriales. Spalding capitaliza el interés generado en su trabajo sobre turbulencia para fundar la compañía "Concentration Heat and Momentum Ltd (CHAM)" en Wimbledon, Inglaterra en 1974.

CHAM desarrolla varios códigos que empiezan a consolidarse en uno sólo en los 80's llamándolo Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code (PHOENICS). La lógica de PHOENICS tiene su fundamento en una idea que Sushas Patankar tuvo en los 60's: "Escribir un código de uso general para resolver la ecuación de Navier Stokes". Este concepto se plasmó en un programa llamado GENMIX.

El programa PHOENICS tiene las siguientes características:

- Tiene un ambiente satelital de programas enlazados para resolver un caso
- Maneja hexaedros como elementos de la malla.
- Resuelve las ecuaciones de variación en régimen transitorio y en estado estable.
- El flujo de fluidos puede ser compresible o incompresible.
- Puede manejar flujo de fluidos, o bien, existir reacción química.
- Existe la opción de manejar una o varias fases.

FLUENT

Al mismo tiempo que PHOENICS se desarrolló en el Imperial College, un grupo de trabajo en la Universidad de Sheffield también en Inglaterra encabezados por Jim Swithenbank y Ferit Boysan quienes generan códigos de CFD para combustión. Este trabajo llamó la atención de Bart Patel de CREARE, un grupo de consultoría con base en Hanover , New Hampshire, USA. y por sugerencia de Patel's se desarrolló un código de propósito general conocido como FLUENT en 1983.

- Las principales características de FLUENT inicial son:
- Estructura de block con elementos hexaédricos.
- Estado estable.
- Flujo Laminar o turbulento.
- Transferencia de calor.
- Combustión.
- Fase dispersa.
- Convección Natural.

1.7.2 Modelación Física.

A finales de 1800, se empezaron a usar modelos físicos para estudiar aquellos fenómenos de flujo que no podían ser resueltos por medio de métodos analíticos. Los modelos añaden certeza en aquellos campos donde los cálculos se hacen sobre una teoría simplificada.

La similitud de los fenómenos de flujo no sólo ocurre entre un prototipo y su modelo, sino también puede existir entre varios fenómenos naturales si se satisfacen ciertas “leyes” de similitud_[59].

Existen tres tipos básicos de similitud (Geométrica, Cinemática y Dinámica) aplicados a mecánica de fluidos; todos ellos deben lograrse, sin embargo, en algunos casos especiales se obtiene una similitud efectiva y útil si se satisface sólo una parte de estos.

Principios de similitud:

- Geométrica: Establece que la geometría de los campos de flujo del modelo y del prototipo, tienen la misma forma (Dimensiones proporcionales $L_{\text{Modelo}} \sim L_{\text{Prototipo}}$).
- Cinemática: Si las relaciones entre las velocidades y las aceleraciones correspondientes son las mismas a través del flujo (Tiempo \sim Modelo \sim Prototipo).
- Dinámica: Las fuerzas que actúan sobre masas correspondientes de fluido deben estar relacionadas. ($F_{\text{Modelo}} \sim F_{\text{Prototipo}}$).

CÁBITULO 2

FLUJO DE FLUIDOS

RÉGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO

2.1 Introducción

La mecánica de fluidos es una materia madura; las ecuaciones y aproximaciones básicas se encuentran establecidas adecuadamente y se pueden hallar numerosos artículos y libros [56]. Por su naturaleza, los problemas de flujo de fluidos relacionados con el movimiento de gases con partículas en suspensión como los que se presentan en el diseño de un ciclón, se pueden captar mejor si se ilustran gráficamente; porque se permite valorar y analizar visualmente de forma adecuada las estructuras coherentes ó patrones de flujo [60], (propiedades globales y su conexión con las propiedades locales), esto es, entender la esencia del problema en una sola mirada.

Una vez comprendida la parte medular del flujo, se procede a establecer suposiciones y/o aproximaciones que deben ser justificadas para elaborar un modelo matemático que represente los mecanismos físicos que permitan resolver nuestro problema práctico [29],[31].

A continuación se revisan conceptos básicos de mecánica de fluidos para estudiar un ciclón en la industria del cemento a plena escala con una carga de partículas alta y temperaturas extremas [30]. Estos principios permiten formular un modelo matemático basado en la ecuación de conservación en régimen turbulento en varias fases (Ecuación de Navier Stokes –NS - y el Reynold stress model –RSM-).

En el inciso 2.2 se estudia el flujo laminar generalizando el concepto de viscosidad, definido por la ley de viscosidad de Newton, que relaciona el tensor de esfuerzo viscoso τ_{ij} con los gradientes de velocidad. Después, se estudia *el tensor de esfuerzo molecular* π_{ij} que se descompone en dos partes, una relacionada con *el tensor de presión* y otra con *el tensor de esfuerzo viscoso* ($\pi_{ij} = P\delta_{ij} + \tau_{ij}$), Posteriormente, se estudia *el tensor de esfuerzo debido al flujo convectivo* $\rho v_i v_j$ para finalmente obtener *el tensor de esfuerzo de flujo combinado en régimen laminar*.

$$\phi_{ij} = \pi_{ij} + \rho v_i v_j$$

El problema general de flujo de fluidos en régimen laminar es un problema matemáticamente difícil de resolver pero está bien planteado, esto es, el número de incógnitas es igual al número de ecuaciones. En el caso de flujo de fluidos en régimen turbulento es necesario introducir nuevas variables de fluctuación que se promedian en tiempo (Tiempo ajustado).

Dicho problema matemático actualmente tiene una jerarquía de ecuaciones infinita, por lo que podemos decir que el problema está mal planteado, ya que, el número de incógnitas es mayor que el número de ecuaciones, por lo tanto, se hace necesario introducir un modelo para la turbulencia y truncar la jerarquía de ecuaciones con un modelo de primer orden en el caso de esfuerzos de Reynolds.

En el punto 2.3 se estudia la distribución de velocidad en flujo turbulento. El cual se caracteriza por presentar variaciones caóticas violentas, sin embargo, es posible obtener soluciones numéricas de las ecuaciones de variación, pero, el esfuerzo computacional es muy elevado. Este problema se maneja en el punto 2.2.1 haciendo ajustes de tiempo en las ecuaciones de variación para fluidos incompresibles.

Supongamos por ejemplo que en un punto del fluido se observa que una componente de la velocidad es función del tiempo. *La velocidad se descompone en dos partes, una que es constante \bar{v}_z y la otra varía con el tiempo y la posición v' .*

$$v = \bar{v} + v' \quad , \dots \dots \dots (2-1)$$

Lo anterior se denomina en ocasiones “*descomposición de Reynolds*”, en donde el valor medio se obtiene a partir de $v_z(t)$ al sacar el promedio en el tiempo sobre un gran número de fluctuaciones. Además, el período de tiempo es lo suficientemente largo para proporcionar una función promediada ajustada. La cantidad \bar{v}_z se denomina velocidad con ajuste de tiempo, siendo independiente del tiempo aunque por supuesto depende de la posición. Cuando la velocidad con ajuste de tiempo no depende del tiempo, hablamos de un flujo turbulento impulsado de manera estable, esto aplica también para la presión.

El punto más importante de la teoría de la turbulencia es que los esfuerzos de Reynolds no están relacionados de manera simple con los gradientes de presión como sucede con los esfuerzos viscosos con ajuste de tiempo. Los esfuerzos de Reynold son función de la posición y la intensidad de la turbulencia. Para resolver problemas de flujo es necesario contar con información experimental sobre los esfuerzos, o bien, recurrir a alguna expresión experimental

En el punto 2.3 se estudian modelos de turbulencia como el de Boussinesq, longitud de mezclado de Prandtl, expresión de Von Karman para “L”, Modelo de turbulencia $k - \epsilon$ y finalmente el Reynold stress model (RASM).

Las ecuaciones de conservación de flujo multifase primero se estudian en un marco de referencia de Euler para gases y sólidos, donde ambas fases son completamente miscibles y después se estudia la fase gas en un marco de referencia de Euler y los sólidos en un marco de referencia de Lagrange.

2.2 Flujo laminar

En los problemas de interés en ingeniería algunos flujos son suaves y ordenados en tanto que otros son considerados caóticos. El movimiento intensamente ordenado de un fluido por capas no alteradas- de éste se conoce como régimen laminar o flujo viscoso. El movimiento intensamente desordenado de un fluido, que es común se presente a velocidades altas y se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad se llama turbulento.

A continuación se revisa el concepto de viscosidad que está muy relacionado con el flujo laminar.

2.2.1 Viscosidad ecuación general

Todo fluido ofrece una resistencia a cambiar de forma si el movimiento se hace en un intervalo de tiempo finito, la magnitud de la variación depende del tipo de fluido (Es alta para aceite y baja para el agua p.e). El concepto de viscosidad esto es la resistencia al cambio de forma en un fluido, se ha puesto en claro vía experimental a través de la conocida ecuación de Newton [46],[47], sin embargo, por lo general para trabajos de ingeniería se tiene interés en flujos complicados y se debe contar con una expresión general para la viscosidad. Si consideremos un patrón de flujo bastante general, donde la velocidad del fluido puede ser en varias direcciones en diversos sitios y puede depender del tiempo, entonces, las componentes de la velocidad están dadas por:

$$v_x = v_x(x, y, z, t); v_y = v_y(x, y, z, t); v_z = v_z(x, y, z, t)$$

En esta situación hay nueve componentes en el tensor de esfuerzos molecular π_{ij} , cada uno de estos esfuerzos se puede descomponer a su vez en dos, uno asociado a la presión y el otro relacionado con las fuerzas viscosas ($\pi_{ij} = P\delta_{ij} + \tau_{ij}$). Las fuerzas de presión se ejercen cuando el fluido esta estacionario o en movimiento. Las fuerzas viscosas por unidad de área sólo se ejercen cuando en el fluido hay gradientes de velocidad. En general los esfuerzos no son perpendiculares o paralelos al elemento superficial, sino que forman un ángulo respecto a la superficie.

Los esfuerzos viscosos pueden ser representados de una manera simplificada (No interviene el tiempo o elementos de segundo orden) como combinaciones lineales de todos los gradientes de velocidad:

$$\tau_{ij} = \mu_{ijkl} \frac{du_k}{dy_l} \quad , \dots \dots \dots (2-2)$$

donde i,j,k pueden tomar los valores 1, 2, y 3 (Se usa el convenio de suma para índices repetidos en tensores). Aquí las 81 cantidades $\mu_{i,j,k}$ son coeficientes de viscosidad y las derivadas son gradientes de velocidad.

Las suposiciones y observaciones para simplificar la ecuación se resume en la tabla siguiente:

Tabla No 2-1: Ecuación de esfuerzo viscoso (Simplificación del caso general):

Suposición	Ecuación	Observación
Las integrales con respecto al tiempo o sus derivadas no aparecen. Las derivadas de segundo orden no aparecen:	$\tau_{ij} = \mu_{ijkl} \frac{du_k}{dy_l}$	La dependencia con respecto al tiempo solamente se usa para fluidos visco- elásticos. En el caso de flujo gas – sólido en ciclones el comportamiento no Newtoniano es menos importante que el flujo turbulento.
No aparece ninguna fuerza viscosa, el fluido está en rotación pura [2].	$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \delta_{ij}$	τ_{ij} es una combinación simétrica de los gradientes de velocidad ($u_r=0$).
La ecuación para τ_{ij} se puede expandir en dos términos	$\tau_{ij} = \alpha \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \beta \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_m} \right) \delta_{ij}$	Los coeficientes de cada una de las dos expresiones deben ser escalares. El número de coeficientes de viscosidad se ha reducido de 81 a 6.
El fluido es anisotrópico para el esfuerzo.	$\tau_{ij} = A \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + B \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \delta_{ij}$ con A= α , B= β escalares	Se hace el cambio de variables para dar la forma final que aparece en la bibliografía [46]-
Para simplificar la ecuación se utilizó el caso.	Flujo de fluido newtoneano entre placas paralelas $\tau_{ij} = -\mu \frac{du}{dy}$	Entonces A= $-\mu$. La viscosidad μ es isotrópica.
Por un acuerdo entre especialistas.	$B = \frac{2}{3} \mu - \kappa$	Donde κ es la constante de viscosidad de dilatación. Para el caso de gases monoatómicos de baja densidad $\kappa = 0$
Ley de la viscosidad de Newton.	$\tau_{ij} = -\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \left(\frac{2}{3} \mu - \kappa \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \delta_{ij}$	Expresión general.

El tensor de esfuerzo viscoso simplificado para fluidos Newtonianos en 3D con una viscosidad isotrópica es:

$$\tau_{ij} = -\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \delta_{ij} \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

Este tensor es una ecuación diferencial con el mismo número de ecuaciones y de incógnitas, si se tiene las condiciones de frontera adecuadas la solución es única si existe.

2.2.2 Transporte de cantidad de movimiento convectivo

Hasta ahora hemos analizado el tensor de movimiento molecular o flujo laminar, lo que nos llevó a la ecuación ($\pi_{ij} = \tau_{ij} + P\delta_{ij}$) que representa la densidad de flujo de cantidad de movimiento perpendicular a “j” por el movimiento en la dirección “i”. Al relacionar π con los gradientes de velocidad y la presión encontramos que se requieren dos variables más μ y κ . Pero, la cantidad de movimiento puede, además, transportarse por medio del flujo volumétrico del fluido; este proceso se denomina transporte convectivo que se representa por:

$$\rho \mathbf{v}\mathbf{v} = \rho v_i v_j \text{ usando el convenio de doble índice para tensores.}$$

Aquí $\rho \mathbf{v}\mathbf{v}$ es un tensor de segundo orden que se denomina tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento convectivo. Si un fluido “fluye” a través de la superficie dS con una velocidad v , entonces el caudal volumétrico a través de la superficie, desde el lado negativo hacia el positivo, es $(\mathbf{n} \circ \mathbf{v})dS$. Por tanto, el caudal de cantidad de movimiento a través de la superficie es $\rho(\mathbf{n} \circ \mathbf{v})\mathbf{v}$. Esto también se puede escribir $(\mathbf{n} \circ \rho \mathbf{v}\mathbf{v})$ si dejamos que \mathbf{n} sea sucesivamente los vectores unitarios δ_i de manera semejante, la densidad de flujo de cantidad de movimiento molecular total a través de una superficie de orientación \mathbf{n} está dada por $(\mathbf{n} \circ \mathbf{v})dS[\mathbf{n} \circ \boldsymbol{\pi}] = p\mathbf{n} + \mathbf{n} \circ \boldsymbol{\tau}$. Se entiende que ésta es la densidad de flujo desde el lado negativo hacia el lado positivo de la superficie. Esta cantidad también puede interpretarse como la fuerza por unidad de área unitaria ejercida por el material del lado negativo sobre el material del lado positivo a través de la superficie de contacto.

La densidad de flujo de cantidad de movimiento combinado “ ϕ ” se define como: La suma de la densidad de flujo de cantidad movimiento molecular y la densidad de flujo de cantidad de movimiento convectivo.

Tabla No 2-2: Ecuación de esfuerzo combinado:

Densidad de flujo de cantidad de movimiento combinado	Términos
$\phi_{ij} = \pi_{ij} + \rho v_i v_j \quad \dots (2-4)$ $= P\delta_{ij} + \tau_{ij} + \rho v_i v_j \quad \dots (2-5)$	ϕ_{ij} : Densidad de cantidad de flujo combinado. π_{ij} : Densidad de cantidad de flujo molecular. $\rho v_i v_j$: Densidad de cantidad de flujo convectivo. $P\delta_{ij}$: Tensor de presión. τ_{ij} : Tensor de esfuerzos viscosos.

La conclusión importante es que se tiene una generalización de la ecuación de viscosidad de Newton y esta generalización implica dos constantes que caracterizan al fluido: la viscosidad μ y la viscosidad de dilatación κ . La viscosidad de dilatación es importante para describir la absorción del sonido en gases poli- atómicos, y para describir la dinámica de fluidos de líquidos que contienen burbujas gaseosas. Las componentes de los tensores de esfuerzo significan lo mismo en coordenadas curvilíneas que en coordenadas.

2.3 Distribución de velocidad en flujo turbulento

Hasta el momento se han analizado solamente problemas de flujo laminar. Se ha visto que las ecuaciones diferenciales que describen el flujo laminar se comprenden bien, además, para varios sistemas simples, la distribución de velocidad y otras cantidades derivadas pueden obtenerse de manera directa. El factor que limita la aplicación de las ecuaciones de variación es la complejidad matemática que se encuentra en problemas para los que las componentes de velocidad son función de varias variables. Algunos de estos problemas están siendo resueltos debido al rápido avance de la dinámica de fluidos computacional usando métodos numéricos.

Mientras que el flujo laminar es ordenado, el flujo turbulento es caótico. Es esta naturaleza aleatoria la que plantea toda clase de dificultades. Es posible preguntarse si las ecuaciones de variación son capaces de describir el movimiento con grandes fluctuaciones que se presentan en el flujo turbulento. Dado que el tamaño de los remolinos turbulentos es de varios ordenes de magnitud más grande que la trayectoria libre media de las moléculas del fluido, las ecuaciones de variación son aplicables. Es posible obtener soluciones numéricas de estas ecuaciones y usarlas para estudiar los detalles de la estructura de la turbulencia. Sin embargo, para uso de ingeniería no se está interesado en tal detalle, dado el esfuerzo computacional que se requiere para obtenerla. Es necesario utilizar métodos que permiten describir los perfiles de velocidad y presión con ajuste de tiempo.

La ecuación de movimiento con ajuste de tiempo contiene la densidad de flujo de cantidad de movimiento turbulento. Esta densidad de flujo no puede relacionarse de manera simple con los gradientes de velocidad de la forma en que la densidad de flujo de cantidad de movimiento está dada por la ley de Newton. En la actualidad, la densidad

de flujo de cantidad de movimiento turbulento suele estimarse experimentalmente, o bien, modelarse mediante algún tipo de ecuación obtenida con ayuda de un ajuste experimental.

Por fortuna, para el flujo turbulento cerca de una superficie sólida, hay algunos resultados generales que son útiles en fenómenos de transporte, los perfiles de velocidad logarítmicos y de la ley de la potencia para regiones más lejos de la pared, donde esta ley se obtiene por razonamientos dimensionales [32].

2.3.1 Ecuaciones de variación con ajuste de tiempo para fluidos incompresibles.

Se considera un flujo turbulento al que se le impone un gradiente de presión constante. Si en un punto del fluido se observa una componente de la velocidad como una función del tiempo, se encuentra que está fluctuando de manera caótica Fig. 2-1. Las fluctuaciones son desviaciones irregulares respecto a un valor medio. La velocidad real puede considerarse como la suma del valor medio \bar{v} , y la fluctuación v' esto es :

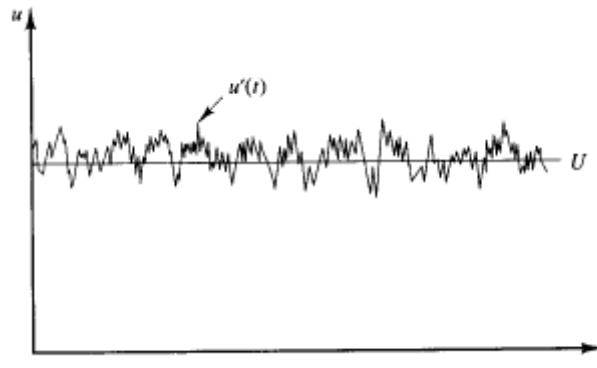
$$v = \bar{v} + v'$$


Fig 2-1 Oscilación de la componente de velocidad alrededor de un valor medio^[47].

Lo anterior algunas veces se denomina “descomposición de Reynolds”, obteniendo el valor medio a partir de $v_z(t)$ al sacar el promedio en el tiempo sobre un gran número de fluctuaciones:

$$\bar{v}_z = \frac{1}{t_o} \int_{t-\frac{1}{2}t_o}^{t+\frac{1}{2}t_o} v_z(s) ds$$

Donde el período de tiempo es lo suficientemente largo para proporcionar una función promediada ajustada. La cantidad \bar{v}_z se denomina velocidad con ajuste de tiempo, siendo independiente del tiempo aunque por supuesto depende de la posición. Cuando la velocidad con ajuste de tiempo no depende del tiempo, hablamos de un flujo turbulento impulsado de manera estable, esto aplica también para la presión y/o la turbulencia.

A continuación consideramos el flujo turbulento con un gradiente de presión dependiente del tiempo: En este flujo es posible definir cantidades con ajuste de tiempo como antes, aunque debe entenderse que el período debe ser pequeño respecto a los cambios en el gradiente de presión, pero grandes respecto a los períodos de las fluctuaciones. Para esta situación, la velocidad con ajuste de tiempo y la velocidad real se ilustra en la fig 2-1. se puede comprobar que:

$$\overline{v'_z} = 0, \quad \overline{v_z} = \bar{v}, \quad \overline{v_z v'_z} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \overline{v_z} = \frac{\partial}{\partial x} \bar{v}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \overline{v_z} = \frac{\partial}{\partial t} \bar{v}$$

La cantidad $\overline{v_z'^2} \neq 0$ y de hecho la razón $\frac{\sqrt{\overline{v_z'^2}}}{\langle \bar{v}_z \rangle} \neq 0$ puede considerarse como una medida de la magnitud de las fluctuaciones turbulentas. Esta cantidad conocida como intensidad de la turbulencia, puede tener valores que varían del 1 al 10% en la parte principal de una corriente, y valores de 25% o mayores en la vecindad de una pared sólida. Por tanto es necesario recalcar que no tratamos con perturbaciones ligeras, algunas veces son perturbaciones violentas y grandes (Cantidades como $\overline{v'_x v'_y} \neq 0$). La razón de esto es que los movimientos locales en las direcciones “x” y “y” están correlacionados. En breve veremos que estos valores con ajuste de tiempo de los productos de propiedades fluctuantes juegan un papel muy importante en la transferencia de la cantidad de movimiento turbulento.

Una vez que se han definido las cantidades con ajuste de tiempo y analizado algunas de las propiedades de las cantidades fluctuantes, ahora podemos pasar al ajuste de tiempo de las ecuaciones de variación. Solamente vamos a considerar las ecuaciones de continuidad y momentum para un fluido de densidad y viscosidad constante.

Sustituyendo “v” y “p” por su equivalente $v = \bar{v} + v'$ y $p = \bar{p} + p'$ en la ecuación tenemos:

Tabla No 2-3: Ecuaciones de conservación en régimen turbulento (Componente “x”):

Ecuación	Descripción
$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}_x + v'_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}_y + v'_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}_z + v'_z) = 0 \quad \dots (2-6)$	Continuidad
$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho(\bar{v}_x + v'_x) = & -\frac{\partial}{\partial x}(\bar{p} + p') - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho(\bar{v}_x + v'_x)(\bar{v}_x + v'_x) \right) \\ & - \left(\frac{\partial}{\partial y} \rho(\bar{v}_y + v'_y)(\bar{v}_x + v'_x) \right) - \left(\frac{\partial}{\partial z} \rho(\bar{v}_z + v'_z)(\bar{v}_x + v'_x) \right) \\ & + \mu \nabla^2 (\bar{v}_x + v'_x) + \rho g \end{aligned}$	Momentum componente “x”

Las componentes “y” y “z” de la ecuación de conservación de momentum pueden escribirse de manera semejante, simplificando obtenemos:

Tabla No 2-4: Ecuaciones de conservación en régimen turbulento (Componente “x”):

Ecuación	Descripción
$\frac{\partial}{\partial x} \bar{v}_x + \frac{\partial}{\partial y} \bar{v}_y + \frac{\partial}{\partial z} \bar{v}_z = 0 \quad \dots (2-6)$	Continuidad
$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho(\bar{v}_x) = & -\frac{\partial}{\partial x}(\bar{p}) - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho \bar{v}_x \bar{v}_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho \bar{v}_y \bar{v}_x + \frac{\partial}{\partial z} \rho \bar{v}_z \bar{v}_x \right) \\ & - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho \overline{v'_x v'_x} + \frac{\partial}{\partial y} \rho \overline{v'_y v'_y} + \frac{\partial}{\partial z} \rho \overline{v'_z v'_z} \right) + \mu \nabla^2 \bar{v}_x + \rho g \end{aligned}$ <p style="text-align: right;">... (2-7)</p>	Momentum componente “x”

Con relaciones semejantes para las componentes “y” y “z” de la ecuación de Momentum podemos concluir que:

La ecuación de continuidad es la misma salvo que se ha sustituido “v” por “ \bar{v} ”. En la ecuación de momentum también se cambiaron los valores de “v” y “p” por “ \bar{v} ” y “ \bar{p} ”. Es posible volver a escribir la ecuación usando el tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento turbulento $\bar{\tau}^{(t)}$ con componentes:

$$\bar{\tau}_{xx}^{(t)} = \overline{\rho v'_x v'_x}, \quad \bar{\tau}_{xy}^{(t)} = \overline{\rho v'_x v'_y}, \quad \bar{\tau}_{xz}^{(t)} = \overline{\rho v'_x v'_z} \text{ y así sucesivamente}$$

Estas cantidades se denominan esfuerzos de Reynolds. También es posible introducir los símbolos para $\overline{\tau}^{(v)}$ la densidad de flujo de cantidad de movimiento viscoso con ajuste de tiempo

$$\overline{\tau}_{xx}^{(v)} = -2\mu \frac{\partial \overline{v}_x}{\partial x}, \quad \overline{\tau}_{xy}^{(v)} = -\mu \left(\frac{\partial \overline{v}_x}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v}_y}{\partial x} \right)$$

Esto permite escribir las ecuaciones de variación en forma vector – tensor:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \overline{v} = -\nabla \overline{p} - [\nabla \circ \rho \overline{v} \overline{v}] - [\nabla \circ (\overline{\tau}^{(v)} + \overline{\tau}^{(t)}) + \rho \mathbf{g}]$$

La conclusión principal es que la ecuación de movimiento en términos del tensor de esfuerzo puede adaptarse para flujo turbulento con ajustes de tiempo en cualquiera de los sistemas de coordenadas dado.

Por fin hemos llegado al punto más importante de la teoría de la turbulencia, los esfuerzos de Reynolds no están relacionados de manera simple con los gradientes de presión como sucede con los esfuerzos viscosos con ajuste de tiempo. Los esfuerzos de Reynold son función de la posición y la intensidad de la turbulencia. Para resolver problemas de flujo es necesario contar con información experimental sobre los esfuerzos, o bien, recurrir a alguna expresión experimental.

En realidad es posible obtener ecuaciones de variación para los esfuerzos de Reynolds [33]. Sin embargo, estas ecuaciones contienen cantidades como $\overline{v_i v_j v_k}$. De manera semejante, las ecuaciones de variación contienen la siguiente correlación de orden superior $\overline{v_i v_j v_k v_l}$. Es decir, se tiene una jerarquía sin fin de ecuaciones que es necesario resolver. Por lo que para resolver problemas de flujo debe truncarse esta jerarquía mediante la introducción de datos experimentales. Si usamos estos datos para los esfuerzos de Reynolds entonces tenemos una teoría de primer orden, si usamos estos datos experimentales para $\overline{v_i v_j v_k}$ tenemos una teoría de segundo orden.

El problema de introducir datos experimentales para obtener un conjunto de ecuaciones que pueden resolverse para la distribución de velocidad y presión, se denomina “Problema de taponamiento”; Expresiones experimentales para la densidad de flujo de cantidad de movimiento turbulento.

2.4 Modelos de turbulencia

Para hallar los perfiles de velocidad mediante la ecuación de esfuerzo combinado, es preciso disponer de alguna expresión para el esfuerzo turbulento. Con este fin se han utilizado diversas relaciones semi – empíricas que solamente se mencionan aquí y se resumen en la tabla 2-5, tales como: el modelo de viscosidad de Boussinesq, Longitud de mezclado de Prandtl, Hipótesis de Von Karman, modelo de turbulencia $k-\epsilon$ y modelo de turbulencia Reynold Stress model (RASM) y algunos modelos que se usan más en CFD.

En la tabla 2 – 5 se hace un resumen de los diferentes modelos de turbulencia

Tabla No 2-5: Modelos de turbulencia

Modelo	Ecuación	Observaciones
<p>1) Viscosidad de remolino de Boussinesq.</p>	$\overline{\tau'_{ij}} = -\mu^t \frac{d\overline{u}_i}{dx_j}$ $\mu^t = \mu + \eta$ <p>μ^t: Viscosidad turbulenta. μ: viscosidad, η: viscosidad aparente.</p> <p>Expresión de Von Karman para “L”</p> $L = \kappa \frac{\left(\frac{du}{dy}\right)}{\left(\frac{d^2u}{dy^2}\right)}$ <p>“L” tiene dimensiones de longitud y desde el punto de vista dimensional debe ser proporcional a “y”, puede suponer $L = \chi y$, así resulta:</p> $\left(\frac{u}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}\right) = \frac{1}{\kappa} \frac{dy}{y}$ <p>Integrando.</p> $\left(\frac{u}{u^*}\right) = \frac{1}{\kappa} \ln(y) + C$ <p>Finalmente tenemos:</p> $u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C; \quad \kappa=0.41, C=0.52$	<p>La viscosidad turbulenta es ante todo una propiedad del flujo.</p> <p>Observar que al sustituir esta expresión en la ecuación de Von Karman para “L” resulta que L ~ y; además que $\frac{d^2u}{dy^2}$ es negativo, porque el gradiente de velocidad decrece conforme aumenta “y”.</p>
<p>2) Longitud de mezclado de Prandtl.</p>	$\tau^t = \rho u' v'$ $u' \sim v' \sim L \frac{du}{dy}$ $\tau^t = \rho L^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$	<p>Prandtl desarrollo una teoría de la turbulencia donde se pueden obtener expresiones para “u’”, “v’” en función de una distancia “L”, llamada longitud de mezcla y del gradiente de velocidad du/dy. [60]</p>

Tabla No 2-5: Modelos de turbulencia (Continuación)

<p>3) Expresión de Von Karman para “L”.</p>	$L = \kappa \frac{\left(\frac{du}{dy} \right)}{\left(\frac{d^2u}{dy^2} \right)}$ <p>“L” tiene dimensiones de longitud y desde el punto de vista dimensional debe ser proporcional a “y”. se puede suponer $L = \chi y$, así resulta:</p> $\left(\frac{u}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} \right) = \frac{1}{\kappa} \frac{dy}{y}$ <p>Integrando</p> $\left(\frac{u}{u^*} \right) = \frac{1}{\kappa} \ln(y) + C$ <p>Finalmente resulta:</p> $u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C ; \quad \kappa=0.41, C=0.52$	<p>Considerando algunas relaciones de semejanza Von Karman sugirió la expresión para “L”, donde “k” es una constante universal para flujos turbulentos sin importar la geometría de las fronteras ni el valor del Re . [60]</p>
<p>4) Modelo algebraico de esfuerzo.</p>	$R_{ij} = \overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \left(\frac{C_D}{C_1 - 1 + \frac{P}{\varepsilon}} \right) \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right)$ <p>$C_D = 0.55$ y $C_1 = 2.2$</p>	<p>El esfuerzo de Reynold aparece en ambos lados de la ecuación R_{ij} y P_{ij} resultando un conjunto de seis ecuaciones algebraicas que se resuelven por una inversión matricial o por técnicas iterativas.</p>

Los modelos de esfuerzo turbulento donde la viscosidad μ^t es una constante, o bien, donde se calcula por una ecuación algebraica son usados para calcular el esfuerzo cercano a las paredes o cercano a donde interactúa el fluido con las condiciones de frontera sólida.

Tabla No 2-6: Modelos de turbulencia k - ε

<p>5) Modelo de turbulencia k – epsilon (k - ε)</p>	<p>$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$: Viscosidad efectiva.</p> <p>$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$: Viscosidad turbulenta.</p> <p>$p' = p + \frac{2}{3} \rho k$</p> <p>Se requiere introducir dos ecuaciones más :</p> $\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon$ $\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P_k - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon)$ <p>Donde :</p> $P_k = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}$ <p>$C_\mu=0.09, C_{\varepsilon 1}=1.44, C_{\varepsilon 2}=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$</p>	<p>El modelo de turbulencia k-ε usa una viscosidad efectiva agregando dos ecuaciones más al sistema para igualar con el número de incógnitas.</p> <p>La viscosidad turbulenta está en función de la energía cinética del sistema “k” y de la velocidad de disipación de energía “ε”.</p> <p>El modelo k - ε no da resultados apropiados para flujos altamente rotacionales como los que se dan en el interior de un ciclón.</p>
---	--	---

El modelo k-ε fue muy usado entre 1980 y 1990 por ser fácil de programar y computacionalmente económico^[28]. Actualmente se usa para problemas donde existe reacción química, transferencia de calor por radiación y los modelos tienen malla muy grandes y se requiere velocidad de cálculo por las limitantes de capacidad de la máquina disponible para resolver el problema.

En el caso de ciclones el modelo k - ε no es adecuado, esto se discutirá con más detalle al revisar el caso I. Finalmente se presenta *el método de Renold (RSM) que es lo suficientemente robusto para simular el flujo altamente rotacional y disipativo de un ciclón*

Tabla No 2-7: Modelos de turbulencia RASM

<p>6) Modelo de turbulencia Average Reynold stress model (RASM)</p>	$R_{ij} = \frac{Du_i u_j}{\partial t}$ $\frac{Du_i u_j}{\partial t} = P_{ij} + D_{ij} + \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij}$ <p>P_{ij}: Producción.</p> $P_{ij} = -\left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)$ <p>D_{ij}: Convección difusión.</p> $D_{ij} = -\left(\overline{u_i' u_j' u_k'} + \frac{1}{\rho} \left(\overline{p' u_i'} \delta_{ij} + \overline{p' u_j'} \delta_{ik} \right) \right) - \nu \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k}$ <p>φ_{ij} : Término de esfuerzo de presión se puede descomponer en dos partes.</p> $\varphi_{ij,1} = -c_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \kappa \right)$ $\varphi_{ij,2} = -c_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P_k \right); c_1=1.8, c_2=0.6$ <p>ε_{ij}: Disipación.</p> $\varepsilon_{ij} = 2\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right)$ <p>El modelo incluye ecuaciones para:</p> $u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C; \quad \kappa=0.41, C=0.52$	<p>Este modelo está basado en las ecuaciones de transporte para todas las componentes del tensor de esfuerzo.</p> <p><i>La velocidad de disipación, es apropiado para casos donde la turbulencia es anisotrópica y no usa la hipótesis de viscosidad de remolino.</i></p> <p>Una ecuación para el esfuerzo de transporte en el fluido es resuelta para cada componente del esfuerzo.</p> <p>Las ecuaciones diferenciales, dadas para cada componente del esfuerzo de Reynolds, son desarrolladas y se resuelve para cada componente de esfuerzo.</p> <p>Se considera anisotropía en el término de esfuerzo turbulento. [47]</p>
---	--	---

El flujo de fluidos en un ciclón es altamente rotacional y los modelos simples de una o dos ecuaciones pierden los detalles finos que son importantes en la operación o el diseño de un ciclón^[2].

El costo computacional del modelo RASM es adecuado para resolverse con la capacidad de las computadoras actuales. Existen además los algoritmos mencionados en las tablas 2-5, 2-6 y 2-7 implementados en los programas de simulación mediante volumen finito CFD Fluent (Manual del usuario).

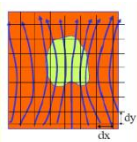
2.5 Ecuación de conservación de flujo multi-fase

El análisis de fluidos normalmente se hace tomando un marco de referencia fijo (Euler), o bien, en el caso de manejar partículas en suspensión puede hacerse siguiendo la trayectoria de las partículas individuales en un marco de referencia móvil (Lagrange). Este marco de referencia puede girar, que es excelente para casos de combustión de partículas de tamaño finito.

2.5.1 Modelo de Euler para las Fases de Gases y Sólidos

Las dos fases están perfectamente mezcladas, pueden estar en cualquier proporción una en la otra con una miscibilidad completa. El movimiento del fluido se estima con promedios locales. A continuación se resume en la tabla 2-8 las ecuaciones de continuidad y momentum:

Tabla No 2-8: Ecuaciones de continuidad y momentum

Modelo	Ecuación
Continuidad	$\frac{\partial \rho_{\alpha}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\alpha} u_{\alpha i}}{\partial x_i} = 0$  <p style="text-align: center;">Se toman promedios locales</p>
Momentum	$\frac{\partial \rho_{\alpha} u_{\alpha i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_{\alpha i} u_{\alpha j})}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \rho u_{\alpha i}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{\alpha} \overline{u'_{\alpha i} u'_{\alpha j}}) + \rho_{\alpha} g$ <p>Donde podemos descomponer el término de esfuerzo viscoso en:</p> $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \rho u_{\alpha i}}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_{\alpha i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{\alpha j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \rho u_{\alpha l}}{\partial x_l} \right) \right]$

El subíndice α se refiere a la fase (Gas, sólido), ρ es la densidad de la fase, t representa el tiempo y μ es la viscosidad, Finalmente, u representa el vector de velocidad, definido por las ecuaciones promedio de Reynold_[8] -Ecuaciones de variación de tiempo ajustado-

$$u = \bar{u} + u'$$

En la ecuación (2) $\overline{\rho u'_{\alpha i} u'_{\alpha j}}$ es el tensor de esfuerzo de Reynold. Estas ecuaciones son generales y al momento de aplicarlas a un caso se deben considerar las restricciones apropiadas para simplificar el caso.

Se han desarrollado métodos numéricos particulares para resolver el sistema de ecuaciones anterior. Para Ciclones donde el flujo es altamente rotacional, el tradicional método k-ε de turbulencia presenta limitaciones [4],[7]. Para obtener valores que estén de acuerdo a datos experimentales del esfuerzo de Reynold, se utiliza aquí un modelo de turbulencia, conocido como Modelo de Turbulencia de Reynold (RSM)[28].

2.5.2 Modelo de Euler para la fase gas y Lagrange para Sólidos

- La “fase” sólida se considera “discreta” o dispersa, para efecto práctico desde un punto de vista numérico se consideran diferentes densidades para tamaños diferentes de partículas (también pueden ser considerados como fases diferentes).

- El flujo de gases genera un patrón rotacional con simetría axial en la parte cilíndrica y como consecuencia la interfase entre fluido - pared puede considerarse como una velocidad cero en la pared del ciclón.

- Fase con densidad media se ha estudiado y tiene una reología newtoniana

- Se usa una curva Rosin - Rambler para la distribución de tamaños de partícula

- La dispersión de partículas es considerado con un modelo estocástico. El modelo es válido cuando el efecto de segregación es despreciado, las partículas están presentes en una fase diluida.

Tabla No 2-9: Ecuaciones de continuidad y momentum para interacción fase gas –fase sólida

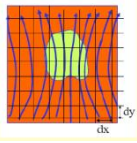
Modelo	Ecuación
Fase Gas	<p>Marco de referencia de Euler Modelo continuo :</p> <p>Continuidad:</p> $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x_i} = 0$  <p>Momentum para el gas: Se toman promedios locales</p> $\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u u)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \rho u}{\partial x_j} \right) + \rho g_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{u u}}{\partial x_j} \right)$ <p>Donde podemos descomponer el término de esfuerzo viscoso en:</p> $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \rho u}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x_j} + \frac{\partial u}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \rho u}{\partial x_i} \right) \right]$

Tabla No 2-9 (Continuación): Ecuaciones de continuidad y momentum para interacción fase gas –fase sólida

<p>Fase Sólida</p>	<p>Marco de referencia de Lagrange:</p> $\frac{\partial u_{pi}}{\partial t} = \frac{F_k}{24} + F_g + F_{ak} + F_{af}$ $F_k = \frac{18\mu C_D Re_p}{d_p^2 \rho_p} \quad F_g = g_i \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right)$ $F_{ak} = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) \frac{d}{dt} (u_i - u_{pi}) \quad F_{af} = \left(\frac{\rho}{\rho_p} \right) u_{pi} \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$ <p>Donde: F_k= Fuerza de Stock. F_{ak}= Fuerza Arquímedes. F_g= Fuerza gravitacional. F_{af}= Fuerza por curvatura del espacio.</p> <p style="text-align: right;">Flujo alrededor de partículas Individuales Se toman promedios locales</p>
<p>Fase Sólida</p>	<p>Schiller and Newmann (manual del usuario Fluent):</p> $C_D = \left\{ \begin{array}{l} \frac{Re_p}{24} \text{ si } Re_p \leq 1 \\ 24(1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \text{ si } 1 < Re_p \leq 1000 \\ 0.44 \text{ si } Re_p > 1000 \end{array} \right\}$ <p>Schuh et al:</p> $C_D = \left\{ \begin{array}{l} 24(1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \text{ si } 0 < Re_p \leq 200 \\ \frac{24(0.91 Re_p^{0.282} + 0.013 Re_p)}{Re_p} \text{ si } 200 \leq Re_p \leq 2500 \\ 0.4008 \text{ si } Re_p > 2500 \end{array} \right\}$ $Re_p = \frac{d_p \rho_p \varphi_g - \varphi_p }{\mu}$

El patrón de flujo de las partículas es modelado usando un marco de referencia de Lagrange. La trayectoria individual de cada una de las partículas es calculada integrando el balance de fuerzas por medio de un método numérico de Runge Kutta [50][51].

Cuando la partícula interactúa con los remolinos del fluido u' , v' y w' se obtienen a partir de una distribución de Gauss con una desviación estándar de $(2k/3)^{0.5}$ [34],[35].

La interacción entre partículas y los remolinos no debe ser mayor que el tiempo de vida y el tamaño de los remolinos.

Un número máximo de pasos basado en el tiempo de residencia de las partículas se debe fijar. El choque entre partículas y las paredes del ciclón son perfectamente elásticas

Capítulo 3 MÉTODOS NUMÉRICOS

3.1 Transformación de las ecuaciones de conservación en forma discreta

La forma de las ecuaciones de conservación de Navier Stokes (NS) y la de continuidad se discutieron en el capítulo anterior, aquí se presenta la forma de resolverlas numéricamente usando el método de volumen finito. Escribiendo la forma integrada de las ecuaciones de la tabla 2-9 utilizando la variable ϕ para facilitar la generación de una subrutina, con un algoritmo fácil de adaptar, para resolver el sistema de ecuaciones del modelo haciéndole cambios pequeños y en forma automática.

$$\int \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int S_{\phi} dV \dots \dots \dots .(3-1)$$

Donde se ha representado la variable sobre la que se está haciendo el balance como ϕ . Esta variable toma el valor de uno cuando se hace el balance de materia en el volumen de control y el valor de la velocidad en la dirección “x”, ”y”, “z” cuando se esta haciendo el balance de cantidad de movimiento (Momentum).

El término de la izquierda representa la acumulación de masa o cantidad de movimiento en el volumen de control. el segundo término representa el flujo neto convectivo de masa o momentum según sea el caso. El primer término de la derecha del signo de igual representa el flujo difusivo de masa o el tensor de esfuerzo viscoso, finalmente el último termino representa la generación o destrucción de la propiedad ϕ .

Para resolver numéricamente la ecuación, el volumen de control se divide en N celdas y se genera una malla. La ecuación toma la siguiente forma en la celda o nodo.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{fases}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{fases}}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \dots \dots \dots .(3-2)$$

Paso 1:

El método del volumen finito es la generación de una malla dividiendo el volumen de control en una serie de celdas. Al punto del centro se le asigna un número. La interfase de las celdas se encuentra a la mitad entre los centros de dos celdas vecinas.

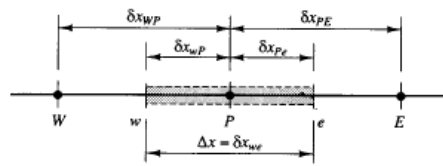


Fig 3-1 Celda de control

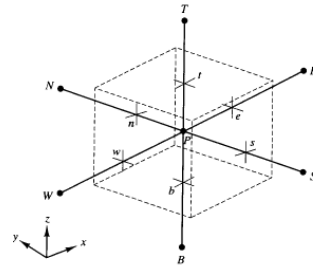


Fig 3-2 Volumen de control

Existe un convenio que se sigue para nombrar las caras Norte (N), Sur (S), Este (E), Oeste (W), Superior (T) e Inferior (B). El punto del centro ó nodo se representa por P y la longitud de la arista o cara de la celda se representa por $\Delta x_i = \delta x_i$ ($i = x, y$ ó z).

Paso 2:

La integración de las ecuaciones de conservación estabilizada sobre el volumen de control en el punto P_i y extendiéndolo a todo el volumen, primero renglón por renglón, luego columna por columna y finalmente plano por plano hasta alcanzar todo el espacio.

Para integrar numéricamente las ecuaciones primero se tienen que hacer discretas, esto se logra cambiando las derivadas continuas y los gradientes por sus ecuaciones en diferencias, Se usaron dos métodos, Usando el primer orden y el UpWind de segundo orden.

En el método UpWind de primer orden se procede como sigue:

- La propiedad de difusión se interpola en las fronteras del nodo “i” como sigue:

$$\Gamma_{i-1} = (\Gamma_{i-1} + \Gamma_i) / 2$$

$$\Gamma_{i+1} = (\Gamma_{i+1} + \Gamma_i) / 2$$

- El flujo difusivo es evaluado de la forma:

$$(\Gamma_i A \nabla \phi)_{i-1} = \Gamma_{i-1} A (\phi_{i-1} - \phi_i) / \delta x_i$$

$$(\Gamma_i A \nabla \phi)_{i+1} = \Gamma_{i+1} A (\phi_i - \phi_{i+1}) / \delta x_i$$

En el método UpWind de segundo orden se consigue una aproximación más precisa, y se logra haciendo una expansión en series de Taylor en el centro de la celda, para obtener valores en la cara de la celda:

$$\phi_{\text{face}} = \phi + \nabla \phi \bullet \mathbf{r}$$

Los valores de ϕ y $\nabla\phi$ son valores centrados y “r” es el vector de desplazamiento desde la parte superior de la celda hasta el centro de la celda. Esta formulación requiere el valores del gradiente $\nabla\phi$ en cada celda.

Para resolver casos prácticos el término de fuentes se debe evaluar por interpolación lineal.

- Metodo de Gren – Gaus basado en la celda

$$\langle \phi_{\text{face}} \rangle = (\phi_{i-1} + \phi_{i+1}) / 2$$

También se puede usar un método de interpolación lineal Green – Gauss basado en los nodos vecinos.

$$\langle \phi_{\text{face}} \rangle = 1/N \sum \langle \phi \rangle_n$$

En el método de segundo orden UpWind los gradientes están limitados para evitar oscilaciones que aparecen en el campo de solución de velocidad o el de esfuerzos, sobre todo cerca de discontinuidades, cambios rápidos locales generado por la linealización de las ecuaciones. Estos “picos” superan el valor máximo o mínimo de los nodos vecinos.

Normalmente se usan dos métodos para suavizar el gradiente, el estándar y el diferencial. En ambos casos se limita el camino entre la celda y la cara ó entre celda y celda.

Paso 3:

Las expresiones de la ecuación de continuidad y la de momentum en estado estable, generan un sistema de ecuaciones algébricas, después de agrupar se resuelven en forma secuencial utilizando el algoritmo SIMPLE (Semi – Implicit)_[58], o bien, el SIMPLER (Simple review)

Algoritmo secuencial basado en la presión Método Simple – SimpleR

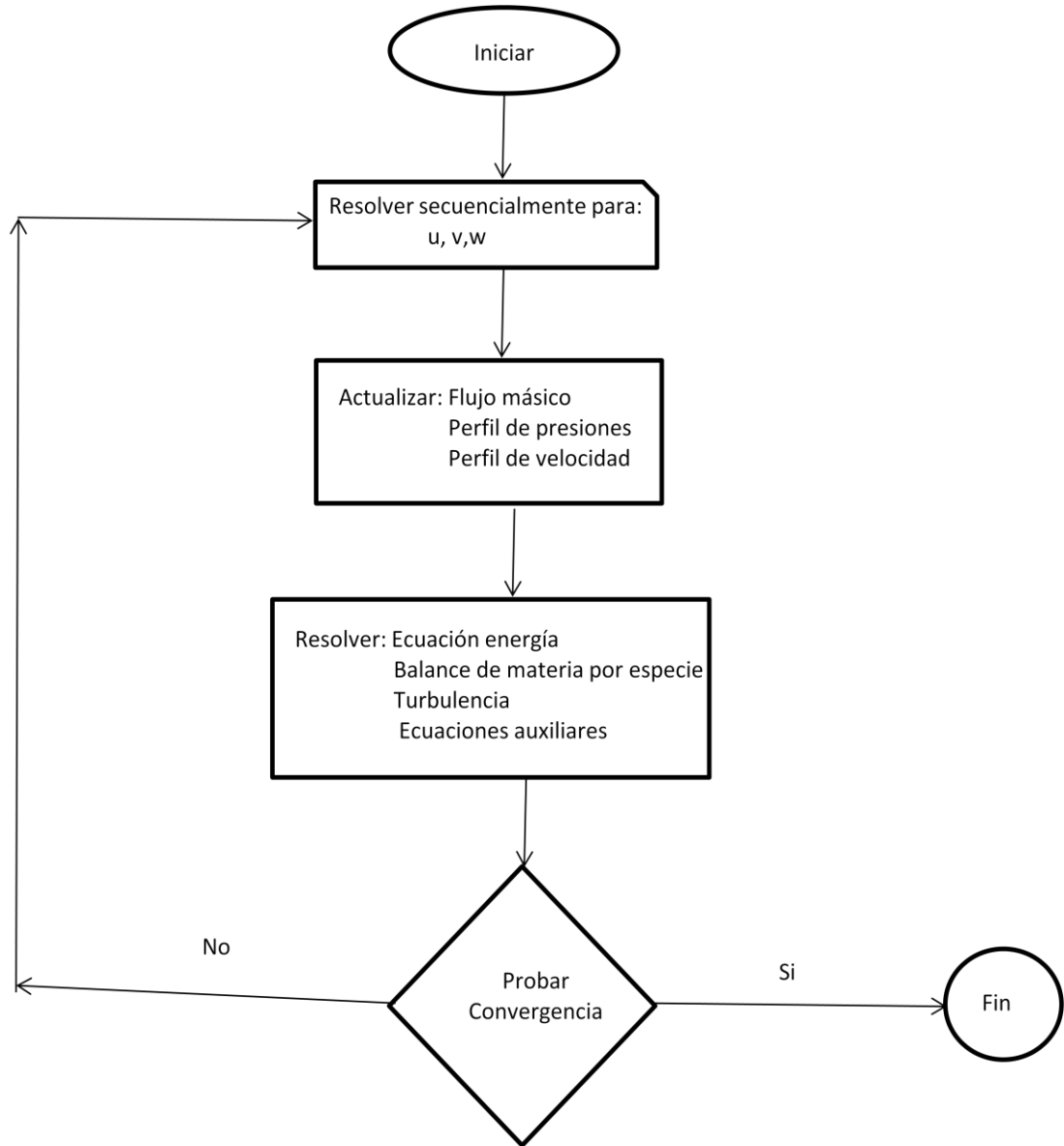


Fig 3-3 Diagrama de flujo Algoritmo Secuencial (La ecuación de continuidad se obtiene de la ecuación general haciendo $f=1$ y la ecuación de momentum con $f=U_i$)

Continuidad:

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0$$

Momentum

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = -\int p I \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int \vec{F} dV$$

Sobre relajación de las variables.

En el algoritmo SIMPLE y en el SIMPLER al iterar se utiliza una técnica de sobre relajación de las variables con el propósito de suavizar el gradiente entre iteraciones dado la no linealidad de las ecuaciones a resolver.

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi$$

Sobre relajación de ecuaciones

La sobre relajación de ecuaciones lo que se hace es dividir el paso de integración en N etapas y se hace una transición más suave al checar que el gradiente no sea mayor a un valor prefijado.

3.2 Solución de ecuaciones

Una vez que las ecuaciones diferenciales se transformaron a un sistema de ecuaciones algebraicas se procede a resolverlas. Existen dos formas de atacar el problema, una forma directa y otra indirecta ó iterativa. Un ejemplo de métodos directos es el de la regla de cramer y el de eliminación de Gauss. El número de operaciones para resolver un sistema de N ecuaciones por un método directo es de N^3 . La cantidad de coeficientes almacenados en la memoria es de N^2 .

Los métodos iterativos están basados en aplicar repetidamente un algoritmo que garantice eventualmente la convergencia. Los métodos iterativos de Jacobi y el de Gauss – Sidel requieren N operaciones por ciclo de iteraciones sin la forma corrector adelantada. La mayor ventaja de los métodos iterativos es que solamente se requiere guardar los coeficientes diferentes de cero en la memoria.

Es común en CFD usar un método TDMA_[50] (Tri Diagonal Matrix Algebraic) desarrollado por Thomas en 1949. El método TDMA es actualmente un método directo para problemas en una dimensión y es iterativo para problemas con geometría compleja en dos y tres dimensiones, resolviendo línea por línea, el costo computacional es bajo y la memoria usada es mínima.

El método de Jacobi y el de Gauss Sidel son de uso general para resolver en un punto las ecuaciones con un algoritmo fácil de implementar. Pero, generalmente pobres en la velocidad de convergencia cuando el número de ecuaciones N es grande. Es posible su uso en CFD sólo cuando se implementa una técnica de aceleración de convergencia MultiNivel_[19].

- **Matriz tridiagonal (TDMA)**

Consideremos el sistema de M ecuaciones algebraicas para cada una de las N líneas o columna con condiciones de frontera en $\phi_{(1, Ni)}$ y $\phi_{(m+1, Ni)}$ (sistema que tiene un arreglo de matriz tridiagonal_{[50],[51]})

$$\begin{aligned} \phi_{1, Ni} &= C_1 \\ -\beta_2 \phi_1 + D_2 \phi_2 - \alpha_2 \phi_3 &= C_2 \\ -\beta_3 \phi_2 + D_3 \phi_3 - \alpha_3 \phi_4 &= C_3 \\ -\beta_4 \phi_3 + D_4 \phi_4 - \alpha_4 \phi_5 &= C_4 \\ \dots \\ -\beta_n \phi_{n-1} + D_n \phi_n - \alpha_n \phi_{n+1} &= C_{n+1} \\ \phi_{m+1, Ni} &= C_{n+1} \\ -\beta_2 \phi_1 + D_2 \phi_2 - \alpha_2 \phi_3 &= C_2 \end{aligned}$$

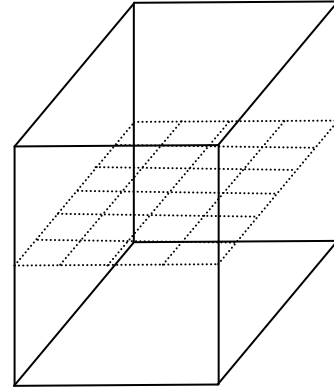


Fig 3-4 Plano Nodos con MXN ecuaciones

El sistema se resuelve despejando la variable i de la ecuación i.

$$\phi_n = \frac{\alpha_n}{D_n} \phi_{n+1} + \frac{\beta_n}{D_n} \phi_{n-1} + \frac{C_n}{D_n}$$

La solución se obtiene finalmente por sustitución inversa de las variables para $i=2, i=M$

$$\phi_j = A_j \phi_{j+1} + C'_j$$

Para , $i=j$

$$A_j = \frac{\alpha_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}}$$

$$C'_{j-1} = \frac{\beta_j C'_{j-1} + C_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}}$$

Para obtener los valores de las variables en $\phi_{1,i}$ y ϕ_{n+1} hacemos uso de las condiciones de frontera.

$$A_1 = 0$$

$$C'_1 = \phi_1$$

$$A_{n+1} = 0$$

$$C'_{n+1} = \phi_{n+1}$$

- **Método iterativos**

En los métodos iterativos puntuales_{[50],[51]} para resolver sistemas de ecuaciones, como primer paso, se despeja de la ecuación número uno la incógnita x_1 , de la ecuación dos la incógnita x_2 ; y así sucesivamente hasta tener en el lado izquierdo cada una de las incógnitas. El segundo paso consiste en dar valor(es) inicial(es) a las variables desconocidas y proceder a iterar hasta encontrar la solución.

- **Metódo de Jacobi**

- En el método de Jacobi_{[50], [51]}, el valor de la variable x_i ($i=1,2,3,..m$) en la iteración k , se obtiene sustituyendo en la ecuación para $x_i^{(k)}$, el valor de las variable calculado en la iteración $(k-1)$. Para iniciar el proceso se debe suponer una solución del sistema de ecuaciones completo (Normalmente $x_i^{(0)} = 0$), y proceder a calcular el valor para $k=1,2..p$ hasta converger.

$$x_i^{(k)} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left(\frac{a_{ij}}{a_{ii}} \right) x_j^{(k-1)}$$

En forma matricial tenemos:

$$X^{(k)} = T \cdot X^{(k-1)} + C$$

Donde T es la matriz de iteración y c es un vector constante

$$T_y = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{a_y}{a_u} \leftrightarrow i \neq j \\ 0 \leftrightarrow i = j \end{array} \right\}$$

$$c_i = \frac{b_i}{a_{ii}}$$

- **Metodo de Gauss – Sidel**_{[37], [38]}

El método de Gauss –Sidel es similar al de Jacobi_{[50],[51],[52]}, sólo que usa los valores que se van calculando en la iteración k .

$$x_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{a_{ij}}{a_{ii}} \right) x_j^{(k)} + \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{a_{ij}}{a_{ii}} \right) x_j^{(k-1)} + \frac{b_i}{a_{ii}}$$

O bien escrito en forma matricial

$$x^{(k)} = T_1 x^{(k)} + T_2 x^{(k-1)} + c$$

$$T_{1ij} = \begin{cases} -\frac{a_{y}}{a_u} \leftrightarrow i > j \\ a_u^- \\ 0 \leftrightarrow i \leq j \end{cases}$$

$$T_{2ij} = \begin{cases} 0 \leftrightarrow i \geq j \\ -\frac{a_{ij}}{a_{ii}} \leftrightarrow i < j \\ a_{ii} \end{cases}$$

$$c_i = \frac{b_i}{a_{ii}}$$

3.3 Estrategia de solución

Para resolver el sistema de ecuaciones se usa una técnica MultiNivel donde se toma la fila "i" y en la medida que se calculan los resultados de los nodos se interpolan hacia filas vecinas reduciendo el número de iteraciones.

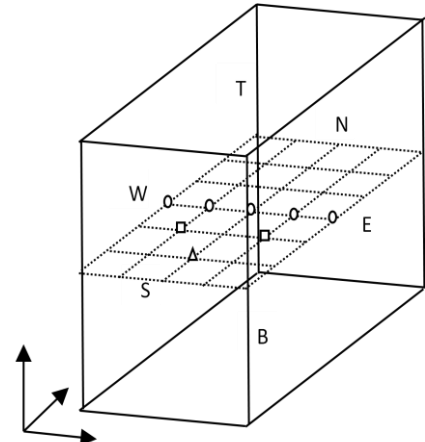


Fig. 3-5

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Introducción.

Se simularon tres casos en estado estable, con una geometría en tres dimensiones en una computadora portátil Toshiba Satellite con un procesador intel pentium 4. Se utilizó Fluent 6.0.12, ampliamente usado para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales parciales de las ecuaciones de variación. El paquete usa el método de volumen finito para hacer discretas las ecuaciones diferenciales y transformarlas en un sistema de ecuaciones algebraicas, para así poder resolverlas numéricamente mediante una metodología SIMPLE (Semi implicit)_[25] en forma segregada, acelerando la velocidad de convergencia con un algoritmo MultiNivel_[19].

Las ecuaciones de los modelos físicos usados fueron: La turbulencia para la fase fluida se representó con el modelo RASM_[28]. La fase de sólidos se simuló mediante el modelo DPM_[15], [Manual usuario Fluent].

Dos de los casos se simularon con la geometría inicial del sistema y uno con una geometría propuesta para resolver el problema de operación inestable.

El caso No I se corrió con una velocidad de entrada de los gases al ciclón en un rango entre 13.2 m/s y 15 m/s. La densidad de los gases fue de 0.345 kg/m³ y se usó una viscosidad de 2.5 kg/(m-s). El caso No II se corrió con una velocidad de entrada de gases propuesta en un rango de velocidad de entre 18.2 m/s y 21 m/s, el valor de la densidad y la viscosidad fue la misma que en el caso I.

La carga de partículas para ambos casos fue de 72.2 kg /s (Representa una producción del sistema de 3800 t/d) con una distribución granulométrica en el rango de 1.8 a 170 micras. El tamaño promedio de partículas fue de 37 micras.

El caso No III se corrió con la geometría propuesta modificando el área de entrada de gases y el ducto de descarga de gases. La velocidad de gases entrando al ciclón fue en un rango de velocidad 18.3 m/s a 21 m/s. La densidad de gases y la viscosidad usada fue la misma que en el caso I.

La carga de partículas para este caso III fue de 80.4 kg/s (representa una producción del sistema de 4600 t/d). La distribución granulométrica fue la misma que en los casos uno y dos.

4.2 Casos de estudio I, II y III

Geometría: La geometría es en 3D para tomar en cuenta las aportaciones de las diferentes componentes del tensor de esfuerzos turbulentos^{[45],[47],[48]}. A continuación se presentan dos tablas con las geometrías adimensional^{[54],[56],[61]} para los casos I, II y III en forma adimensional.

Tabla 4-1: Geometría de Ciclón para el caso I y II (D= 5.670m)

Variable	Propuesta Original Atec	
		Adimensionales
Diámetro Ciclón	[=] D/D	1.0
Diámetro superior	[=] D _s /D	1.447
Diámetro de vortex	[=] D _v /D	0.635
Altura total	[=] H/D	1.629
Altura cilindro	[=] h ₁ /D	0.222
Altura cono sup.	[=] h ₂ /D	0.300
Altura cono medio	[=] h ₃ /D	0.694
Diámetro cono inf.	[=] D _{ci} /D	0.390
Altura cono inf.	[=] h ₄ /D	0.412
Altura Vortex	[=] S/D	0.282
Altura Entrada	[=] a/D	0.523
Ancho de la entrada	[=] b/D	0.669
Salida polvo	[=] B/D	0.149
Ángulo de voluta		270

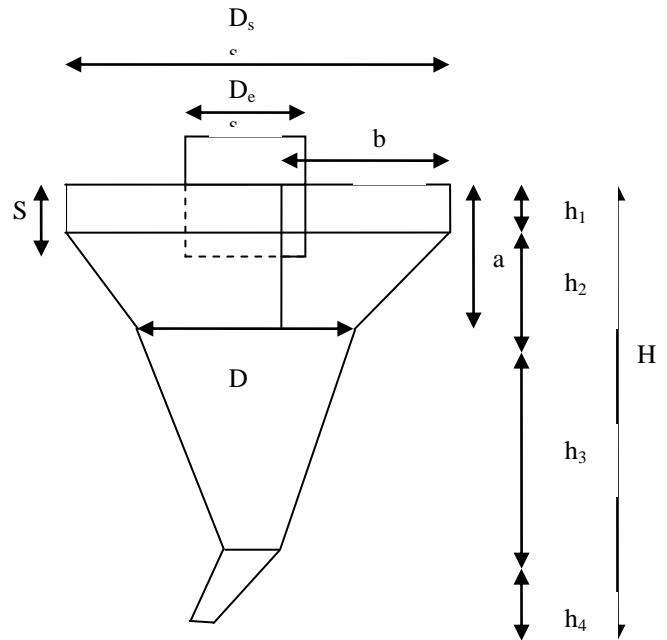


Fig. 4-1 Ciclón caso I $V_{Inicial} = 13.2$ m/s
Ciclón caso II $V_{Inicial} = 18.3$ m/s

Tabla No 4-2: Geometría Ciclón caso III (D= 5.670m)

Variable	Propuesta Original Atec	
		Adimensionales
Diámetro Ciclón	[=] D/D	1.0
Diámetro superior	[=] D _s /D	1.180
Diámetro de vortex	[=] D _v /D	0.564
Altura total	[=] H/D	1.629
Altura cilindro	[=] h ₁ /D	0.145
Altura cono sup.	[=] h ₂ /D	0.363
Altura cono medio	[=] h ₃ /D	0.068
Diámetro cono inf.	[=] D _{ci} /D	0.319
Altura cono inferior	[=] h ₄ /D	0.586
Altura cono inf. 2	[=] h ₅ /D	0.467
Altura Vortex	[=] S/D	0.410
Altura Entrada	[=] a/D	0.441
Ancho de la entrada	[=] b/D	0.502
Salida polvo	[=] B/D	0.078
Ángulo de voluta		270

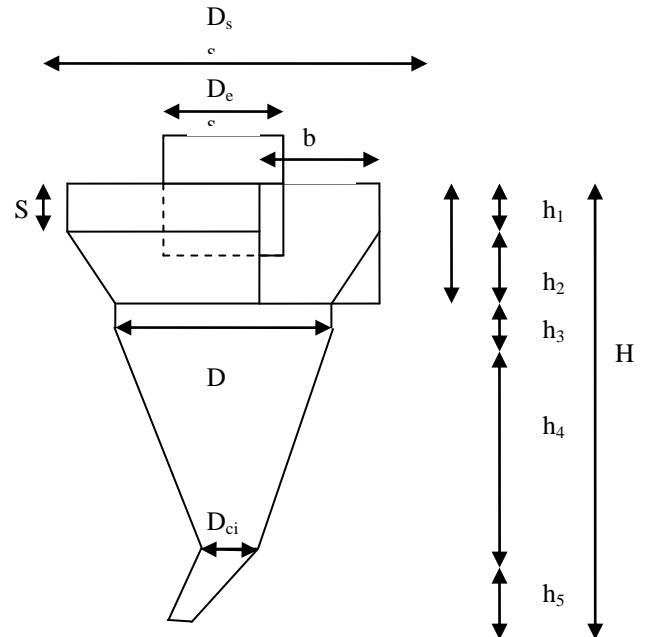


Fig. 4.2 Ciclón caso III $V_{Inicial} = 18.3$ m/s

Malla Semi-estructurada Casos I y II:

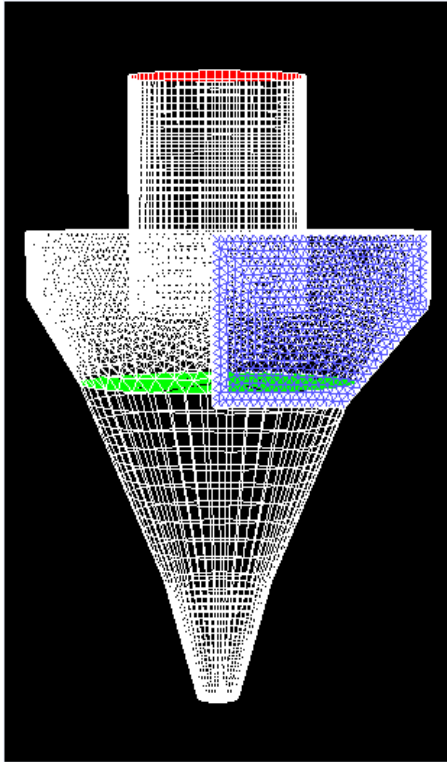


Fig. 4-3 Malla Caso I y II 104110 celdas

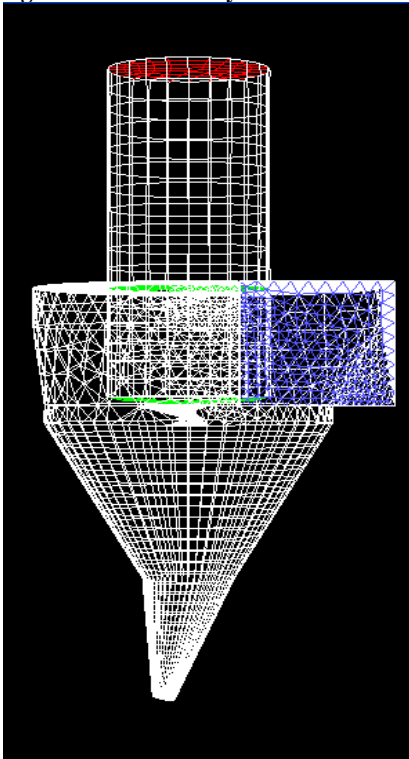


Fig. 4.4 Malla Caso III con 18377 celdas

La malla se construyó semi-estructurada para facilitar su construcción y para que con “pocas” celdas (18000 a 100000) se garantice una solución independiente de la malla.

La malla del caso No I y II, fig 4-3 se construyó con Gambit 2.0, un pre-procesador de Fluent 6.0.12

La malla es semi-estructurada con 104110 celdas, se utilizó un método MultiNivel^[19] con hasta un máximo de 25 niveles para suavizar la solución numérica del caso y disminuir el número de iteraciones, además de, acelerar la convergencia.

Se hicieron pruebas de sensibilidad y se determinó que la calidad de la malla permitía una solución independiente de la malla.

Malla Semi - estructurada: Caso III (fig. 4-4)

La malla del caso No III en la fig 4-4 se construyó también con Gambit 2.0

La malla es semi-estructurada con 18377 celdas, se utilizó un método MultiNivel^[19] con hasta un máximo de 25 niveles para suavizar la solución numérica del caso y disminuir notablemente celdas de la malla y el número de iteraciones (acelerar la convergencia).

También se hicieron pruebas de sensibilidad y se determinó que la calidad de la malla permitía una solución independiente de la malla aun y cuando era 5 veces más pequeña que la del caso I y II.

Condiciones de frontera: Casos I, II y III.

Las condiciones de frontera para los tres casos fueron: La velocidad de entrada de gas en el ciclón se distribuyó uniformemente en la cara de entrada. Las partículas también se inyectaron en la cara de entrada del ciclón con una distribución de Rossin Rammler a la misma velocidad de entrada y temperatura que los gases. En cada inyección la distribución de Rosin Rammler se dividió en diez tamaños. La condición de frontera utilizada para definir si una partícula es atrapada o escapa del ciclón fue: toda partícula que toque la superficie de salida de gases del ciclón se contabiliza como que ha escapado. Toda partícula que toque la pared del ciclón en la parte cilíndrica se considera que rebota en un choque 100% elástico. Toda partícula que toque la parte cónica del ciclón se considera atrapada, cualquier choque entre partículas se considera también 100 % elástico.

La trayectoria de cada una de las partículas sigue un modelo estocástico con 25000 pasos y una longitud escalada por paso de 0.25m, se inyectaron un total de 21600 partículas por inyección (21600x10). Para calcular el tiempo de residencia de las partículas se utilizaron las trayectorias individuales y se promediaron.

Perfil de velocidad fig 4-5

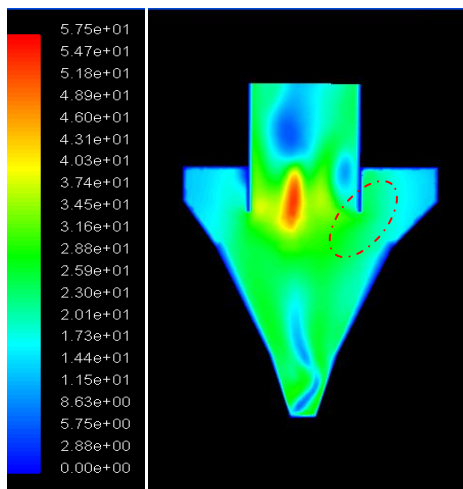


Fig. 4-5 Caso I Perfil de velocidades [-] m/s
 $V_{inicial} = 13.2 \text{ a } 15 \text{ m/s}$

Solución: Caso I: $V=13.2 \text{ m/s}$

El flujo de gases medido en campo a una producción de 3800 t/d fue de 363164 m³/h. La velocidad de entrada de los gases al ciclón era de 13.2 m/s con una carga de partículas de 72.2 kg/s. La temperatura de operación del cicló fué de 826 °C.

El perfil de velocidad de la fig No 4-5 tiene una forma típica para esta tecnología, con una espiral en el centro del ciclón y el flujo cargado hacia las paredes del ciclón_{[2],[3]}.

En la entrada del cono se nota una zona muerta o de muy baja velocidad que afecta la eficiencia de colección de partículas. El campo de velocidades genera un campo de fuerzas centrífugas que hace que las partículas se peguen a las paredes y sean colectadas_[6].

En la parte baja del cono el perfil de velocidades se incrementa mejorando la captación de partículas, sin embargo, existe una zona de Bypass entre el vortex y la entrada del ciclón.

El patrón de flujo ó estructura coherente_[11] a un Reynold para la fase gas de 6.9×10^5 (Régimen turbulento) no promueve la captación de partículas en la parte superior del ciclón. La relación de velocidad máxima en el vortex del ciclón a la velocidad promedio de entrada es de 4.4 a 5.0 valor alejado del esperado de 2.5_□

Perfil de presión Fig. 4-6

Caso I: $V=13.2 \text{ m/s}$

El dato de caída de presión en el ciclón se calcula con el diferencial entre el valor promedio de la entrada y el de la salida (30.43 mbar), el dato medido en campo es de 28 mbar.

La distribución de caída de presión no es “uniforme”, como se puede apreciar, el valor máximo se encuentra en la parte superior izquierda. Existe una zona de baja presión en el centro del ciclón y el mínimo se localiza en el vortex.

La estructura coherente^[23] para la distribución de presión mostrada en la Fig. 4-6 es atípica para ciclones evaluados a un número de Euler de 97.6, el valor esperado del número de Euler para una tecnología de ciclón a baja presión a las condiciones de operación del sistema es de 23.9

Perfil de turbulencia Fig. 4-7

Caso I: $V=13.2 \text{ m/s}$

Se aprecia en la parte superior del ciclón que la disipación de energía turbulenta es muy bajo. El valor promedio de la energía cinética en el plano X-Z mostrado es de $16.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$, el valor esperado para esta tecnología^{[45],[46],[47]} es de $31.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Esto causa que exista un Bypass de partículas desde la entrada del ciclón hacia el vortex.

La temperatura de operación era de 826°C @ una producción de 3800 t/d.

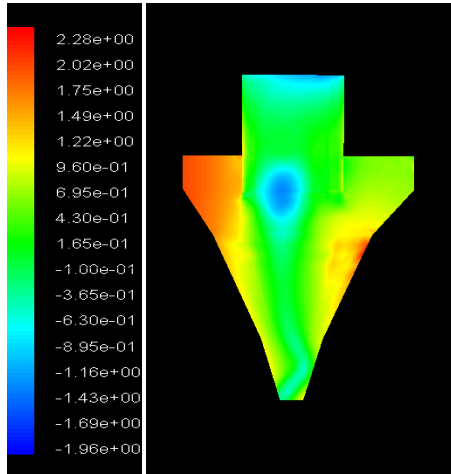


Fig. 4-6 Caso I Perfil de presiones [=] pulgadas CA
 $V_{\text{Inicial}} = 13.2 \text{ m/s}$

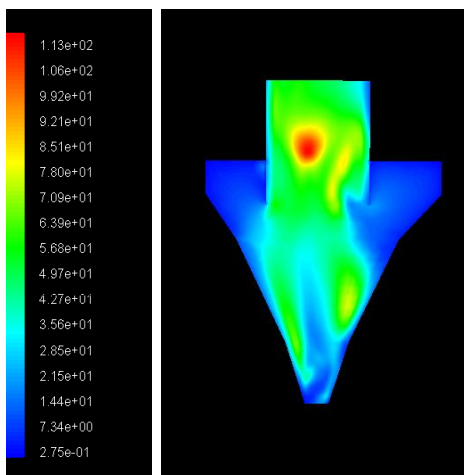


Fig. 4-7 Caso I Perfil de Turbulencia [=] m^2/s^2
 $V_{\text{Inicial}} = 13.2 \text{ m/s}$

La energía cinética turbulenta^[47] tiene un valor de $16.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y el deber ser para un ciclón de baja caída de presión es de $31 \text{ m}^2/\text{s}^2$. El campo de velocidad, presión y turbulencia para gases se comportan como un atractor^{[9],[13]}. El caso cumple una condición necesaria pero no suficiente.

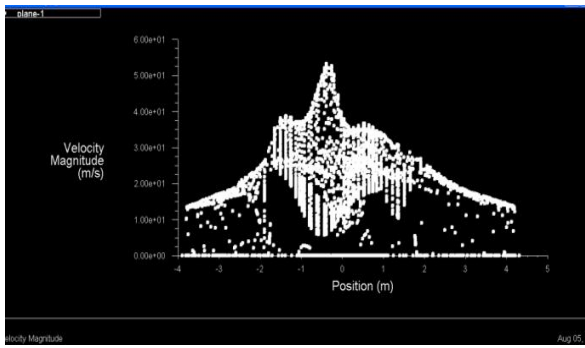


Fig. 4-8 Caso I Perfil de Velocidad en el plano X-Z [=]m/s
 $V_{Inicial} = 13.2$ [=] m/s

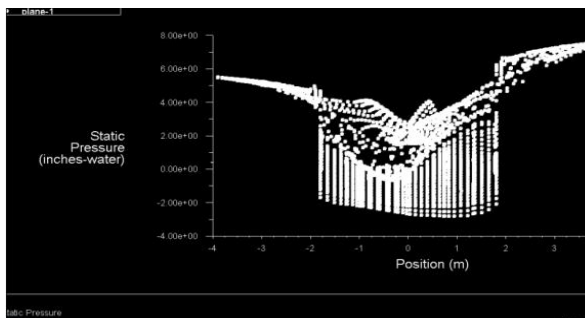


Fig. 4-9 Caso I Perfil de Presiones en el plano X-Z [=] pulgadas CA
 $V_{Inicial} = 13.2$ [=] m/s

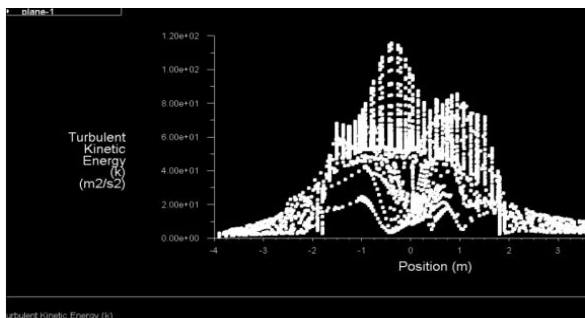


Fig. 4-10 Caso I Perfil de Turbulencia en plano X-Z [=] m²/s²
 $V_{Inicial} = 13.2$ [=] m/s

Perfil de velocidad en el plano X-Z

Caso I: $V=13.2$ m/s

En la Fig. 4-8, se puede apreciar más claramente como la velocidad máxima se da en el centro del ciclón (vortex) y como en el cuerpo del ciclón tenemos una relación de velocidad máxima a velocidad media de 2.5 valor reportado en bibliografía_[6].

Perfil de presiones en el plano central X-Z

En la Fig. 4-9 se muestra en forma evidente que el diferencial de presiones estáticas promedio es de 30 mbar (12.4 pulgadas de CA).

Perfil de turbulencia en el plano X-Z

Se puede apreciar en la Fig. 4-10 como existe un patrón casi simétrico de disipación de energía por turbulencia_[14].

El valor máximo y el mínimo de energía cinética turbulenta están sobre la misma vertical.

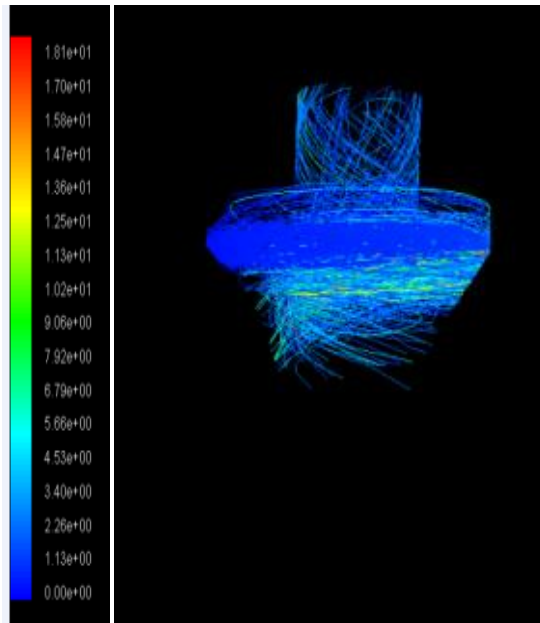


Fig. 4-11 Caso I tiempo de residencia [=] s
 $V_{\text{inicial}} = 13.2$ [=] m/s

Tiempo de residencia de las partículas Fig. 4-11

Caso I: $V=13.2$ m/s

El volumen del ciclón que se simuló es de 237.5 m^3 .

El flujo volumétrico de gases en el ciclón para el caso I es de $133.7 \text{ m}^3/\text{s}$

El tiempo de residencia promedio de los gases_[42] dentro del ciclón es de 1.78 s.

El tiempo de residencia máximo de las partículas dentro del ciclón es de 18.1 s.

Como se puede observar las partículas tienden a permanecer en la parte superior del ciclón lo que provoca una baja eficiencia de colección.

Existe una “acumulación” de partículas dentro del ciclón que hace que a largo

plazo colapsen y se generen inestabilidades (se forma un pulso). El tamaño de las partículas que tienen un tiempo de residencia “infinito” están alrededor de 20 micras de diámetro

Solamente al calcular la trayectoria de las partículas es cuando se detecta de una forma cuantitativa el origen del problema de inestabilidad.

En términos matemáticos, la solución de la dinámica del sistema gas-sólido se comporta como un conjunto límite y no como un atractor_[10]. La relación del tiempo de residencia de las partículas al de los gases es: $\tau_p = \tau_g$ 10.2

La solución y/o el patrón de flujo para los casos de caída de presión, turbulencia y velocidad sí se comportan como atractor_{[10],[12]}.

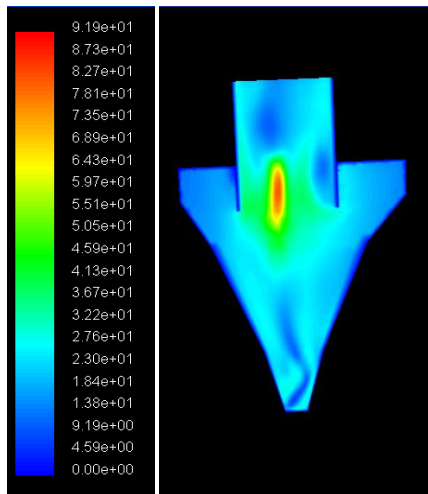


Fig. 4-12 Perfil de velocidad [m/s]
 $V_{Inicial}=18.3$ [m/s]

Perfil de velocidad fig. 4-12

Solución Caso II: $V=18.3$ m/s

El flujo de gases se ajustó en la entrada del ciclón^[21] para obtener una velocidad de 18.3 m/s. La velocidad máxima se incrementó de 57.5 m/s en el caso I a 91.9 m/s localizada en el vortex.

Como se puede observar la forma del patrón de velocidades (Estructura coherente^[12]) es similar al del caso I con una velocidad promedio en el cuerpo del ciclón en el mismo rango de 25 m/s aprox.

El campo de velocidades tiene un atractor evaluado a un Reynold de 9.6×10^5 .

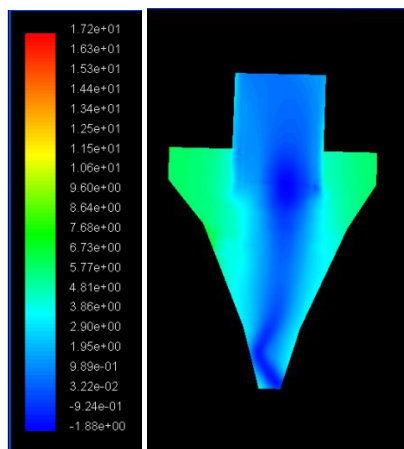


Fig. 4-13 Perfil de presiones [pulgadas CA]
 $V_{Inicial}=18.3$ [m/s]

Perfil de presión fig. 4-13.

La presión máxima se encuentra en la parte superior del ciclón, este valor es demasiado alto. La caída de presión en el ciclón es de 15.9 mbar (6.39 pulgadas de CA). La menor caída de presión se encuentra en el vortex y en el centro del ciclón.

El campo de presiones^[22] tiene un atractor evaluado a un Euler de 26.8 contra el de 23.8 para esta tecnología de baja caída de presión.

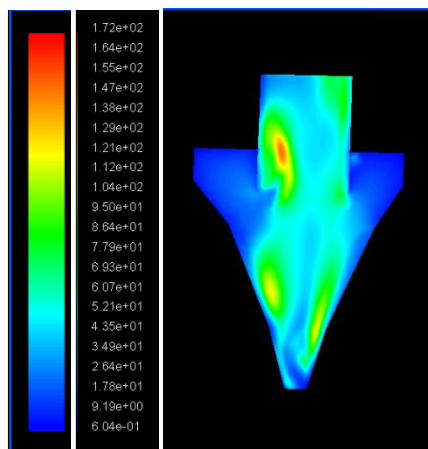


Fig. 4-14x Perfil de turbulencia [m²/s²]
 $V_{Inicial}=18.3$ [m/s]

Perfil de turbulencia fig. 4-14.

El campo de turbulencia entre la entrada del ciclón y el vortex empieza a incrementarse, sin embargo, el incremento promedió $23.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ es menor que el esperado de $31.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

El valor máximo de energía cinética turbulenta se encuentra en el vortex y en las paredes del cono del ciclón como era de esperarse.

El campo de turbulencia^[20] tiene un atractor estimado a una energía cinética turbulenta de $23.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

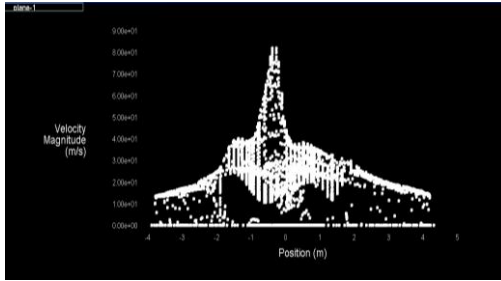


Fig. 4-15 Perfil de Velocidad [=] m/s
 $V_{Inicial}=18.3[=] m/s$

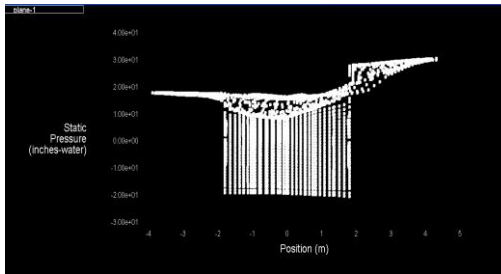


Fig. 4-16 Perfil de presión [=] pulgadas CA
 $V_{Inicial}=18.3[=] m/s$

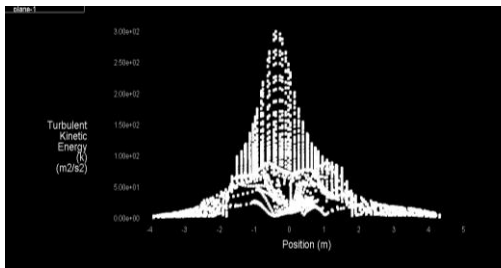


Fig. 4-17 Perfil de Turbulencia [=] m^2/s^2
 $V_{Inicial}=18.3[=]m/s$

Perfil de velocidad en el plano X-Z.

Caso II: $V=18.3m/s$

El perfil de velocidades en el plano X-Z Fig. 4-15 es más simétrico que en el caso I y la velocidad media está en el orden de 30 m/s. La velocidad máxima está en el orden de 90 m/s ,valor alto en comparación del esperado para un flujo turbulento ($V_{max} = 2V_{Promedio}$).

Perfil de presión en el plano X-Z.

El perfil de presión es más plano.

Perfil de turbulencia en el plano X-Z.

El patrón de la turbulencia es más simétrico que en el caso I. Aquí el máximo y el mínimo se encuentran sobre la misma vertical

En general en este caso II existe una mejora comparado con los resultados del caso I.

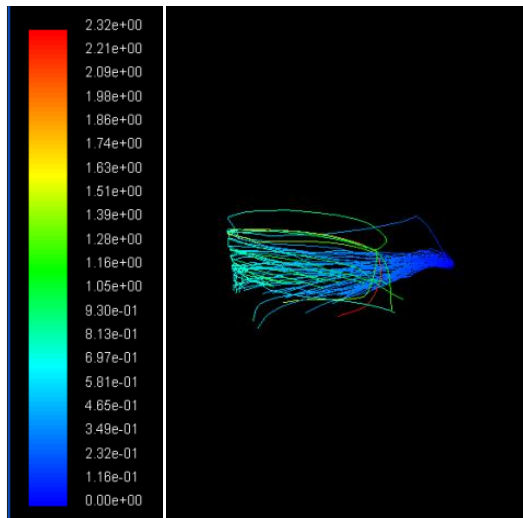


Fig. 4-18 Caso II Tiempo de residencia de partículas [=] s
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3 \text{ m/s} [=] \text{m/s}$

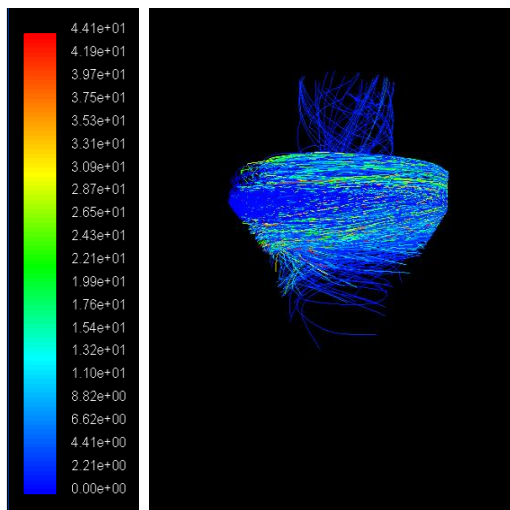


Fig. 4-19 Caso II Tiempo de residencia de partículas [=] s
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3 [=] \text{ m/s}$

Tiempo de residencia de las partículas

Caso II: $V=18.3 \text{ m/s}$

El tiempo de residencia de las partículas Fig. 4-18 para el caso II converge, pero no es consistente. La dinámica del sistema tiene una solución multi - valuada.

Al calcular el tiempo de residencia de las partículas se obtienen dos resultados, el primero es de 2.32 s, el segundo es de 44.1 s.

El cambio de condiciones de operación (incrementar la velocidad de entrada de 13.2 a 18.3 m/s) tienden a estabilizar el sistema hacia un valor cercano al tiempo de residencia de los gases 1.28 s.

La solución converge y presenta una ligera oscilación al iterar, pero la calidad de la malla es suficiente para alcanzar el criterio de convergencia normalizado (ver detalles del modelo en el Anexo B).

La solución no es consistente (Converge a dos valores) lo que refleja que el modelo es capaz de captar la inestabilidad física de operación.

Las partículas permanecen todavía mucho tiempo en la parte superior del ciclón y es difícil capturarlas $\tau_p = \tau_g 1.8$ para una corrida y $\tau_p = \tau_g 34$ para la otra.

La eficiencia de colección se incrementa en 12 puntos a estas condiciones de operación con respecto al caso I.

Nuevamente la solución de la dinámica del sistema gas-sólido se comporta como un conjunto límite y no como un atractor^{[9],[13]}.

La solución de la dinámica de los gases (El patrón de flujo –Velocidad, Presión y Turbulencia) se comportan como atractor^[10].

El flujo de gases se midió en el rango de 412638 m³/h a una producción de 4184 t/d con el ciclón del caso III instalado y operando sin problemas después de estabilizar el sistema. A una presión medida de 12.8 mbar y 804°C después de arreglar

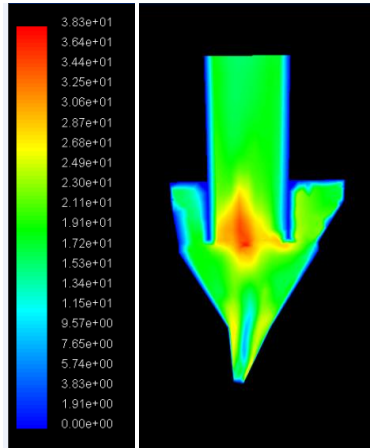


Fig. 4-20 Perfil de velocidad [=] m/s
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3 \text{ [m/s]}$

Perfil de velocidad

Solución Caso III: $V=18.3 \text{ m/s}$

El perfil de velocidades Fig. 4-20 se ve con una distribución más uniforme en todo el ciclón y en la sección cónica se aprecia el incremento de velocidad mejorando la eficiencia de colección pasando de 40 % en el caso I a 60-70 % en este caso.

La velocidad máxima es 2 veces la velocidad de entrada y cumple la misma relación con la velocidad promedio en el cuerpo del ciclón ($38 \sim 2V_{\text{Promedio}}$), El valor reportado en la literatura especializada es de 2 a 2.5_{[17],[38]}.

El campo de velocidades es también un atractor evaluado a un Reynold de 9.6×10^5 .

Perfil de presión.

La caída de presión Fig. 4-21 media es de 12.8 mbar, se puede ver que la presión es más homogénea y que en el vortex la presión es pequeña lo que hace que exista un “equilibrio dinámico”; esto es, que la columna de partículas en suspensión o arrastradas sea menor que en los casos I y II y por ende la eficiencia de colección sea mayor.

La eficiencia también se ve favorecida porque el perfil de presiones hace que la fuerza centrífuga sea más intensa en el cono del ciclón.

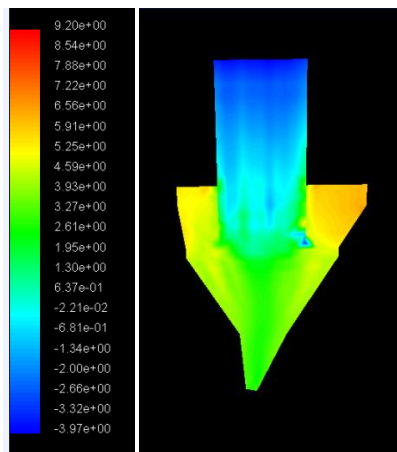


Fig. 4-21 Perfil de presiones [=]pulgadasCA
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3 \text{ [m/s]}$

El atractor de presión se evaluó a un número de Euler de 51 contra el deber ser de un ciclón de baja caída de presión de 23.8

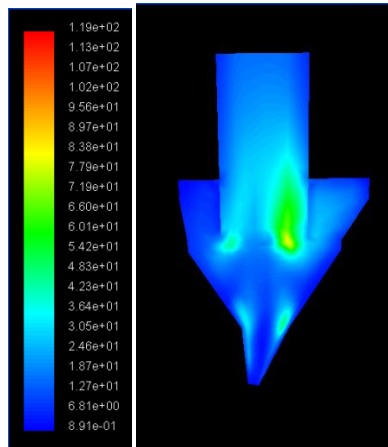


Fig. 4-22 Perfil de turbulencia [=] m^2/s^2
 $V_{Inicial} = 18.3$ [=]m/s

Perfil de turbulencia.

La disipación de energía cinética turbulenta Fig. 4-22 se realiza en la parte baja del ciclón y en el vortex, el máximo se encuentra localizado hacia el lado derecho.

El flujo de gases estaba en el rango de $468400 \text{ m}^3/\text{h}$ @ 4184 toneladas/día. Al llevar el sistema a máxima capacidad se alcanzaron 4600 t/d en forma estable (en 24 h) de operación con un temperatura de gases de 804°C

El atractor se evaluó a una energía cinética turbulenta de $23.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ contra el deber ser de $31 \text{ m}^2/\text{s}^2$ [60]

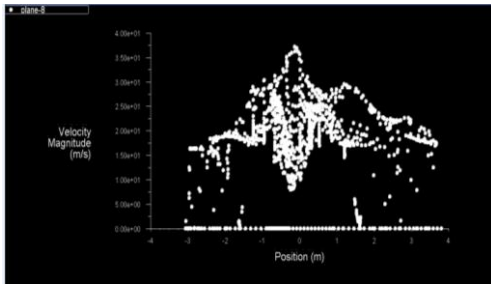


Fig. 4-23 Perfil de velocidad [m/s]
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3 \text{ [m/s]}$

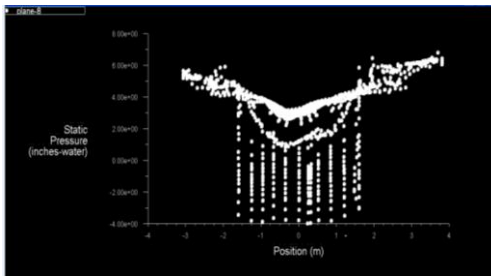


Fig. 4-24 Perfil de presión [pulgadas CA]
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3 \text{ [m/s]}$

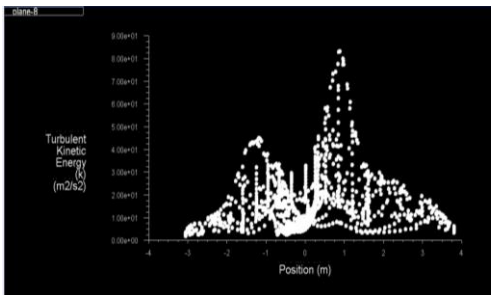


Fig. 4-25 Perfil de turbulencia [m^2/s^2]
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3 \text{ [m/s]}$

Caso III: $V=18.3 \text{ m/s}$.

Perfil de velocidad en el plano X-Z.

El perfil de velocidades en el plano X-Z Fig. 4-23 es más simétrico que en el caso I, similar al caso II y la velocidad media está en el orden de 25 m/s.

La velocidad máxima está en el orden de 40 m/s, valor aceptable contra el esperado para un flujo turbulento ($V_{\text{max}} = 2V_{\text{Promedio}}$)

Perfil de presión en el plano X-Z.

El perfil de presión Fig. 4-24 es típico con el mínimo localizado en el centro del ciclón.

Perfil de turbulencia en el plano X-Z.

El patrón de la turbulencia en la Fig. 4-25 es más típico para el caso de ciclones, según lo reportado en bibliografía para modelos con gases limpios y a escala laboratorio o de planta piloto.

El valor máximo se encuentra localizado cargado hacia el lado derecho. El valor mínimo está más hacia el centro. Esto es característico.

En general en este caso III existe una mejora comparada con los resultados del caso I y II.

Tiempo de residencia de las partículas.

Caso III: $V=18.3$ m/s.

El volumen del ciclón que se simuló es de 174.2 m^3 .

El flujo volumétrico de gases en el ciclón para el caso III es de $130.1 \text{ m}^3/\text{s}$

El tiempo de residencia_[42] promedio de los gases dentro del ciclón es de 1.0 s.

El tiempo de residencia máximo de las partículas dentro del ciclón es de 2.36 s.

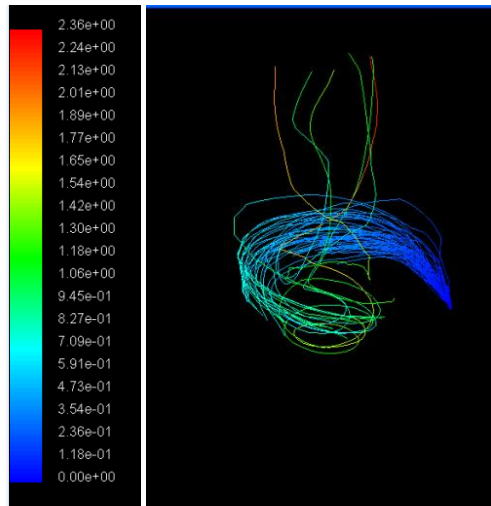


Fig. 4-26 Tiempo de residencia caso III [=] s
 $V_{\text{Inicial}} = 18.3$ [=] m/s

Como se puede observar las partículas

están en suspensión en la corriente de gases y se capturan o escapan mejorando la eficiencia de colección.

La acumulación que puede existir se puede manejar como una pequeña desviación que no afecta la estabilidad global del sistema.

En términos matemáticos la solución para la dinámica solido-gas del sistema se comporta como un Atractor (Todo atractor es un conjunto límite, pero no todo conjunto límite es un atractor).

La solución y/o el patrón de flujo para los casos de caída de presión, turbulencia y velocidad se comportan como atractor.

El parámetro a seguir_[24], o el criterio de diseño, debe ser el tiempo de residencia de las partículas más que la eficiencia de colección (En el caso III se incrementó en 25 puntos la eficiencia con respecto a la del caso I. En el caso II el incremento de eficiencia fue de 12 puntos).

4.3 Discusión de resultados

Introducción:

Se estudiaron tres casos utilizando una geometría en 3D esto se debe fundamentalmente a que la turbulencia que es el mecanismo dominante en la operación de un ciclón a escala industrial, es tridimensional, anisotrópica y dependiente del tiempo^{[47],[48]}.

Hasta 1990 era una práctica común que las simulaciones de ciclones en computadora se hicieran en 2D y con un modelo de turbulencia $k - \epsilon$ por las limitantes de capacidad de computo y velocidad de cálculo de los equipos ^[16]. Entre las primeras simulaciones en 3D con un modelo de turbulencia RASM se hizo en 1994 “Numerical Analysis of steady incompressible Turbulent Flow in Cyclone Separator”^[2]. El uso del modelo de turbulencia permitió tomar en cuenta el comportamiento altamente rotacional del flujo dentro del ciclón^[1] y la anisotropía del esfuerzo turbulento en el Bulk del fluido^[2]. Actualmente todavía es complicado una simulación directa de la turbulencia por el costo computacional, pero se cuenta con modelos de excelente precisión como son el RASM y el LES^[7] que permiten una solución de ingeniería práctica para problemas de diseño. El costo computacional del modelo LES es mayor que el de RASM y la diferencia de precisión de resultados no es significativa para uso de ingeniería en el diseño y análisis de operación de ciclones^{[24],[29]}.

La anisotropía de los esfuerzos turbulentos se calcula con el modelo de Reynolds (RASM), El problema al modelar la turbulencia en el interior de un ciclón radica en una consideración hecha en la simplificación del modelo de viscosidad de Newton en 3D donde la viscosidad se supone isotrópica. Esta restricción se hace débil al considerar la energía cinética turbulenta de disipación^{[47],[48]}.

El esfuerzo turbulento es dependiente del tiempo, en los tres casos se supone que el flujo está estabilizado y la velocidad de disipación de energía ha alcanzado un valor promedio estable en el bulk del fluido. El esfuerzo turbulento cercano a las paredes, en la capa límite, se aproxima por medio de un modelo de turbulencia de una ecuación (manual Fluent).

Los tres casos estudiados usan una malla semi - estructurada para hacer que sea fácil y rápida de construir, conservando la calidad y que las soluciones sean independientes de ella. El caso I y II tienen una malla de 104110 celdas y el caso III de 18377 celdas. Existe una diferencia de casi 5:1 de la malla del caso I a la del caso III, esto es posible gracias a la estrategia de MultiNivel^[19], que estabiliza y hace más suave la solución acelerando la convergencia con el método numérico seleccionado en el proceso de iterar (Jacobi).

4.3.1 Casos I, II y III: Perfiles de velocidad, presión y energía turbulenta disipada.

Las ecuaciones de conservación^{[46],[58]} tienen un comportamiento altamente no lineal, con simetrías para la masa, momentum, energía y el período de tiempo τ_g de la fase gaseosa. En la fase sólida las simetrías anteriores son válidas cuando el tiempo de residencia de las partículas τ_p es cercano o igual al de los gases. Este es un criterio de diseño encontrado al analizar los atractores de velocidad y los conjuntos límite que se obtuvieron de la simulación.

Los conjuntos límite^[14] obtenidos en los perfiles de velocidad, presión y disipación de energía turbulenta se comportan como atractores.

El conjunto límite para el tiempo de residencia de los gases también se comporta como un atractor, pero el conjunto límite que se obtiene para el tiempo de residencia de las partículas sólidas puede ser o no un atractor y esto es función de la geometría del sistema y de las condiciones de operación.

Al comparar los resultados de los perfiles de presión para el caso II y III, a la misma velocidad de entrada de gases y partículas se observa que la caída de presión en los ciclones tiene una dependencia fuerte de la geometría de la entrada^{[22],[31],[32]} y es anisotrópica.

La eficiencia de colección depende en forma fuerte de la geometría del ciclón y de las condiciones de operación. La eficiencia para el caso I es de 40.6%, para el caso II es “inestable” y converge a dos valores 16.15 % y 53%. El caso III es una solución estable con una eficiencia de 70.6%.

Para calcular estos valores de eficiencia se utilizó un modelo de fase discreta (DPM) con caminatas aleatorias con 25000 pasos con 10 x 26000 partículas inyectadas en forma distribuida desde la entrada. La distribución de partículas se modeló con una curva de Rosin Rammler con 10 divisiones de tamaño de partículas y un valor medio de 37 micras.

La interacción entre partículas y el gas se estima con un coeficiente de arraste^{[53],[54],[56],[61]}. La interacción de partícula- partícula se desprecia por considerarse choques 100% elásticos. El choque entre partículas y el cuerpo del ciclón se divide en dos casos, en la parte superior del ciclón se consideran choques 100% elásticos. En la parte cónica se considera que la partícula que toque la pared es colectada.

4.3.2 Casos I, II y III: Perfiles de velocidad, presión y energía turbulenta disipada, plano Xo.

Los perfiles que se ven en las gráficas de Velocidad vs radio del ciclón, Presión vs radio del ciclón y Energía cinética disipada vs Radio del ciclón tienen patrones que son muy típicos y concuerdan con los valores reportados por Bird [45] y por Wilcox [47].

Al cruzar la información de los perfiles (estructuras coherentes) y los criterios de escalamiento por similitud geométrica (L/D), cinemática (u/U_o) y dinámica (Re), así como los criterios de presión (Euler) e intensidad de turbulencia (u'/U_o) no se puede concluir en forma contundente que la operación es estable.

El criterio del tiempo real de residencia de las partículas dentro del ciclón calculado a través de la simulación por CFD sí es un criterio de diseño para garantizar la estabilidad de operación de un ciclón con alto contenido de partículas y temperaturas extremas.

4.3.3 Aspectos matemáticos de la solución del modelo.

En la ecuación de momentum 2-7 para régimen turbulento estabilizado [52],[53], el primer término del lado izquierdo de la igualdad (derivada con respecto al tiempo) es pequeño. Si despreciamos este término podemos considerar que la solución es independiente del tiempo.

La ecuación diferencial parcial se comporta de forma diferente dependiendo de las propiedades globales o locales que se consideren. El comportamiento global en la

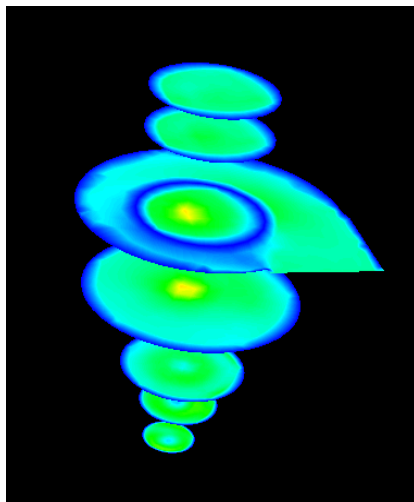
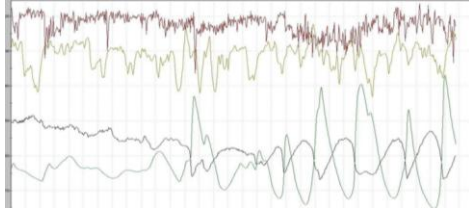


Fig 4-27 Perfil de velocidad en el plano XY
V Inicial = 18.3 m/s

dirección "z" es como una ecuación diferencial parcial parabólica (Ecuación de difusión). La información fluye desde la entrada hacia el fondo del cono y del fondo del cono hacia el vortex, ahora bien, si se ve el comportamiento local en un plano "xy", la ecuación se comporta como una ecuación diferencial parcial elíptica (Ecuación de Laplace). Este comportamiento dual permite trabajar el sistema en un "cuasi-equilibrio dinámico" y modelar el caso en estado estable.



Fi g. 4-28 a) Grafica dP vs t EI-L5
 b) Grafica dP vs t EI-L6
 c) Grafica torque del horno vs t
 d) Grafica Temperatura vs t

Cuando la variación de la intensidad de la turbulencia es muy grande se rompe el cuasi-equilibrio y la ecuación de continuidad 2-6 pasa de un “estado cuasi - estable” a un comportamiento inestable (se rompen las simetrías^[56]).

En la fig 4-28 las líneas en la parte superior de la gráfica representan la variación de la presión del ciclón. Las dos líneas inferiores representan el torque del horno y la temperatura del material en el enfriador (gráfica con el pico más alto). Como puede verse cuando hay un disturbio grande en el ciclón este llega con retraso al tubo del horno y finalmente al enfriador afectando el torque del horno y la temperatura del material en el enfriador. Este comportamiento del sistema en forma global se debe a que se rompe el cuasi equilibrio y la ecuación que modela el sistema se comporta como hiperbólica.

El modelo propuesto y la solución numérica pueden representar bien el sistema cuando opera en estado cuasi-estable y el criterio del tiempo de residencia ($\tau_p < 2.5 \tau_g$) marca cuando el sistema tiene una operación inestable.

CAPÍTULO 5

Conclusiones

Existe una solución única en estado estable de la ecuación de NS en régimen turbulento para el flujo sólido-gas en un ciclón separador (Dinámica del sistema), si y solo si, $\tau_p \leq 2.5 \tau_g$ (caso III pág. 65)

Si “S” es la solución de la dinámica del sistema de un ciclón separador con alto contenido de partículas trabajando en estado estable, entonces, “S” se comporta como un atractor (Caso III pág. 65).

5.1 Conclusiones.

- Se comprobó que el modelo matemático propuesto para simular la operación de un ciclón a escala industrial es capaz de detectar cuando el diseño o las condiciones de trabajo producen una operación estable o inestable. Esta conclusión se desprende de los resultados de la simulación de los casos I, II y III (pag. 59-69).
- Al modificar la geometría del sistema, caso I y II (pag 57), por la del caso III, se observó que el conjunto solución para la dinámica de las partículas se transformó en un atractor.
- Los resultados obtenidos con el modelo matemático formado por: La ecuación de Navier Stokes, la ecuación de continuidad, el modelo de fase discreta DPM y el modelo de turbulencia RASM, muestran que, este modelo se aplica con una precisión mayor al 95%, para simular la operación en estado estable de un ciclón con alto contenido de partículas (37 a 93 kg/s), y temperaturas extremas (900 °C a 1250 °C), como los usados en la industria del cemento.
- Se encontró que la carga de partículas y la distribución de tamaños (de 1.8 a 200 micras con tamaño medio de 37 micras), sí tienen influencia sobre la eficiencia de colección.
- Como se puede ver, se desprende de los resultados del caso III (pag 66 – 69), que: El criterio a seguir para diseñar un ciclón, o bien, para evaluar su operación en estado estable es el tiempo real de residencia de las partículas dentro del ciclón (τ_p). Este parámetro debe estar cercano al tiempo de residencia de los gases (τ_g) calculados a las condiciones de entrada del ciclón (presión y temperatura).

Se encontró en el caso III que $\tau_p < 2.5 \tau_g$, es una condición necesaria y suficiente para garantizar la estabilidad de operación del ciclón (esto es que el tiempo de residencia de las partículas está cercano al tiempo de residencia de los gases).

- El objetivo de la investigación se cumplió porque:
 - La solución del modelo matemático propuesto se usó y representó bien el caso III estudiado en estado estable con una exactitud mayor al 95%.
 - El modelo fue capaz de detectar una operación inestable a diferentes condiciones de operación (Casos I pag. 58-62 y Caso II pag. 63-65).
 - El modelo fue sensible a cambios en la geometría del sistema.

- El criterio del tiempo de residencia es una condición necesaria y suficiente para garantizar una operación estable, esto se comprobó, porque al modificar la geometría del ciclón con problema de estabilidad, y usar la geometría propuesta a las nuevas condiciones de operación, el sistema arrancó y continua trabajando actualmente a plena capacidad con el incremento de producción de 3800 a 4600 toneladas/día. El sistema, después de arrancar, estabilizó su operación en 24 horas.

- El modelo es capaz de representar el comportamiento del sistema en forma global y/o local.
 - En el comportamiento global (dirección eje “z”), las ecuaciones de variación se comportan como una ecuación diferencial parcial parabólica.
 - El comportamiento local (en un plano “xy”) también se representa bien por el modelo, aquí las ecuaciones de variación se comportan como elípticas.
 - El comportamiento hiperbólico no se representa por el modelo pero queda acotado con el criterio del tiempo de residencia.

- Corolarios:
 - Los criterios obtenidos al revisar las estructuras coherentes, los conjuntos límite o atractores, así como, los criterios de escalamiento geométrico, y dinámico, son sólo condiciones necesarias, pero no suficientes, para la operación estable del ciclón con alto contenido de partículas trabajando a temperaturas extremas.
 - Cuando la turbulencia se ha “estabilizado” ($Re > 5 \times 10^5$ ó mayor, Número de Euler de 24 y la energía cinética turbulenta k para un sistema de baja caída de presión con un valor cercano a $31.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$) es posible simular un ciclón a escala industrial con la ecuación de NS independiente del tiempo.

5.2 Trabajos futuros.

- El modelo actual se puede modificar para estudiar la aerodinámica de cámaras de combustión con reacciones de descarbonatación y combustión, tanto de combustibles alternos como de combustibles tradicionales.
- Investigar la simulación de un ciclón con las características de trabajo de la industria del cemento operando en estado inestable.
- Hacer simulaciones de dos o más ciclones conectados en serie hasta modelar un precalentador completo. Experimentando con simulación en paralelo para optimizar el tiempo de cálculo y tener resultados en tiempos razonables.

REFERENCIAS

- Tesis
- Artículos
- Libros
- Direcciones e-mail

Referencias:

Tesis

- [1] Henrik Tryggesson, (2007), "Analytical Vortex Solutions to the Navier-Stokes Equation", Växjö University, PhD Tesis
- [2] Emiliano Ignacio Quiroga Morales,(1996), "Numerical Analysis of steady incompressible Turbulent Flow in Cyclone Separation.", University of Texas, MSC.
- [3] Marcela Kotsuka da Silva , "Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido", Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Master of Sc. Degree Tesis
- [4] Arnold Frank Moene,(2003), "Swirling pipe flow with axial strain Experiment and Large Eddy Simulation", Universiteit Eindhoven
- [5] Vinay R. Uddandam, (2008), "Computer Simulation of an Electrostatic Cyclonic Emission Separator", the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University. Master of Sc. Degree T
- [6] Lingjuan Wang,(2004), "Theoretical studio of cyclone Design", Texas A & M University, PhD Tesis
- [7] Hemdan Hanafy Shalaby, 2007, "On the potential of large eddy simulation to simulate cyclone separators", Cernitz University of Technology Chemnitz, Germany, PhD tesis
- [8] Luis Eduardo Gomez,(2001), "DISPERSED TWO-PHASE SWIRLING FLOW CHARACTERIZATION FOR PREDICTING GAS CARRY-UNDER IN GAS-LIQUID CYLINDRICAL CYCLONE COMPACT SEPARATORS", University of Tulsa, PhD tesis

Artículos matemáticas

- [9] Sen-Zhong Huang,(2002), "Constructing Universal Pattern Formation Processes Governed By Reaction Diffusion Systems", Electronic Journal of Differential Equations, Vol. (2002), No. 84, pp. 1-12.
- [10] Sen-Zhong Huang,(2001), "Constructing Navier-Stokes equations with attractors of arbitrary complexity, Physics Letters A 282 (2001) 1-8
- [11] I. Roulstone, B. Banos, J.D. Gibbon and V.N. Roubtsov,(2009), "A geometric interpretation of coherent structures in Navier-Stokes flows

[12] Giancarlo Alfonsia,*, Carlo Restanob, Leonardo Primavera, (2003),”Coherent structures of the flow around a surface-mounted cubic obstacle in turbulent channel flow”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003) 495–511

[13] Grzegorz Lukaszewicz, Mahdi Boukrouche,” Shear flows and their attractors”, This research was supported by Polish Government Grant MEiN 1 P303A 017 30 and Project FP6 EU SPADE2

[14] Ricardo M. S. Rosa,(2002),”Some Results on the Navier Stokes Equations in Connection With the Statistical Thehory of Stationary Turbulence”,

[15] Mojtaba Izadi1, Youssef Belhamadia2, and Stevan Dubljevic(), “Lagrangian Coherent Structures for Fluid Flow in Bridgman”, Proc. R. Soc. A published online 1 April 2009

Artículos CFD

[16] E.D. Cristea, E.Malfa ,A. Coghe,(1994),” 3D Simulation and experiments of Cement Rotary kiln Preheater Top Cyclone”, Fluent European Users Group, 9-10 June,Harrogate, U.K.

[17] , Tulsı D, Taward, Friederick A. Zenz ,(1984), “Evaluating cyclone efficiencies from stream compositions”
ChEng. 4/1984

[18] H.F.Meier, K. Ropelato, M. Mori, K.J.J. Less, H. Forester.” Computational Fluid Dynamic for cyclone evaluation and design Part I and II. Teil/part 1: ZKG International, 55 (2002) No 4, pp. 64 – 75.

[19] Klaus Bernert Thomas Frank Hellfried Schneider Klaus Pachler(),“Multi-Grid Acceleration of a SIMPLE-Based CFD-Code and Aspects of Parallelization”, IEEE International Conference on Cluster Computing, CLUSTER 2000, November 28.– December 2., 2000, Chemnitz University of Technology, Saxony, Germany

[20] Kyoungwoo Park, Chol-Ho Hong, Ji-Won Han, Byeong-Sam Kim, Cha-Sik Park, and Oh Kyung Kwon,(2012),”The Effect of Cyclone Shape and Dust Collector on Gas-Solid Flow and Performance”, World Academy of Science, Engineering and Technology 61 2012.

[21] Khairy Elsayed, Chris Lacor.,(2010),”Numerical Study on the Effect of Cyclone Inlet Height on the Flow Pattern and Performance”, Proceedings of ICFD 10, Tenth International Congress of Fluid Dynamics December 16-19, 2010, Stella Di Mare Sea Club Hotel, Ain Soukhna, Red Sea, Egypt, ICFD10-EG-3086

- [22] Khairy Elsayed_, Chris Lacory ,(2010),”THE EFFECT OF VORTEX FINDER DIAMETER ON CYCLONE SEPARATOR PERFORMANCE AND FLOW FIELD”. V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010 J. C. F. Pereira and A. Sequeira (Eds) Lisbon, Portugal,14-17 June 2010
- [23] Alex C. Hoffmann, (2006), “Effect of pressure recovery vanes on the performance of a swirl tube, with emphasis on the flow pattern and separation efficiency”,*Energy & Fuels* 20 (2006), 1691–1697.
- [24] H.W.A. Dries, W. Peng, P. Boot, A. Udding, AG, Groningen, A.C. Hoffmann, H.W.A. Dries, A. Ekker and J. Kater,(2001),” Determining the best modelling assumptions for cyclones and swirl tubes by CFD and LDA”, PARTEC, International Congress for Particle Technology.
- [25] G. Gronald, J.J. Derksen,”Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches”, *Powder Technology* 205 (2011) 160–171
- [26] Jinyu Jiao , Ying Zheng , Guogang Sunb, Jun Wang,(2006), “Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone”, *ELSIERVER, Separation and Purification Technology* 49 (2006) 157–166
- [27] Arkadiusz Kepa,(2008),”CFD Investigation of a flow inside a cyclone with additional gas extraction”, *Chemical and Process Engineering* 29, 1027 – 1035(2008)
- [28] H. Shalaby, K. Pachler, K. Wozniak, G. Wozniak,(2005),” Comparative study of the continuous phase flow in a cyclone separator using different turbulence models”, *International Journal for Numeric Methods in Fluids Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2005; 48:1175–1197
- [29] Takata OYAGI, Noriaki Akiba, (2005), “Fluid Dynamic Characteristics of Pressure Drop of Air Flow in Two Kinds of Cylindrical Vortex Chambers for Control of Vortex Flow ”
- [30] Jolius Gimbut,(2008), “CFD Simulation of aerocyclone Hydrodynamics and performance at extreme temperature”, *Engineering Application of computational Fluid Dynamics* Vol 2, No 1, pp 22 – 29 (2008)
- [31] Luqman Chuah, A.I. Jolius Gimbut,(2008),” A CFD Analysis on the Effect of Vortex Finder and Cylindrical Length on Cyclone Hydrodynamics and Centrifugal Forces”,
- [32] W.P. Martingnonil, , S. BernardoII; C. L.QuintaniIII,(2007),” Evaluation of cyclone geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics (CFD)”

Modelación Física:

- [33] American Petroleum,(1956), “Cyclone Dust Collection” , American Petroleum Institute
- [34] H. Ramesohl, Cologne,(1993),”40 years of humbolt preheaters”, ZKG No 8/1993 (pp.E232-E243)
- [35] W. Kreft, H.W. Thiemeyer and R. Beyer, Bekum ,(1985),”Further development of the cyclone preheater on the basis of model investigations”, ZKG No 2/85 (pp67 – 76)
- [36] Wolfgang H. Koch, William Licht,(1977),” New Design Approach Boost Cyclone Efficiency Equations”, ChEng. 12/1977 (pp. 80 – 88)
- [37]Tulsi D. Taward, Friederick A. Zenz
- [38] Akira OGAWA, Axel Rolf Winkler, Tsutomu OONO, Hayato OKABE, Taketo OOHAYAGI, Noriaki AKIBA, Kazuya OGAWA, Wataru OONO, Seiiti SINYA, Masaharu WASHIZ ,(2005), “Fluid Dynamical Characteristics of Pressure Drop of Air Flow in Two Kinds of Cylindrical Vortex Chambers for Control of Vortex Flow”. J. Coll. Eng. Nihon Univ. 46 (2) March 2005,
- [39] L.M. Ludera,(1989),”Design Methods for cyclone preheaters of rotary kilns plants”, ZKG No 1/1989 (pp. 10 – 12).
- [40] G Ramachandran, Jhon Dirgo, Henry Feldman, (),“Cyclone optimization Based in a New Model for Pressure Drop”. Aerosol Science and Technology 15: 135 – 148 (1991) Elseve Science Publications Co, Inc ©
- [41] Dominique Bonvin, D. A. Mellichamp, (1987),” A Scaling Procedure fort he Structural and Interaction Analysis of Dynamic Models”, AICHF Journal Vol 33 No 2
- [42] Lingjuan Wang,Calvin B. Parnell Jr, Ronald E Lacey,(2003), “Analysis of Cyclone Collection Efficiency”, ASAE Paper No 034114 Meeting
- [43]G. Ramashzndran,PC Raynor, D Lehith,(1994),“Collection efficiency and pressure drop for a rotary flow cyclone”, Filtration and Separation, September/October 1994
- [44]P. A. Patterson, R. J. Munz, (),“Cyclone Collection Efficiency at Very High Temperatures”, Chemical Engineering department, McGill University, Montreal, Quebec, Canada H3A 2A7

Libros:

- [45] R.B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot,(1998),” Fenómenos de transporte”, Editorial Reverté,S.A., ISBN 968-6708-17-0
- [46] R.B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot,(2006 Segunda Edición),” Fenómenos de transporte”, Editorial Reverté,S.A., ISBN 968-6708-17-0
- [47] David C. Wilcox, (1993),“Turbulence Modeling for CFD”,Editorial DCW Industries, ISBN 0-19636051-5-1
- [48] H.K Versteeg, W Malalasekera,(1995),An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Editorial Longman Scientific & Technical, ISBN 0-470-23515-2
- [49] Leon M. Ledeman, Christopher T. Hill,(2006),“La simetría y la Belleza del Universo “,Prometheus Books, ISB 84-8310-351-6
- [50] Brice Carnahan, James James O. Wilkes,(1973), Digital Computing and Numerical Methods,Editorial John Wiley and Sons, Inc.ISBN 0-471-13500-3
- [51] Shoicjiro Nakamura,(1997),”Análisis Numérico y Visualización Grafica con MatLab”, Editrial Prentice Hall, ISBN 0-13-051518-3
- [52] W. E. Schiesser, C. A. Silebi,(1997),”Computational Transpor Phenomena”, Editorial Cambridge University Press, ISBN 0 521 55653 8
- [53] Boundary Layer Theory,(), Schlichting
- [54] Yunuj A. Cengel, ohn M. Ciabala, Cengel;(), “Mecánica de los fluidos fundamentos y aplicaciones”, Mac Graw Hill ISBN 10 970 10 5617 4
- [55] Vennart & Street,(1985),” Elementos de mecánica de fluidos”,CECSA, ISBN 0 471 90589 5
- [56] Marcus du Sautory,(),” Symmetry a journey into the patterns of Nature”, Harper Perennial, ISBN 978 – 0 – 06 – 078941 – 1
- [57] Suchas V. Patankar,(1980),”Numerical Heat transfer and fluid flow”, Hemisphere series on computational methodos in mechanics and thermal science
- [58] Simiitud
- [59]Phillip Holmes, John L. Lumiey,(2012),” Turulence, Coherent Structure, Dynamical Systems and Symmetry”, Cambridge Monographs on Mechanics
- [60] Streeter Wylie,”Mecánica de los fluidos”,Mac Graw Hill, ISBN 0 07 062193 4

Tabla Estado del arte Tesis:

Año	Tesis	Contenido	Aportación
1996	<p>“Numerical Analysis of Steady Incompressible Turbulent Flow in A Cyclone Separator. ” MSc” [43]</p> <p>Emiliano Quiroga Morales</p>	<p>Resumen de ecuaciones experimentales para calcular la caída de presión en ciclones de uso común en la industria (Barth, Lapple, Steriman).</p> <p>Compara resultados experimentales de perfiles de velocidad medidos con LDA de ciclón propuesto en tesis doctoral contra valores obtenidos en CFD usando Fluent® 4.5</p>	<p>Uno de los primeros trabajos en 3D usando un modelo de turbulencia de Reynold con 7 ecuaciones (RSM) para resolver la ecuación de Navier Stock.</p>
1999	<p>“Exploratory and theoretical studies of cyclone gasification of wood powder” [41]</p> <p>Christian Fredriksson Luleá, Sweden</p>	<p>A design basis for the design of a solid fuel cyclone gasifier has been put forward</p> <p>the range of operating parameters for successful cyclone gasification have been determined.</p> <p>the successful</p> <p>A three dimensional CFD model for predictions of a solid fuelled cyclone combustor-gasifier with commercial CFD software has been developed.</p>	<p>Important parameter affecting the product gas composition, product gas temperature and separation of particles and alkali metals from a wood powder fuelled cyclone gasifier have been identified. These are the carbon conversion efficiency, wall temperature distribution and fuel characteristics</p> <p>Necessary future work in this research field has been identified</p>
2003	<p>“Swirling pipe flow with axial strain Experiment and Large Eddy Simulation” [44]</p> <p>Moene, Arnold Frank</p>	<p>Analiza el efecto irregular de la turbulencia (Espacio y tiempo) así como el efecto rotacional de una estructura coherente en movimiento.</p>	<p>Estudia dos tipos de separadores ciclónicos : El primero, un separador con entrada axial y el segundo, con efectos de entrada tangencial.</p>
2004	<p>“: Modellierung der Partikelagglomeration im Rahmen des Euler-Lagrange Verfahrens und Anwendung zur Berechnung der Staubabscheidung im Zyklone” [45]</p> <p>Herm Ho Chi Anh Universität Halle , Wittenberg</p>	<p>Usa el modelo de Lagrange/Euler para estudiar el efecto de la aglomeración en flujos turbulentos a través de modelar matemáticamente fenómenos físicos como colisión inter partícula estocásticos y el efecto en la “pegogacidad” de partículas.</p>	<p>Estudia la influencia de la aglomeración de partículas en flujos turbulentos y compara los resultados físicos obtenidos en un canal rectangular contra los obtenidos por CFD en un canal en 2D.</p>
2006	<p>“Estudio de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separacao Gás - Sólido” [46]</p> <p>Eng. Marcela Kotuska da Silva Florianópolis - Sc</p>	<p>Simula en forma numérica resultados experimentales dados por Shepherd (1939) y Lapple (1951) para dos ciclones, el primero con un diámetro de 0.254 m y el otro de 0.127 m.</p> <p>Usa modelos multifase de Euler en régimen turbulento (RSM) en estado transitorio con un tiempo de simulación para alcanzar el estado estable de 15 s.</p>	<p>Utiliza una malla híbrida refinada con celdas hexagonales en la pared para acelerar la convergencia disminuyendo los efectos de difusión numérica.</p>

Tabla Estado del arte Tesis(Continuación):

<p>2007</p>	<p>“On the potential of large simulation to simulate cyclone separators” [47] Hemdan Hanafy Shalaby Chemnitz, Germany Chemnitz University of technology</p>	<p>Estima el flujo de gases, la caída de presión y la turbulencia dentro de un canal rectangular con diferentes modelos avanzados (RSM, LES y k-Epsilon) . Calcula numéricamente dos ciclones con números de swirl de 3.5 y 4 Para números de Reynolds de 5000, 35000 y 100000. Calcula la fase gas como un continuo donde se encuentra interactuando la fase sólida, además incluye las ecuaciones que gobierna en el flujo en la fase gas y en la sólida.</p>	<p>Los resultados calculados difieren solamente un 2% de los valores medidos. y la magnitud de la velocidad máxima.</p>
<p>2007</p>	<p>“Analytical Vortex Solutions to the Navier - Stokes Equations” [48] Henrik Trggeson Sweden</p>	<p>Modela remolinos en una geometría cónica y compara los resultados contra valores obtenidos en un túnel de viento. Utiliza soluciones lineales de la ecuación de NS para estudiar las estructuras coherentes (Formadas en fronteras sólidas). Analiza casos en 2 y 3D para construir soluciones lineales.</p>	<p>Sugiere una forma analítica de resolver la ecuación de NS reformulada para flujos interiores basada en estructuras coherentes en una geometría cónica.</p>
<p>2008</p>	<p>“Computer Simulation of an Electrostatic Cyclonic Emission Separator” [33] thesis</p>	<p>Hace uso de Fluent y Gambit para modelar un ciclón precipitador electrostático a escala piloto. El</p>	<p>Entender la operación para optimizar y cumplir con el endurecimiento de las normas ambientales</p>

Tabla Estado del arte artículos CFD:

Año	Artículo	Contenido	Aportación
1999	“A CFD Model for dense medium cyclones” [14]	- Estudia el efecto de la reología de fluidos No - Newtonianos y el fenómeno de la turbulencia en el medio modelado. - Efecto de la geometría y variables de operación en la eficiencia de colección. Resultado limitado solo a los parámetros estudiados.	- El efecto de la turbulencia es más importante que el de la reología de No - Newtoniano.
1999	“An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones” [15]	- Compara los resultados de tres modelos de turbulencia contra datos experimentales altamente rotacionales.	- Los datos experimentales muestran el efecto de la geometría (Tamaño del vortex) en los valores medios del vector rotacional (Swirl) . Usa un disco estabilizador del vortex.
1999	“ The flow in a conical Cyclones” [16] Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries 6-8-December 1999	- Las condiciones de frontera son una velocidad de entrada de 22 m/s y un diferencial de presión entre las secciones de salida superior para gases y la inferior para sólidos.	- Utiliza coordenadas esféricas y variables adimensionales con una función de corriente para el flujo no viscoso axi-simétrico se compara contra CFD en Fluent. Divide el caso en tres partes y las condiciones de entrada influyen el patrón de flujo.
2000	Pullback attractors and statistical solutions for 2-D Navier-Stokes equations G. Lukaszewicz University of Warsaw, [A57]	Investiga la relación entre el atractor de tiempo promedio y la solución estadística de la dinámica del sistema con la ecuación no autónoma de Navier Stokes en dos dimensiones En las fronteras del dominio.	Estudia la dinámica de un sistema en 2D (ENS) y el atractor de tiempo
2000	“Effect of dust concentration on a preheater cyclone particulate transport for cement process” “The third conference for conveying and handling of particulate solid” [17] Tenth International Freight Pipeline Society Symposium, Israel (May 2000) V Ari, M Gür, T. Engin, I. Calli	Hace estudios experimentales de flujo de gases a una temperatura de 337 °C entrando con una velocidad de 12.4 m/s en un ciclón de 0.34 m de diámetro.	Experimentalmente se observa que la eficiencia de colección y la caída de presión en un ciclón están influenciados por la concentración de partículas.

Tabla Estado del arte artículos CFD:

2000	<p>“Simulation of vortex core Precession in a reverse – flow cyclone” [18]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Los ciclones exhiben una inestabilidad de baja frecuencia no – axisimétrica., conocida como precessing vortex core (PVC). - Compara los resultados de la simulación contra datos obtenidos experimentalmente con (LDA) Laser Doppler Anemometer - Usa el modelo (LES) para la turbulencia. 	<ul style="list-style-type: none"> . -Estudia el movimiento cuasi - periódico que se obtiene al eliminar la suposición de axi – simetría. - Fija el inverso del tiempo de relajación como criterio para estudiar las fluctuaciones en el campo de flujo.
2000 Imp	<p>Multi-Grid Acceleration of a SIMPLE-Based CFD-Code and Aspects of Parallelization [42] Klaus Bernert Thomas Frank Hellfried Schneider Klaus Pachler</p> <p>IEEE International Conference on Cluster Computing, CLUSTER 2000, November 28.– December 2., 2000, Chemnitz University of Technology, Saxony, Germany.</p>	<p>Hace un estudio en forma numérica de las ecuaciones de turbulencia para un flujo multifase incompresible en fase continua.</p> <p>Utiliza el algoritmo SIMPLE basado en una malla “gruesa” para aplicar un método multigrad refinando la malla hasta 3;174,400 celdas.</p> <p>Se utilizo simulación en paralelo para estimar la capacidad de usar PC Clusters para resolver problemas físicos de Ingeniería en la vida real.</p>	<p>Efecto de usar algoritmos de solución en paralelo con Multigrad para flujos en mulifase.</p> <p>Se resuelve las ecuaciones de flujo turbulento (ANS) incompresible con una estrategia simple en una malla de 3;174, 400 celdas con volumen finito.</p>
2001	<p>“Determining the best modelling assumptions for cyclones and swirl tubes by CFD and LDA” [19] H.W.A. Dries</p>	<p>Se Hicieron mediciones con Laser Doppler Anemometry (LDA) para dos tipos de flujo reverso, el primero en un ciclón con sección cilíndrica y cónica tradicional y el segundo en un tubo con entrada tangencial.</p>	<p>Compara los resultados de datos obtenidos a través de CFD contra datos medidos con Laser Doppler.</p> <p>El trabajo confirma que la velocidad radial es axialmente constante en el vortex tanto para la geometría del cilindro , así como, para la combinación de cilindro cono (Ciclón “tradicional”) .</p>
2001	<p>“Design and Performance Evaluation of a Novel Double Cyclone”, [20]</p>	<p>Se presentan los resultados de modelación física de un ciclo+on de alta eficiencia de Stairmand contra los obtenidos con una geometría propuesta con doble vortex.</p> <p>La eficiencia de colección se estimo usando partículas de monodispersas de latex de poliestireno (PSL).</p>	<p>Compara la eficiencia de colección de una geometría con doble vortex contra la obtenida en un ciclón de alta eficiencia de Stairmand.</p>
2001	<p>“The sonification of numerical fluid flow simulations” [21]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Analiza la solución de las ecuaciones de Navier – Stokes (NS) dividiendo la geometría en zonas o blocks. - Existen varios caminos para considerar CFD como una nueva fuente de música. 	<ul style="list-style-type: none"> - Usa sonido para obtener un modelo de la geometría y reconocer patrones favorables de sonido que no pueden obtenerse en forma visual a través de CFD.
2003	<p>Coherent structures of the flow around a surface-mounted cubic obstacle in turbulent channel flow Giancarlo Alfonsi</p>	<p>Se estudia el flujo turbulento $Re = 40000$ alrededor de un cubo en un canal rectangular.</p>	<p>El campo de velocidades se puede descomponer en un número limitado de ecuaciones (cinco ó siete) .</p>

Tabla Estado del arte artículos CFD:

2003	“Numerical study of gas – solid flow in a cyclone separator” [22]	- Presenta un análisis típico en estado transitorio de un ciclón tipo Lapple El flujo de gas se analiza con un modelo de turbulencia (RSM) . La simulación presenta un valor crítico de diámetro de partículas capturadas de 0.1 micras para distinguir el patrón de flujo.	- Estudia el modelo RSM y un método estocástico Lagrangiano para estudiar el flujo de partículas.
2003	“ Separation Performance Predictions of a Stairmand High-Efficiency Cyclone” [23]	- Se prueban tres formas de modelar el movimiento de las partículas: Un campo de fuerzas, un modelo de vida de remolinos y un flujo periódico.	Se prueba el modelo Large Eddy Simulations (LES). - Existe una velocidad crítica a partir de la cual disturbios inerciales se propagan tanto hacia arriba como hacia abajo del precalentador (Ductos de descarga) .
2004 imp	“ A new role for reduction in pressure drop in cyclone using CFD techniques “[24] D. Noriler ¹ , A. A. Vegini ² , C. Soares ¹ , A. A. C. Barros ¹ , H. F. Meier and M. Mori	Estudia una forma de reducir la caída de presión en un ciclón de alta eficiencia de Lapple y otro de Stairmand para un aflujo y una eficiencia de colección dados. El diámetro del ciclón es de 0.3m Para lograr esta reducción introduce un dispositivo en el vortex. El analisis lo hace con CFD.	Usa CFX 4 para simular un caso presentado en 1955 por American Institute Petroleum en su artículo “Cyclone Dust Collection” .
2005	“ Study of the natural vortex length of a cyclone with response surface methodology ” [25] Fuping Qian , Mingyao Zhang Computers and Chemical Engineering 29 (2005) 2155–2162	Usa FLUENT para predecir la respuesta del sistema a cambios de longitud del vortex. Además hace un análisis estadístico.	Un modelo para predecir la longitud natural del vortex dependiente de la velocidad de entrada y de la longitud del vortex.
2005	“Comparative study of the continuous phase flow in a cyclone separator using different turbulence models” [26]	- Los resultados que se obtienen con el RSM son similares a los que resultan del LES que es computacionalmente mucho más costoso. - Se muestra que el efecto de considerar completamente elástico o inelástico los choques de las partículas con las paredes del ciclón no afecta el resultado del cálculo de la eficiencia de colección.	- Simula la respuesta de un dispositivo colocado en la descarga del ciclón en diferentes posiciones, apex cone (Similar al Vortex breaker de KHD).
2005	“Numerical and experimental studies of the flow field in a cyclone dryer ” [27]	- Uso CFX 5.7 para diferentes tipos de mallas. - Se obtiene un 10% de diferencia al estimar la caída de presión. - El modelo físico consta de tres cámaras ciclónicas (D= 0.5 m , L= 0.6 m).	El modelo de turbulencia RNG da resultados que están de acuerdo con los datos del modelo físico. Se probaron diferentes calidades de malla hasta encontrar una donde la solución es independiente.

2005	<p>“Simulations of confined turbulent vortex flow” [39] J.J. Derksen Computers & Fluids 34 (2005) 301–318</p>	<p>Simula un caso reportado en literatura de medición en campo con LDA (1980).</p> <p>Usa el modelo de turbulenta LES</p>	<p>Corroboración con CFD los datos reportados en modelación física:</p> <p>La velocidad promedio en el tubo de salida es muy sensible al diámetro del vorte.</p> <p>El método LES muestra el mayor efecto de resolución espacial y modelado de escala.</p>
2006	<p>” On the Bidirectional Vortex and Other Similarity Solutions in Spherical Geometry ”, [28] Z. angew. Math. Phys. DOI 10.1007/s00033-006-5058-y © 2006 Birkhäuser Verlag, Basel</p>	<p>Solución analítica de las ecuaciones de Flujo en coordenadas esféricas asumiendo estado estable, flujo incompresible, no viscoso rotacional y con simetría axial.</p> <p>El flujo Bidireccional se estudia en un cilindro recto que corresponde al tratamiento analítico de una cámara cónica que permanece sin resolver.</p>	<p>Analiza en coordenadas esféricas el flujo bidireccional que se da en un vortex para aplicaciones en ciclones o bien en motores de cohetes con inyectores de combustible líquido tangencial.</p>
2006	<p>“Reynolds-Stress Model for Eulerian multiphase” [29]</p>	<p>- Presenta un esquema no estructurado y el dominio se subdivide en volúmenes de control. La integración de las ecuaciones se hace en cada volumen individual.</p> <p>Se extiende el método de solución de las ecuaciones del RSM a flujo en mustiases.</p>	<p>Se estudian dos modelos de turbulencia multi - fase Fase dispersa Fases miscibles (Completamente)</p>
2006	<p>A THEORETICAL APPROACH FOR PREDICTING NUMBER OF TURNS AND CYCLONE PRESSURE DROP</p>	<p><i>La distancia recorrida y el número de giros es determinada por la geometría y el patrón . La caída de presión dentro del ciclón se debe a las fuerzas de fricción.</i></p>	<p><i>Se estudia un Nuevo método para estimar la distancia recorrida y el número de “Giros” que sigue el patrón de flujo dentro de un ciclón . Se calcula la caída de presión.</i></p>
2006	<p>“Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone” [30] Khairy Elsayed_, Chris Lacory</p>	<p>Estudia la eficiencia de separación y el patrón de flujo de un ciclón en forma experimental y usando CFD a través de un paquete comercial “FLUENT 6.0” .</p> <p>Los resultados experimentales muestran que la posición y velocidad del clasificador dinámico impactan significativamente la eficiencia de colección.</p> <p>La eficiencia también se ve fuertemente influenciada si el separador trabaja cerca de su frecuencia natural angular</p> <p>El ciclón se divide en tres zonas de análisis, entrada, separación y parte baja.</p>	<p>Utiliza un vortex rotacional ranurado similar a los de los separadores dinámicos que gira a diferentes velocidades angulares.</p>

2006	Simulation of gas – solid flow and design modifications of cement pplant cyclones [43] V. Singh, S. Srivastava , R.Chaval, V. Vitankar, B. Basu, M.C.Agrawal Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 13-15 December 2006	Usa el modelo de RSM para calcular la dp y la eficiencia de colección de un ciclón. Usa datos de planta piloto para diseñar un ciclón para molienda de coque. Los resultados de la modelación física se comparan contra datos obtenidos por CFD.	El diseño a escala se implemento a nivel industrial.
2007	“Evaluation of cyclone geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics (CFD)” [31] W. P. MartignoniI, S. BernardoII; C. L.QuintaniIII [A32]	- Estudia la eficiencia de colección modificando las condiciones de entrada - Usa CFX para resolver el conjunto de EDP. - El caso de dos entradas lo analiza con dos modelos, uno con entradas de voluta simétrica y el otro con entradas tangenciales también simétricas.	- Compara el efecto de tener dos entradas simétricas vs el diseño tradicional de una sola entrada.
2007	“ Radiotracer experiments and CFD simulation for industrial hydrocyclone performance” [32]	-La simulación la hace con un modelo de partículas discreto por limitantes en la capacidad de cómputo. -En condiciones industriales la distribución de tamaño de los granos sólidos es continuo desde 5 micras hasta 400 micras.	-Presenta un estudio a nivel industrial con radio – trazadores.
2007	“Fine particle capture in biomass boilers with recirculating gas cyclone” [38] R.L.R Salcedo, V.G. Chibane, A.M. Fonseca, G. Cándido Powder technology 172 (207) 89 - 98.	Usa un modelo predictivo de propiedades de difusividad finita modificado para incluir la recirculación de emisiones de ciclones. Validación experimental se obtuvo comparando contra datos de laboratorio (Obtenidos con Laser Monitoring), y planta piloto a baja temperatura (350 K) Los resultados fueron buenos con el filto de bolsas (Jet Pulse) y mejores con el conjunto de multiciclones para temperaturasde 600 K.	Se compara la eficiencia de colección de un sistema de multicilones vs un colector de bolsas. Se da una explicación (Incremento de dispersión por turbulencia) de por que mejora la eficiencia de colección para entradas con partículas menores a 100 µg/m ³ .
2008	“CFD Simulation of aerocyclone Hydrodynamics and performance at extreme temperature” [34] Jolius Gimbur Engineering Application of computational Fluid Dynamics Vol 2, No 1, pp 22 – 29 (2008)	- Uso del modelo de turbulencia de Reynol Stress Model (RSM). - Uso del modelo de fase discreta (DPM) para calcular la trayectoria de las partículas. - Uso del método de Lagrange para seguir la trayectoria de las partículas y calcular la separación de las partículas.	- Utiliza FLUENT para hacer el análisis de la aerodinámica de un ciclón operando a temperatura extrema. - Proporciona un método relativamente económico comparado contra simulación física a altas temperaturas.

2008	<p>Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones” [41]</p> <p>F. Kaya* and I. Karagoz</p> <p>CURRENT SCIENCE, VOL. 94, NO. 10, 25 MAY 2008</p>	<p>Analiza la estabilidad numérica de varios modelos de turbulencia (k-ε, RNG, RSM) en un flujo complejo altamente rotacional.</p> <p>Se usa una geometría en 3D para ciclones con entrada tangencial donde el flujo incompresible se estudia en estado estable.</p> <p>El modelo se resuelve numéricamente a través de CFD usando Fluent ®.</p> <p>Se uso un esquema de interpolación PRESTO para la presión. El esquema SIMPLEC para resolver en forma acoplada el perfil de velocidad y presión. Además se uso un esquema upstream (quick). Para las variables de la ecuación de momentum.</p>	<p>El principal objetivo de este estudio es analizar la estabilidad numérica de varios modelos de turbulencia (k-ε, RNG, RSM) en un flujo complejo altamente rotacional.</p> <p>El modelo RSM da una Buena predicción al comparar contra los datos experimentales. Se obtiene como resultado los perfiles de velocidad Axial y tangencial así como la caída de presión del sistema. Los resultados del cfd son comparados contra datos experimentales de literatura.</p>
2008	<p>A CFD Analysis on the Effect of Vortex Finder and Cylindrical Length on Cyclone Hydrodynamics and Centrifugal Forces</p> <p>Luqman Chuah A.1, Jolius Gimbut, Universiti Putra Malaysia</p>	<p>Se tilizo Fluent 6.0 para predecir el campo de velocidad y de fuerzas centrifugas.</p> <p>Se uso RSM y se estudio el efecto de modificar la parte cilindrica y el vortex del ciclón.</p>	<p>Velocidad axial y tangencial se calcula con precisión con una desviación de $\pm 0.5 m/s$.</p>
2008	<p>“CFD Investigation of a flow inside a cyclone whid additional gas extraction” [35]</p> <p>ARKADIUSZ KEPA</p> <p>CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING</p> <p>29, 1027–1035 (2008)</p>	<p>- Analisis de la modificación del patrón de flujo de fluidos dentro de un ciclón por la extracción de gases.</p> <p>- Uso de Average Navier Stokes método (RANS) y del modelo de turbulencia de Reynol Stress Model (RSM).</p> <p>- Uso del método de Lagrange para seguir la trayectoria de las partículas y calcular la separación de las partículas.</p>	<p>El estudio muestra como la eficiencia total de un ciclón puede ser alterada por la extracción de una cantidad “regular” de gas por el tubo de descarga de sólidos.</p>
2010	<p>“A Numerical Study of the Flow in a Cyclone Separator Using k – ε modelo de turbulencia” [36]</p> <p>Mauricio Carmona_, Cristobal Cortesy and Antonio Ramirezyy</p>	<p>Se hace una simulación del flujo en un ciclón con el modelo k – ε Realizable y se compara contra el RSM.</p> <p>Se usa un índice de convergencia para la malla (Relacionar el tiempo promedio y los resultados temporales). La solución es independiente de la malla.</p>	<p>El modelo k - ε Realizable es capaz de reproducir la oscilación y la falta de simetría axial en la estructura del flujo Se hace análisis espectral con las transformadas rápidas de Fourier (FFT) de las estructuras coherentes y técnicas de visualización.</p>
2010	<p>“Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: a comparison of various modelling Approaches “[37] [40]</p> <p>G. Gronald1 & J.J. Derksen2</p>	<p>Utiliza el modelo RANS para estudiar el flujo de una de las fases en un ciclón La turbulencia se aproxima por el método LES.</p>	<p>Los resultados se comparan contra datos experimentales medidos con LDA publicados El caso no converge. Se requiere una malla muy fina para resolver el caso.</p>

2005	Fluid Dynamical Characteristics of Pressure Drop of Air Flow in Two Kinds of Cylindrical Vortex Chambers for Control of Vortex Flow Taketo OYAGI* Noriaki AKIBA*.	Se estudia la caída de presión entre el ducto de salida de gases y el de partículas aplicable a ciclones ,y , a una , una cámara de combustión ciclónica.	Estudia cámaras de combustión ciclónicas.
2012	The Effect of Cyclone Shape and Dust Collector on Gas-Solid Flow and Performance Kyoungwoo Park [A_50]	Usa el método RSM, k-Epsilon. RNG para simular la turbulencia y estimar la caída de presión en un ciclón.	Evalúa diferentes modelos de turbulencia en un ciclón-
2006 imp	Effect of pressure recovery vanes on the performance of a swirl tube, with emphasis on the flow pattern and separation efficiency Alex C. Hoffmann,	Estudia el efecto de Guías de flujo en la caída de presión mediante medición directa en el vortex con flujo reverso.	Medición directa del efecto del flujo reversible en un vortex y como se afecta por el uso de guías.
2009 imp	Investigation of the Geometrical Parameters Effects on the Performance and the Flow-Field of Cyclone Separators using Mathematical Models and Large Eddy Simulation	Usa Fluent para simular un ciclón separador . Estudia como repercuten cambios en la geometría y el efecto de incrementar d_{50} en la caída de presión y la eficiencia de colección.	Estudia como se comporta el campo de flujo, la caída de presión y la eficiencia de colección de un ciclón al cambiar la geometría del sistema.
2010	The Effect of Cyclone Dustbin on the Flow Pattern and Performance Khairy Elsayed [A54]	La velocidad tangencial en un plano es constante. La máxima velocidad tangencial es constante	La máxima velocidad tangencial es constante
201	Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches G. Grondal A_55	Prueba del Modelo LES para turbulencia en un ciclón usando dos métodos de solución: El método de volumen finito y el de Lattices de Boltzman. Se hace medición experimental con LDA	Compara resultados de mediciones con LDA y simulación con CFD del modelo LES de turbulencia para un ciclón separador
2001	Constructing Navier–Stokes equations with attractors of arbitrary complexity Sen-Zhong Huang [A58]	La dimensión del flujo de fluidos turbulento gobernado por la ecuación de Navier Stokes es en general infinito . La dependencia del tiempo de las fuerzas externas aplicadas son también de dimensión infinita.	Un atractor pullback es en cierto sentido el mínimo del conjunto solución .
2009 Relocalizar	A geometric interpretation of coherent structures in Navier-Stokes flows I. Roulstone_[A61],	La presión en flujo incompresible en 3D para la ecuación de Navier Stokes y la de Euler es gobernada por la ecuación de Poisson, Esta ecuación es estudiada usando tres funciones, si $Dp > 0$ ó $Dp < 0$ la estructura es compleja o real.	En flujo turbulento la estructura coherente la solución real y compleja co-existen para la ecuación de Navier Stokes.

Tabla Estado del arte en modelación física:

Año	Artículo	Contenido	Aportación
1955	<p>“Cyclone Dust Collection” [1]</p> <p>American Petroleum Institute</p>	<p>- Clasificación de ciclones de acuerdo a su eficiencia de colección o a su capacidad.</p> <p>- Criterios prácticos de diseño y Selección.</p> <p>- Ecuaciones experimentales y teoría básica para calcular la eficiencia de colección y la caída de presión considerando factores que afectan el diseño (Geometría, Flujo, Distribución carga densidad y tamaño de partículas y densidad, para geometrías propuestas cada tipo de ciclón del flujo de gases y separación de partículas dentro del ciclón.</p> <p>Aparecen ecuaciones para calcular el diámetro de corte de partículas de Lapple, Shepherd y otros. También están ecuaciones para calcular la caída de presión de Alexander, Lapple, Shepherd</p>	<p>American Petroleum Institute.</p> <p>Recolección de datos experimentales</p> <p>Datos publicados. y no publicados por Kaiser Ing. hasta 1953.</p> <p>Comentario: La recopilación de información es buena como referencia histórica limitada por haberse obtenido a escala laboratorio o piloto.</p>
1964	<p>“Conveyability of Materials of Mixed Particle Size” , [2]</p>	<p>- Estudio para determinar la velocidad mínima de transporte “ Saltation - free conveying” para flujo en ductos horizontales o verticales.</p>	<p>-Existe una gran diferencia entre las características de transporte de partículas pequeñas y grandes, pero el rango de distribución de tamaños tiene poco efecto.</p> <p>- Resalta el hecho de que contra más dispersión menor eficiencia de colección.</p>
1969	<p>“Static Pressure and Velocity Profiles in a Swirling Incompressible Tube Flow” [3]</p>	<p>El estudio se hizo en un equipo de 2 pulgadas de diámetro interior por 10 pies de altura.</p> <p>El perfil de velocidad y presión se obtuvieron manteniendo constante el Re (Fijo en cuatro valores) y observando como decae el rotacional vs la posición , graficando la relación Vel rotacional / Vel de entrada vs distancia axial.</p>	<p>- Estudia el efecto de flujo reverso en un patrón de flujo axial incompresible experimentalmente y usa los resultados para simplificar la ecuación de Navier Stokes.</p>
1978	<p>“ New Design Approach Boost Cyclone Efficiency Equations Wolfgang H. Koch, William Licht” ChEng. 12/1977 (pp. 80 – 88)</p>	<p>Las ecuaciones para estimar la eficiencia de colección de ciclones convencionales (Stairmand, Lapple, Peterson) dan valores de diseño máximo de 70% esto porque se obtuvieron para gases limpios, se requiere corrección por carga de partículas.</p> <p>Propone corrección por carga de polvo.</p>	<p>-Propone un procedimiento iterativo (Prueba y error) de diseño. Se modifica geometría de ciclón propuesta y velocidades hasta alcanzar valores deseados de dP y eficiencia de colección.</p> <p>-Existe error de homogenidad dimensional en ecuación 11 para calcular la velocidad de Saltación, se debe corregir antes de usarse para obtener resultados lógicos.</p>

1984	<p>“Evaluating cyclone efficiencies from stream compositions” ChEng. 4/1984 Tulsi D, Taward, Friederick A. Zenz</p>	<p>- Presenta en forma gráfica una corrección de la eficiencia de colección estimada de acuerdo a procedimientos std.</p>	<p>-Evalúa el efecto de la concentración de partículas en el cálculo de la eficiencia de colección.</p>
1985	<p>”Further development of the cyclone preheater on the basis of model investigations” [6] ZKG No 2/85 (pp67 – 76) W. Kreft, H.W. Thiemeyer and R. Beyer, Bekum</p>	<p>- Remarca la existencia de una diferencias en el diseño de ciclones cuando se trabaja con temperatura elevada y concentración de partículas grande. - Los criterios de similaridad que usa en modelación física son: Geométrica (Vector dimensión 7) Dinámica(Números adimensionales) Carga de partículas.</p>	<p>- Define un procedimiento para diseño de ciclones vía modelación física en frío, seguida por modelación a temperatura en planta piloto (Muy laboriosas y caras) y finalmente prototipo. La carga de polvo es menos importante que la velocidad de entrada, (A más velocidad de entrada por Tiempo- Menor eficiencia). La eficiencia solo es Buena en un rango pequeño de velocidad.</p>
1986	<p>Investigations of cyclone preheater with a cold model[7] Milton González Valdez Chemical Engineering vol 93 no 7/1986 pp 119 ZKG No 12/86 (pp 668 – 670) Peng Fei, Tinjin, China</p>	<p>Evalúa el efecto de una serie de “deflectores” para orientar el flujo de gases en la entrada del ciclón y como afecta la caída de presión. Se utilizo un modelo de 300mm de diámetro.</p>	<p>En base a una regresión numérica se obtiene una ecuación que representa la relación existente entre la pérdida de presión y la geometría.</p>
1989	<p>Design methods for cyclone preheater of rotary kilns plants [8] ZKG No 11/88 (pp 551-555) L.M. Ludera</p>	<p>- Establece algunos valores mínimos que se deben cumplir cuando se diseñan ciclones para un precalentador en la industria del cemento.</p>	<p>Muestra los principales problemas y diferencias de diseño en una línea de calcinación con precalentador en la industria del cemento, como son el efecto de temperaturas altas y separación parcial de partículas, así como el efecto de cambios en la geometría de ciclones.</p>
1989	<p>“Cyclone Collection Efficiency at Very High Temperatures” [9]</p>	<p>Utiliza un aparato de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro para estudiar el efecto de temperatura en un ciclón usando gases calientes. El efecto de densidad vs viscosidad y carga de polvo son analizados.</p>	<p>- El efecto de la carga de polvo tiene una influencia fuerte en la eficiencia de colección. Este efecto se ve incrementado a alta temperatura.</p>
1993	<p>“Unconventional Cyclone Separators” [10]</p>	<p>- Establece un procedimiento de cálculo de eficiencia de ciclones que depende de geometría del ciclón y del flujo. - Se usan ecuaciones que involucran exponenciales y logaritmos.</p>	<p>- Establece que el factor de control de la eficiencia de colección es el diámetro del ciclón. - Fijando un dP tenemos que , a menor diámetro mayo eficiencia. - La eficiencia de colección incrementa al aumentar la velocidad de entrada con una velocidad tangencial mínima</p>

1994	<p>“Collection efficiency and pressure drop for a rotary flow cyclone” Filtration & Separation, Vol. 31, No6, Sep/Oct (pp- 63 -636)</p>	<p>Modelo matemático para estimar la eficiencia de colección y la caída de presión de un ciclón dado. El modelo esta basado en suposiciones para simplificar la naturaleza del flujo.</p>	<p>Estudia el caso de ciclones con “pantallas” deflectoras rotacionales a separar partículas de aceite de una corriente de gases para escala industrial.</p>
1995	<p>“Development of an effective Cyclone Simulator Under Excell” [12]</p>	<p>- Estima la eficiencia de colección y la caída de presión de uno o varios ciclones en paralelo usando los sig. datos : Número de ciclones, Diámetro del ciclón, G: Vector de dimensión 7 (Características de geometría), Flujo, Carga y distribución de partículas. - La arquitectura del programa es en cuatro diferentes unidades: Solución del problema, Base de datos, Interfase gráfica, Selección del problema (Diseño, operacional).</p>	<p>- Utiliza la plataforma de Excel para “programar” las ecuaciones experimentales de literatura y proporcionar un simulador básico. - La aplicación del simulador es a nivel diseño , o bien, análisis de problemas operativos.</p>
2006	<p>Exact Solution of the Bidirectional Vortex Anand B. Vyas* and Joseph Majdalani AIAA JOURNAL Vol. 44, No. 10, October 2006</p>	<p>Se presenta una solución no viscoso que describe el camo de flujo Bidireccional del vortex de un ciclón usando como modelo una cámara cilíndrica. Este estudio presenta el análisis del campo de flujo y mezcldo de gases en una cámara rotacional de alto momentum. El modelo esta basado en un análisis no reactivo de flujo con simetría axial e incompresible.</p>	<p>Captura detalles del patrón de flujo de la entrada y la salida del vortex para una cámara con dimensión finita.</p>

APÉNDICE B.- Modelos Fluent Casos I, II y III

Anexo B: Modelo Fluent Casos I,II y III

Programa utilizado: ANSYS FLUENT

Versión: 3d, dp, segregated, RSM (3d, double precision, segregated, Reynolds stress model)

Release: 6.0.12

Title:

Modelos

Modelo	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous	Reynolds stress model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
RSM Wall Reflection Effects Option	Enabled
RSM Wall B.C. Option (solve k)	Enabled
Quadratic Pressure-Strain Option	Disabled
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Enabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Condiciones de frontera

Zonas		
nombre	id	tipo
fluid	2	fluid
vortex-shadow	9	wall
pared	3	wall
pared_int	4	interior
vortex	5	wall
cono	6	wall
entrada	7	velocity-inlet
salida	8	outflow
default-interior	10	interior

Condiciones de frontera

 Fluido

Condición	Valor
Material Name	gas
Specify source terms?	no
Source Terms	()
Specify fixed values	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	()
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

vortex-shadow

	Condición	Valor

--	Enable shell conduction?	no
	Wall Motion	0
	Shear Boundary Condition	0
	Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
	Apply a rotational velocity to this wall?	no
	Velocity Magnitude	0
	X-Component of Wall Translation	1
	Y-Component of Wall Translation	0
	Z-Component of Wall Translation	0
	Define wall velocity components?	no
	X-Component of Wall Translation	0
	Y-Component of Wall Translation	0
	Z-Component of Wall Translation	0
	Discrete Phase BC Type	2
	Normal	((polynomial angle
1))		
	Tangent	((polynomial angle
1))		
	Impact Angle Function	((polynomial angle
1))		
	Diameter Function	((polynomial 1))
	Velocity Exponent Function	((polynomial 0))
	Rotation Speed	0
	X-Position of Rotation-Axis Origin	0
	Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
	Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
	X-Component of Rotation-Axis Direction	0
	Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
	Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
	X-component of shear stress	0
	Y-component of shear stress	0
	Z-component of shear stress	0

wall

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Discrete Phase BC Type	2
Normal	((polynomial angle 1))
Tangent	((polynomial angle 1))
Impact Angle Function	((polynomial angle 1))
Diameter Function	((polynomial 1))
Velocity Exponent Function	((polynomial 0))
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pared

Condición Valor

vortex

Condición	Valor
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Discrete Phase BC Type	2
Normal	((polynomial angle 1))
Tangent	((polynomial angle 1))
Impact Angle Function	((polynomial angle 1))
Diameter Function	((polynomial 1))
Velocity Exponent Function	((polynomial 0))
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

cono

Condición	Valor
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Discrete Phase BC Type	3
Normal	((polynomial angle 1))
Tangent	((polynomial angle 1))
Impact Angle Function	((polynomial angle 1))
Diameter Function	((polynomial 1))
Velocity Exponent Function	((polynomial 0))
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

entrada

Condición	Valor
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	18.299999
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	0.25
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	7.1999998
Turbulent Viscosity Ratio	10
Reynolds-Stress Specification Method	0
UU Reynolds Stresses	1
VV Reynolds Stresses	1
WW Reynolds Stresses	1
UV Reynolds Stresses	0
VW Reynolds Stresses	0
UW Reynolds Stresses	0
Discrete Phase BC Type	4

salida

Condición	Valor
Flow rate weighting	1
Discrete Phase BC Type	4

default-interior

Condición	Valor
-----------	-------

Solver Controls

Ecuaciones

Ecuación	Solved
Flow	yes
Turbulence	yes
Reynolds Stresses	yes

Numerics

Numeric	Activa
Absolute Velocity Formulation	yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Turbulence Kinetic Energy	0.8
Turbulence Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
Reynolds Stresses	0.5
Discrete Phase Sources	0.5

Linear Solver

Reduction Variable	Solver	Termination Type	Residual Criterion	Tolerance
Pressure		V-Cycle	0.1	
X-Momentum		Flexible	0.1	0.69999999
Y-Momentum		Flexible	0.1	0.69999999
Z-Momentum		Flexible	0.1	0.69999999
Turbulence Kinetic Energy		Flexible	0.1	0.69999999
Turbulence Dissipation Rate		Flexible	0.1	0.69999999
Reynolds Stresses		Flexible	0.1	0.69999999

Discretización Esquema

Variable	Esquema
Pressure	Standard
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE
Momentum	Second Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind
Reynolds Stresses	Second Order Upwind

Solución Límites

Valor	Límite
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

 Material Propiedades

Material: gas (fluido)

Propiedad	Unidades	Método	Valor(es)
Density	kg/m3	constant	0.63
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	2.5400001e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

 Material: aluminum (solid)

Propiedad	Unidad	Método	Valor(es)
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

Material: calcium-carbonate (inert-particle)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	2800
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	856
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	2.25