

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un  
cyclón tangencial

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

## ***Agradecimientos***

A Luismi y Ana, por su dirección, colaboración y asesoramiento. Por darme la oportunidad de introducirme en el mundo de la investigación. Gracias a los dos por vuestra ayuda constante para permitirme realizar y completar este proyecto con más facilidad.

A toda mi familia, especialmente a mi madre, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera. Siempre creyeron en mis posibilidades y me animaron tanto en los buenos como en los malos momentos. A mi abuelo Ángel que hoy por hoy ya no está entre nosotros y por muy poco no ha visto completado mi sueño, el cual le hubiera dado mucha alegría.

A mis compañeros y compañeras de la universidad, a los cuales considero grandes amigos por el tiempo compartido y las experiencias vividas juntos. Gracias por vuestra compañía y apoyo incondicional en todo momento y hacer que todo haya sido mucho más divertido.

A mis amigos y amigas de toda la vida, por su compañía, su apoyo absoluto y su compresión en todo momento. Gracias por estar ahí siempre.

A Rosa que aunque hoy día no está en mi vida, ha sido una persona muy importante para lograr llegar a mi meta. Siempre te estaré agradecido por tu ayuda y comprensibilidad.

Muchas gracias a todos, sin vosotros todo lo que he conseguido no hubiera sido posible.

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

**TABLA DE CONTENIDOS**

i.	Índice .....	5
ii.	Índice de figuras .....	7
iii.	Índice de tablas .....	9
iv.	Nomenclatura .....	10

**i. Índice**

1.	INTRODUCCIÓN: ALCANCE Y OBJETIVO .....	15
2.	INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE PARTÍCULAS EN LA CAÍDA DE PRESIÓN DE UN CICLÓN .....	21
2.1	Introducción .....	21
2.2	Principio de funcionamiento de un ciclón .....	23
2.3	Clasificación de ciclones .....	25
2.4	Geometría de un ciclón .....	29
2.5	Patrón de flujo .....	30
2.6	Eficiencia de un ciclón .....	33
2.7	Caída de presión en un ciclón .....	35
2.8	Modelos para el coeficiente, $\zeta_g$ , de caída de presión en vacío .....	37
2.8.1	Modelo de Shepherd y Lapple (1939) .....	38
2.8.2	Modelo de Alexander (1949) .....	39
2.8.3	Modelo de Casal y Martínez (1983) .....	40
2.9	Modelos para el coeficiente, $\zeta_s$ , de caída de presión en carga .....	41
2.9.1	Modelo de Briggs (1946) .....	41
2.9.2	Modelo de Smolik (1975) .....	42
2.9.3	Modelo de Kaskakov (1990) .....	42
2.10	Modelo de Enrico Grieco y Luca Marmo .....	43
3.	ANÁLISIS EXPERIMENTAL .....	45
3.1	Descripción teórica de instalación .....	45
3.1.1	Equipos principales e instrumentación de la instalación .....	45
3.1.2	Funcionamiento de la instalación .....	54
3.1.3	Aplicaciones y ventajas/desventaja de la instalación .....	56
3.2	Planteamientos de los ensayos .....	57
3.3	Resultados experimentales .....	61
3.3.1	Comparación entre las diferentes alternativas teórico-experimentales .....	61
3.3.2	Selección de la correlación adecuada y ajuste de la misma .....	69

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

4.	CONCLUSIONES.....	75
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

**ii. Índice de figuras**

Figura 1. Diagrama general de los procesos y los sistemas de captación de CO<sub>2</sub> adaptada de [1].

Figura 2. Movimiento de las partículas en un ciclón.

Figura 3. Vórtices en un ciclón tangencial.

Figura 4. Curvas de eficiencia de los ciclones en función del tamaño (diámetro) de partícula. Figura adaptada de [4].

Figura 5. Diferentes disposiciones geométricas en ciclones [5].

Figura 6. Dimensiones de un ciclón.

Figura 7. Perfil de la velocidad tangencial en un ciclón tangencial. Figura adaptada de [6].

Figura 8. Perfil de las diferentes componentes de la velocidad en un ciclón tangencial de flujo inverso: (a) tangencial, (b) radial. (c) axial [6].

Figura 9. Vista delantera del ventilador.

Figura 10. Vista trasera del ventilador más motor eléctrico.

Figura 11. Conjunto de válvulas del circuito de carbonatación.

Figura 12. Lecho fluido circulante del circuito de carbonatación.

Figura 13. Ciclón tangencial.

Figura 14. Filtros de manga.

Figura 15. Loopseal del circuito de carbonatación.

Figura 16. Conexiones de las loopseals de los circuitos de carbonatación y calcinación

Figura 17. Conexiones de la loopseal del circuito de carbonatación.

Figura 18. Calentador eléctrico (vista frontal).

Figura 19. Calentador eléctrico (vista lateral).

Figura 20. Válvula de mariposa (Tipo: cuarto de giro).

Figura 21. Instalación de experimentación.

## Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

Figura 22. Conexión de la loopseal con lecho fluido circulante del circuito de carbonatación.

Figura 23 Configuración del circuito de carbonatación de la instalación.

Figura 24. Representación de los resultados de la caída de presión en vacío.

Figura 25. Representación de los resultados de la caída de presión en vacío teórica respecto de la experimental.

Figura 26. Representación de los resultados teóricos de la caída de presión en carga respecto de los datos experimentales.

Figura 27. Representación de los resultados de la caída de presión en carga en función de la misma.

Figura 28. Representación de los resultados de la caída de presión en carga en función de la velocidad.

Figura 29. Representación de los resultados teóricos de la caída de presión en carga respecto de los datos experimentales.

**iii. Índice de tablas**

Tabla 1. Modelos teóricos de la caída de presión de los ciclones.

Tabla 2. Datos geométricos de los ciclones de la instalación.

Tabla 3. Condiciones de operación del ciclón de carbonatación.

Tabla 4. Rango de parámetros de operación de los dos tipos de ensayos.

Tabla 5. Números de Euler en vacío calculados por diferentes modelos teóricos.

Tabla 6. Resultados experimentales de los ensayos en vacío realizados en el ciclón de la instalación.

Tabla 7. Valores de la función  $R^2$  de los diferentes modelos teóricos analizados.

Tabla 8. Resultados experimentales de los ensayos en carga realizados en el ciclón de carbonatación de la instalación.

Tabla 9. Valores de la función  $R^2$  los diferentes modelos teóricos analizados.

Tabla 10. Valores de la función  $R^2$  de los modelos teóricos e investigados analizados.

## Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

### iv. Nomenclatura

a: Altura de la entrada del ciclón de tipo ranura (rectangular) [m]

$A_{c\text{ entrada}}$ : Área de la entrada del ciclón [ $m^2$ ]

$A_{lecho}$ : Área del lecho fluido circulante del circuito de carbonatación [ $m^2$ ]

b: Anchura de la entrada del ciclón de tipo ranura (rectangular) [m]

B: Constante de la correlación investigada

$C_n$ : Contante de la velocidad tangencial

$C_{si}$ : Concentración de partículas (carga de operación) [ $kg_{sol}/kg_{gas}$  o  $g_{sol}/kg_{gas}$ ]  
[ $C_{si}=G_s/(v_{zi}\cdot\rho\cdot A_{c\text{ entrada}})$  en  $kg_{sol}/kg_{gas}$ ]

d: Diámetro (tamaño) de la partícula [ $\mu m$ ]

$d_{50}$ : Diámetro de partícula para el que su eficiencia es del cincuenta por ciento [ $\mu m$ ]

$D_c$ : Diámetro del ciclón [m]

$D_d$ : Diámetro de la salida inferior del ciclón [m]

$D_{lecho}$ : Diámetro del lecho fluido circulante del circuito de carbonatación [m]

$D_x$ : Diámetro del “vortex finder” [m]

$f_g$ : Parámetro del Modelo de Alexander

g: Aceleración gravitacional media de la Tierra [ $m/s^2$ ]

$G_s$ : Caudal de partículas en la corriente de gas ( $G_s=m_p/t$ )[ $kg_{sol}/s$ ]

h: Altura de la parte cilíndrica del ciclón ( $H-H_c$ ) [m]

H: Altura total del ciclón [m]

$H_c$ : Altura de la parte cónica del ciclón [m]

$I_v$ : Inventario de partículas ( $Kg_{sol}$ )

$M_a$ : Masa de partículas que entran en un ciclón [ $kg_{sol}$ ]

$M_c$ : Masa de las partículas capturadas por un ciclón [ $kg_{sol}$ ]

$m_p$ : Masa de partículas para la medida de la circulación de partículas [ $kg_{sol}$ ]

## Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

m: Constante de la correlación investigada

$\dot{m}_e$ : Relación (ratio) de carga en el ciclón [ $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{kg}_{\text{gas}}$ ]

$\dot{m}_g$ : Caudal másico del gas ( $\text{Kg}_g/\text{s}$ )

$\dot{m}_s$ : Caudal másico de partículas ( $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{s}$ )

n: Constante de la correlación investigada

$n_1$ : Constante de la correlación del Modelo de Alexander

p: Presión estática de un fluido en la ecuación de Bernoulli [Pa]

$Q_{\text{ciclón ent}}$ : Caudal del fluido en la entrada del ciclón [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$Q_{\text{lecho}}$ : Caudal del lecho fluido circulante del circuito de carbonatación [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

r: Radio donde se calcula la velocidad tangencial [m]

$R_x$ : Radio del “vortex finder” [m]

$R^2$ : Función estadística

S: Longitud del “vortex finder” [m]

t: Tiempo para la medida de la circulación de partículas [s]

$T^{\circ}$ : Temperatura de la corriente de gas [ $^{\circ}\text{C}$ ]

v: Velocidad del fluido (gas) en la ecuación de Bernoulli [m/s]

$v_r$ : Velocidad radial [m/s]

$v_t$ : Velocidad tangencial [m/s]

$v_z$ : Velocidad axial del fluido en el ciclón [m/s]

$v_{ze}$ : Velocidad axial del fluido en la entrada del ciclón [m/s]

$v_{zi}$ : Velocidad experimental axial del gas en la entrada del ciclón [m/s]

$v_{zlecho}$ : Velocidad experimental axial del gas en el lecho fluido circulante [m/s]

x: Altura del fluido en la ecuación de Bernoulli [m]

z: Exponente de vórtice

$\frac{1}{2}\rho v^2$ : Presión dinámica

# Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

## *Nomenclatura Griega*

$\Delta P_c$ : Caída de presión (pérdida de carga) en el ciclón [Pa]

$\Delta P_{c\ Cal}$ : Caída de presión en el ciclón por la correlación investigada [Pa]

$\Delta P_{c\ Cal1}$ : Caída de presión en el ciclón dada la correlación investigada operando a velocidad constante y carga de partículas variable [Pa]

$\Delta P_{c\ Baskakov}$ : Caída de presión en carga del ciclón por el modelo de Baskakov [Pa]

$\Delta P_{c\ Briggs}$ : Caída de presión en carga del ciclón por el modelo de Briggs [Pa]

$\Delta P_{c\ exp}$ : Caída de presión experimental en el ciclón ( $\Delta p$  cyclone) [Pa o mbar]

$\Delta P_{c\ Grieco}$ : Caída de presión en carga del ciclón por el modelo de Grieco [Pa]

$\Delta P_{c\ Smolik}$ : Caída de presión en carga del ciclón por el modelo de Smolik [Pa]

$\Delta P_{c\ teo-cyclone}$ : Caída de presión teórico-experimental del ciclón [Pa]

$\Delta P_{c\ teo\ Alexander}$ : Caída de presión teórica en vacío del ciclón por el modelo de Alexander [Pa]

$\Delta P_{c\ teo\ Casal}$ : Caída de presión teórica en vacío del ciclón por el modelo de Casal [Pa]

$\Delta P_{c\ teo\ Coker}$ : Caída de presión teórica en vacío del ciclón por el modelo de Coker [Pa]

$\Delta P_{c\ teo\ Shepherd}$ : Caída de presión teórica en vacío del ciclón por el modelo de Shepherd [Pa]

$\eta$ : Eficiencia de un ciclón

$\lambda$ : Coeficiente de fricción del fluido (gas)

$\rho$ : Densidad del fluido (gas) [ $\text{kg}_{\text{gas}}/\text{m}^3$ ]

$\rho_p$ : Densidad de la partícula [ $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{m}^3$ ]

$\zeta_{g\ exp}$ : Número de Euler en vacío experimental

$\zeta_c$ : Número de Euler del ciclón

$\zeta_g$ : Número de Euler del ciclón operando en vacío

$\zeta_s$ : Número de Euler del ciclón operando en carga

$\zeta_{s\ exp}$ : Número de Euler experimental en carga [ $\zeta_{s\ exp} = \Delta P_{c\ exp} / ((1/2) \cdot \rho \cdot v_{zi}^2)$ ]

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un  
cyclón tangencial

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial

## 1. INTRODUCCIÓN: ALCANCE Y OBJETIVO

Se sabe que la mayoría de la energía primaria se utiliza para generar electricidad. La producción de dicha energía en gran parte proviene de sistemas de combustión. Estos sistemas energéticos son alimentados con combustibles de tipo fósil como por ejemplo carbón, petróleo o gas natural. Su combustión da lugar a diferentes gases como son el vapor de agua y el dióxido de carbono. En cuanto a la emisión de vapor de agua, el propio ciclo del agua es capaz de regular su concentración en la atmósfera manteniéndola constante sin producir ningún riesgo, por lo tanto dicha emisión no es un problema. Sin embargo, no ocurre lo mismo en el caso del dióxido de carbono porque las plantas no son capaces de absorberlo a la misma velocidad a la que es generado. De esta manera, un exceso de CO<sub>2</sub> provoca una subida de la temperatura, dando lugar a un calentamiento global, del que se sabe que produce un aumento de la actividad de las tormentas o el derretimiento de las placas de hielo de los polos, lo que daría lugar a diversos problemas ambientales, como inundaciones y desertizaciones en los continentes. Por esta causa, el dióxido de carbono se convierte en la principal problemática que presenta la combustión de carbón, petróleo y gas natural.

Se han llevado a cabo diversos análisis de gases retenidos en muestras de hielo de la Antártida y Groenlandia y han permitido conocer la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico así como de otros gases de efecto invernadero de los últimos 150.000 años. Con estos datos, se ha detectado que los niveles actuales de CO<sub>2</sub> en la atmósfera son los mayores desde que se tiene constancia y que se ha producido un aumento sustancial y acelerado en los últimos 160 años, es decir, desde el inicio de la revolución industrial. También se ha descubierto que el CO<sub>2</sub> existente en el suelo cada vez se fuga más rápido, lo que da lugar a una aceleración aún mayor del calentamiento global. Conocido esto es lógico que en la actualidad el control de la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera sea uno de los objetivos principales para alcanzar niveles adecuados de calidad ambiental.

Por lo tanto, es necesario pensar alternativas para reducir y controlar estas emisiones de dióxido de carbono. Una de ellas podría ser el uso de las energías renovables ya que no aumentan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y ayudan a tener un desarrollo sostenible. Dicho esto las energías renovables serían una de las mejores alternativas. Pero el gran problema que presentan es que actualmente la tecnología conocida no es suficiente para que toda la energía que se consume sea de origen renovable. En definitiva, se precisa seguir investigando en las energías renovables para conseguir su implantación a escala global.

## Introducción: Alcance y objetivo

Por este motivo, una alternativa que hoy por hoy está teniendo mucha consideración es la captura y almacenamiento de dióxido de carbono. Existen diferentes procesos que se explican a continuación, pero el objetivo de todos ellos es el mismo reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Pero esta alternativa presenta también una problemática importante que es la necesidad de almacenar el CO<sub>2</sub> capturado, ya que su aplicación es muy reducida. Además, en algunos casos estos sistemas de captura no evitan que su uso reduzca el rendimiento global de la planta, debido a que dichos sistemas para operar requieren absorber una cierta energía.

En la actualidad, el CO<sub>2</sub> separado en plantas industriales se utiliza para satisfacer las demandas de sus propios procesos y no para almacenarlo. La captura de CO<sub>2</sub> hasta el momento ha sido aplicada en pequeñas plantas de generación de energía ya que para las grandes plantas se encuentra en fase de desarrollo. La captura en procesos industriales corrientes se lleva a cabo desde hace unos 80 años aunque la mayoría del CO<sub>2</sub> que es capturado es vertido a la atmósfera porque no hay incentivos o requerimientos a ser almacenado. El dióxido de carbono es capturado en procesos como la purificación del gas natural y producción de gas sintético con contenido de hidrógeno para elaborar amoniaco, alcohol y combustibles líquidos sintéticos [1]. La mayoría de las técnicas empleadas para la captura de CO<sub>2</sub> en los ejemplos mencionados son similares a la usada en la captura en precombustión. Existen tres procesos principales de captura de dióxido de carbono como son: en Postcombustión, en Precombustión y oxícombustión.

Los sistemas de captura en precombustión alteran el combustible antes de su combustión en un reactor con vapor y aire u oxígeno, para dar lugar una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno que se llama gas de síntesis [1]. Este primer proceso es complejo y caro. El monóxido de carbono reacciona con el vapor en un segundo reactor, en el cual se produce CO<sub>2</sub> y más hidrógeno. Esta mezcla puede separarse en un flujo de CO<sub>2</sub> y otro de hidrógeno, frecuentemente por un proceso de absorción física o química. El resultado es un combustible rico en hidrógeno el cual actualmente puede ser usado en algunas aplicaciones, tales como: pilas de combustible, turbinas de gas, fabricación de fertilizantes, calderas y hornos. Esta técnica se aplica en ciclos combinados de gasificación integrada (CCGI).

Los sistemas de captura en oxícombustión utilizan oxígeno puro en vez del aire, el cual está compuesto mayormente por nitrógeno, para la combustión del combustible. El objetivo es producir un gas de combustión compuesto principalmente por agua y dióxido de carbono. Este gas de combustión que se origina tiene altas concentraciones de CO<sub>2</sub> ya que no existe nitrógeno [1]. Posteriormente, el vapor de agua se extrae fácilmente por condensación.

Por otro lado, este proceso requiere de la separación previa del oxígeno del aire para obtener un gas con una pureza del 95% al 99%[1]. Lo que se traduce en un alto coste para la aplicación de esta tecnología. El desafío de cómo separar el oxígeno del resto del aire se la criogenización del aire. Este proceso de captura puede emplearse en hornos, calderas y sistemas de turbinas de gas.

La captura de dióxido de carbono en postcombustión consiste en separar el CO<sub>2</sub> de los gases producidos tras la combustión. El objetivo de esta tecnología es poder aplicarla en grandes centrales de carbón, ciclos combinados de gas natural y biomasa ya que según los estudios realizados es económicamente viable y no se necesita hacer grandes modificaciones en la central donde se va instalar. Existen diferentes métodos de captura de CO<sub>2</sub> en post-combustión aunque la mayoría de ellos se hallan todavía en fases de demostración o investigación.

Algunos de estos métodos se basan en un proceso de absorción química, en el cual utilizan un solvente para capturar la fracción de CO<sub>2</sub> existente en los gases de combustión. Una de estas técnicas es el lavado químico que emplea un solvente líquido como por ejemplo, la monoetanolamina [1]. Otra consiste en un ciclo de carbonatación-calcinación que por medio de un sorbente sólido, como es el óxido de calcio, captura el dióxido de carbono. Dicho proceso se explica con mayor detenimiento posteriormente. Pero ambas técnicas están todavía en fase de desarrollo. Otros procesos en postcombustión, que actualmente se encuentran en fase de investigación, son la criogenización que condensa el CO<sub>2</sub> existente en los gases de combustión, la eliminación de CO<sub>2</sub> con otros adsorbentes sólidos, o pasar la corriente de gases de la combustión a través de una membrana y atrapar el CO<sub>2</sub> [2]. A continuación en la figura 1 se muestran una representación esquemática de los procesos de captura de dióxido de carbono.

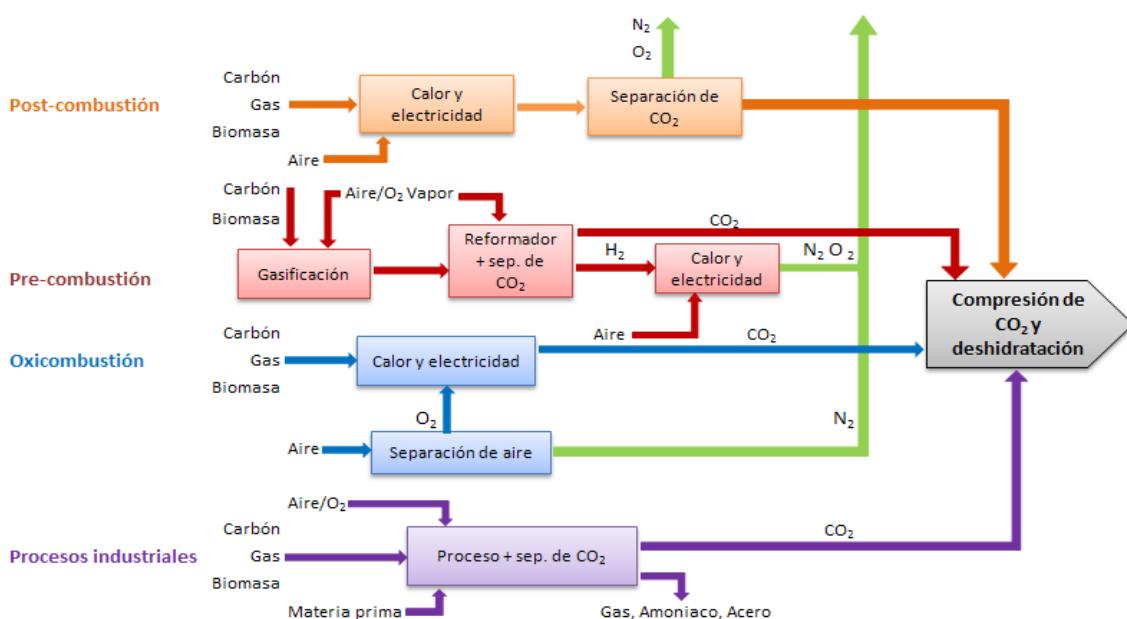


Figura 1. Diagrama general de los procesos y los sistemas de captación de CO<sub>2</sub> adaptado de [1].

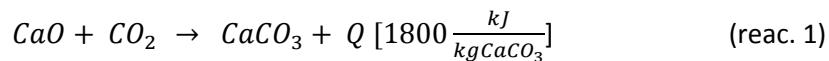
## Introducción: Alcance y objetivo

En este proyecto se estudia una instalación, que se basa en un sistema de captura de dióxido de carbono en postcombustión, con un ciclo de carbonatación-calcinación. Un *ciclo de carbonatación-calcinación* es en un proceso de absorción química, en el cual se utiliza óxido de calcio (CaO), conocido como cal, como sorbente regenerable de CO<sub>2</sub>. Este proceso se lleva a cabo en dos etapas (reacciones): la primera de ellas se conoce como carbonatación y la segunda como calcinación.

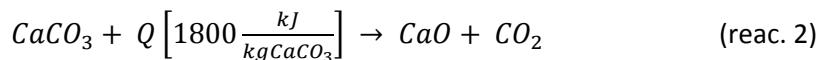
La reacción de carbonatación (reac. 1) se realiza en reactor a temperaturas cercanas a 650°C. El óxido de calcio absorbe el CO<sub>2</sub> existente en una corriente gaseosa. De esta forma se evita que el dióxido de carbono sea expulsado a la atmósfera. Finalmente, en esta etapa se obtiene un sólido de carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) para que posteriormente se recupere el dióxido de carbono en el calcinador. Por otro lado, se produce calor ya que es una reacción exotérmica.

En cuanto a la reacción de calcinación (reac. 2), la segunda etapa, se realiza en un reactor a temperaturas próximas a 900°C. En dicho reactor se produce una reacción química en la cual se libera el CO<sub>2</sub> existente en la caliza (CaCO<sub>3</sub>). Esta reacción es endotérmica por lo que es necesario un aporte de calor, el cual será el único consumo energético de este ciclo. Las reacciones químicas que se producen son las siguientes:

- Reacción de carbonatación:



- Reacción de calcinación:



Por otro lado, los reactores en los cuales se realizan estas reacciones pueden ser de cualquier tipo: calderas convencionales de combustión, quemadores de gas o lechos fluidos. Esta última opción es la mejor de todas porque un lecho fluido es un equipo que permite una buena mezcla de gas y sólidos. Además puede controlar que la temperatura sea homogénea. Estos dos factores son importantes para tener unas reacciones favorables y con ello un buen rendimiento del ciclo. Por lo tanto, la instalación en la cual se experimentó, como se explicará un poco más adelante, consta de dos lechos fluidos.

Hay que mencionar que esta nueva tecnología de captura de CO<sub>2</sub> por medio de un ciclo de carbonatación-calcinación puede ser aplicada, por ejemplo, en centrales térmicas de carbón o ciclos combinados existentes y nuevos ya que el consumo de energía necesario para la regeneración del sorbente (calcinación) se podría recuperar integrando los flujos de calor a alta temperatura del ciclo de captura en un ciclo de vapor. Además con la utilización de esta técnica también es posible capturar óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).

La instalación de la que se dispone es de flujo frío, en ella no se producen reacciones químicas, ya que solo se pretende analizar la fluidodinámica de este proceso. La problemática que presenta esta instalación de captura de dióxido de carbono es poder medir de manera continua y no intrusiva el caudal de partículas. Actualmente esta medida del caudal de partículas es no continua debido a que no se puede medir en todo momento e intrusiva porque afecta al funcionamiento de la instalación produciendo cambios de presiones y pérdidas de partículas, como se explicará más adelante en esta memoria. El objetivo principal de este proyecto es realizar un estudio experimental (en la instalación) y teórico de los ciclones tangenciales de la instalación para lograr resolver este problema. En dicho estudio, se obtendrá una correlación de la caída de presión en los ciclones en función de la carga de partículas con la que trabaja y la velocidad del gas a la entrada. De esta manera, como tanto la caída de presión como la velocidad se pueden medir de forma continua y no intrusiva, se podrá calcular el caudal de partículas de forma continua y no intrusiva, a partir de dicha correlación, como se expondrá con más detenimiento a lo largo de la memoria. Por otro lado, como ambos ciclones tienen las mismas dimensiones geométricas y operarán bajo condiciones de trabajo iguales, entonces la correlación de la caída de presión será válida para los dos.

## Introducción: Alcance y objetivo

Las etapas que se siguen para lograr el objetivo de este proyecto se enumeran a continuación:

En primer lugar, se realiza un estudio del principio de funcionamiento, clasificación, patrón de flujo y eficiencia de separación de los ciclones tangenciales. Posteriormente, se realiza un estudio más exhaustivo para la compresión de la caída de presión que se produce en un ciclón. Por otro lado y como se verá en su correspondiente apartado, se elabora una documentación de los diferentes modelos teóricos para el cálculo de la caída de presión en un ciclón tangencial. Para ello, se ha buscado e investigado en bibliografía específica en dicho tema. Con todo esto, en esta primera etapa se pretende conocer las principales características que se rigen en un ciclón tangencial.

En segundo lugar, se realizan una serie de ensayos experimentales para obtener la caída de presión del ciclón. Estos ensayos se efectúan bajo diferentes condiciones de trabajo, variando la velocidad del gas a la entrada del ciclón y la carga de partículas. Se mide la presión a la entrada y salida del ciclón, para conocer la pérdida de carga.

En la tercera y última etapa se evalúan las correlaciones existentes de los diferentes modelos de caída de presión analizados. Seguidamente, se estudia y ajusta una correlación de la caída de presión por diferentes criterios de cálculo y se elige aquella que mejor se aproxima a los datos experimentales. Para concluir, esta correlación se valida comparándola junto con los métodos teóricos examinados y resultados experimentales para demostrar que la correlación obtenida es la más idónea para determinar la caída de presión los ciclones de la instalación. De este modo, con esta correlación se puede determinar de manera continua y no intrusiva el caudal de partículas que circula por la instalación, cumpliendo el objetivo de este proyecto.

## 2. INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE PARTÍCULAS EN LA CAÍDA DE PRESIÓN DE UN CICLÓN

### 2.1 Introducción

Los ciclones son dispositivos centrífugos que se utilizan para la separación de partículas sólidas suspendidas en una corriente gaseosa. Actualmente, estos equipos son los más empleados para realizar dicha tarea. Principalmente, debido a su baja inversión, fácil mantenimiento (no poseen piezas móviles) y que pueden trabajar en condiciones de funcionamiento complicadas. Básicamente, un ciclón tangencial está compuesto por un cilindro vertical con un fondo cónico. Normalmente tienen entrada tangencial y descarga axial aunque también existen con entrada y descarga axial.

Los ciclones en comparación con otros dispositivos de separación de partículas sólidas como las cámaras de sedimentación gravitacional, filtro, lavadores y precipitadores electrostático presentan las siguientes ventajas [3]:

- El material capturado queda seco y, normalmente, aprovechable.
- Bajo coste de inversión y mantenimiento.
- Por lo general los ciclones tienen eficiencias mayores que la cámara de sedimentación gravitacional.
- Pueden ser usados en condiciones extremas, en particular a altas temperaturas y presiones y con sustancias químicamente agresivas.
- No tienen partes móviles y son muy robustos
- La caída de presión es constante cuando se trabaja en las mismas condiciones de operación.
- Puede ser construido a partir de diferentes materiales, como por ejemplo de lámina de acero, metales fundidos, aleaciones, aluminio, plásticos, cerámicas, etc.
- Puede ser equipado con revestimientos de materiales capaces de resistir la erosión y corrosión.
- En algunos procesos, el ciclón puede encargarse de sólidos viscosos o pegajosos con ayuda de un riego líquido adecuado.
- Los ciclones también se pueden utilizar para separar gotas de líquido en suspensión en un gas y partículas sólidas en suspensión en un líquido. En este último caso se llaman hidrociclones.

## Introducción

Por otro lado, los ciclones también presentan una serie de desventajas [3] frente a otros tipos de dispositivos de separación de partículas sólidas como los anteriormente mencionados:

- Los ciclones no son los equipos más adecuados para separar partículas con diámetros menores de  $5\mu\text{m}$ , aunque en algunos casos concretos partículas mucho más pequeñas pueden llegar a ser separadas con un aceptable rendimiento.
- Tiene rendimientos bajos cuando opera fuera de su punto de funcionamiento óptimo, es decir, con tamaños de partículas más pequeños que para los que fue diseñado.
- Es propenso a erosionarse produciéndose un desgaste y ensuciamiento del mismo, sobre todo si los sólidos que está procesando son abrasivos o viscosos.
- Tiene altos costes de explotación debido a la energía requerida para superar la pérdida de presión.
- Los ciclones presentan eficiencias menores que los filtros de mangas, lavadores y precipitadores electrostáticos.
- Si el ciclón no es diseñado, mantenido y operado correctamente entonces trabajará por debajo del rendimiento esperado.

## 2.2 Principio de funcionamiento de un ciclón

El funcionamiento de los ciclones se basa en dar al flujo de gases una rápida rotación. De esta forma, las partículas son desplazadas por la acción de la fuerza centrífuga hacia las paredes del ciclón, lo que permite que las partículas más pesadas (mayor diámetro o densidad) se aglomeren y se separen de la corriente gaseosa. Como se puede observar en la figura 2, las partículas más pesadas se aproximan hacia la zona de la pared mientras que las menos pesadas se quedan en la zona central, no llegan a separarse de la corriente gaseosa y salen por la salida superior del ciclón. Por otro lado, con la actuación de la fuerza gravitacional, las partículas más pesadas descienden por las paredes hacia la salida inferior del ciclón.

Para explicar la trayectoria que describe el gas en el interior de un ciclón, hay que mencionar que dicha trayectoria describe un doble vórtice, en donde el gas desciende trazando una espiral en la región externa del interior del ciclón. Posteriormente el gas asciende limpio de partículas trazando otra espiral por la región central del interior del ciclón, como muestra la figura 3.

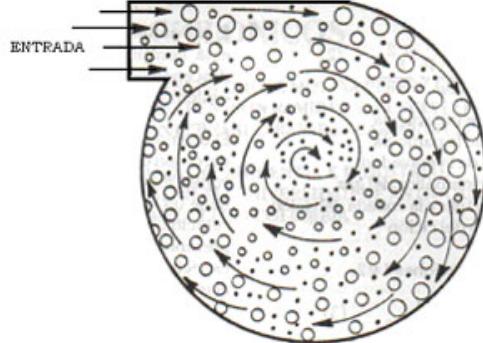


Figura 2. Movimiento de las partículas en un ciclón.

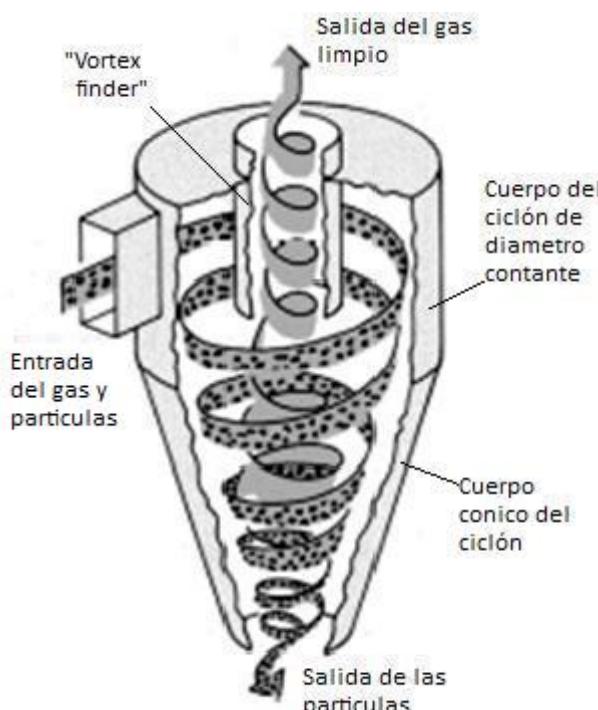


Figura 3. Vórtices en un ciclón tangencial.

Inicialmente, el gas con partículas circula por la entrada del ciclón con una trayectoria lineal y cuando el gas entra en el cuerpo del ciclón su movimiento cambia a una trayectoria helicoidal. Este movimiento es ocasionado por el diseño de la

## Principio de funcionamiento de un ciclón

entrada del ciclón, que produce que el gas entre con componente tangencial hacia las paredes internas del cuerpo del ciclón. El tipo de sección de entrada que más se usa para lograr este propósito es la sección rectangular, tal y como puede verse en la figura 3.

En la primera parte del cuerpo del ciclón donde su diámetro es constante, el gas cargado con partículas, describe una trayectoria axialmente descendiente en espiral. Es en esta zona donde se produce la separación de las partículas de mayor tamaño del gas debido a la actuación de la fuerza centrífuga, éstas se aglomeran y se deslizan descendiendo por las paredes del ciclón. La fuerza centrífuga varía su magnitud dependiendo de la velocidad tangencial del gas y del radio del cuerpo del ciclón. Por lo que, esta fuerza centrífuga puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional.

La parte cónica del ciclón es diseñada de tal forma que el gas es forzado a entrar en la región interna del ciclón, donde el movimiento en espiral (en dirección axial) es dirigido hacia arriba. Al disminuir el radio se produce un aumento de la velocidad tangencial del gas, esto explica por qué en el cono del ciclón es donde se presenta la mayor recolección de partículas, especialmente las de menor tamaño (diámetro). Las partículas siguen descendiendo deslizándose por las paredes internas hasta llegar a la salida inferior del ciclón donde son almacenadas en un recipiente determinado o recirculadas como es el caso de la instalación analizada en este proyecto.

Finalmente, el gas asciende con una trayectoria en espiral por la región central del ciclón. Esta corriente de gas se encuentra (casi en su totalidad) limpia de partículas de tamaño de partícula para el cual el ciclón fue diseñado que separase. Dicha corriente gaseosa se dirige hacia la salida superior del ciclón. Esta salida, que se conoce como “vortex finder”, se trata de un tubo de diámetro constante y de longitud similar a la parte del cuerpo del ciclón de diámetro constante, dependiendo del diseño que se quisiera realizar. Por lo tanto, el gas limpio atraviesa el “vortex finder” y sale del separador de partículas al siguiente proceso de limpieza, almacenamiento o a la atmósfera dependiendo de la aplicación de que se trate.

### 2.3 Clasificación de ciclones

Hoy en día, los ciclones son un dispositivo de separador de partículas ya muy estudiado, el diseño de éstos se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas. Estos dispositivos centrífugos pueden ser clasificados según [3]:

- La eficiencia del ciclón.
- La configuración de la entrada.
- La forma de su cuerpo.
- La dirección del fluido en la entrada y salida de los ciclones.
- La disposición geométrica.

En cuanto a los ciclones de entrada tangencial que se pueden clasificar según su *eficiencia* existen tres tipos [4], como pueden apreciarse en la siguiente figura 4:

- Ciclones de alta eficiencia.
- Ciclones convencionales.
- Ciclones de alta capacidad.

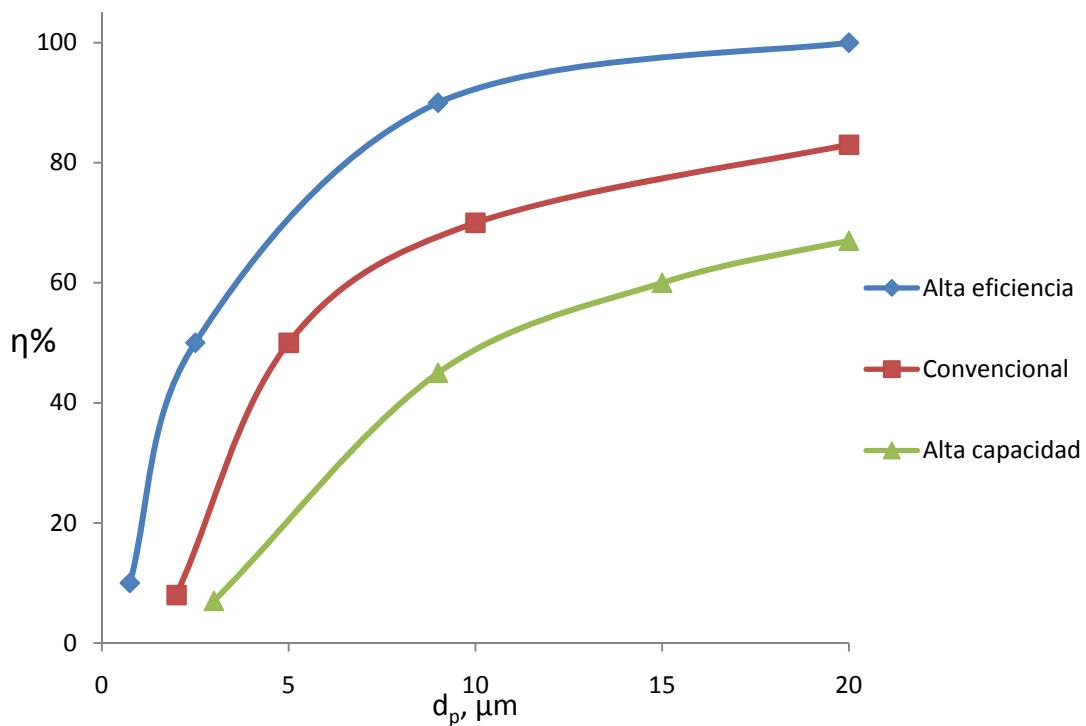


Figura 4. Curvas de eficiencia de los ciclones en función del tamaño (diámetro) de partícula.

Figura adaptada de [4].

Los ciclones de alta eficiencia son los que sufren mayores caídas de presión, lo cual requiere mayores costes de energía para transportar el gas. Por lo general, el diseño del ciclón está más restringido por una limitación de la caída de presión que por buscar la máxima eficiencia. Los ciclones de alta capacidad se utilizan en aplicaciones donde se requieren capturar partículas de diámetros mayores de 20  $\mu\text{m}$  porque presentan una eficiencia aceptable. En cuanto a los ciclones convencionales se puede decir que se encuentran en la zona intermedia entre los de alta eficiencia y alta capacidad.

Existen principalmente cuatro tipos de configuraciones diferentes de la *entrada de un ciclón*, tres de ellas son para un ciclón tangencial y la otra para uno axial. La primera de ellas, la entrada de sección circular es la más simple y barata. El problema de esta configuración es que el rendimiento es bajo. La segunda configuración se denomina entrada tipo ranura, aunque es más conocida como entrada de sección rectangular o tangencial. Este tipo de entrada es sencilla de construir, y su rendimiento generalmente es bueno. Por otro lado, hay que mencionar que para este tipo de entrada se necesita construir una zona de transición de la sección circular de la tubería a la rectangular de la entrada del ciclón. Con ello se redirecciona el movimiento de la corriente gaseosa y partículas, favoreciendo la circulación de dicha corriente a la entrada del ciclón, mejorando su eficiencia de separación. El tercer diseño de la entrada de un ciclón tangencial es el conocido como espiral o voluta. La característica geométrica principal de este tipo de entradas es que el área va disminuyendo lo que produce que el fluido se vaya comprimiendo. Esta configuración de entrada tiene un buen rendimiento incluso trabajando con altos flujos y/o diámetros de partículas grandes. La cuarta y última configuración de la entrada de un ciclón se denomina de álabes fijos y se aplica en ciclones axiales. Los álabes permiten que el gas entre al ciclón con dirección helicoidal paralela al eje del ciclón lo que favorece que la separación de las partículas sea muy buena.

Otra manera de clasificar los ciclones es según la *forma de su cuerpo* existen ciclones de cuerpo cilíndrico-cónico, habitualmente en ciclones tangenciales, o de cuerpo cilíndrico, normalmente en ciclones axiales.

Existe otra clasificación de los separadores de partículas centrífugos de acuerdo a la *dirección de flujo*. Existen ciclones de flujo inverso, en los cuales el flujo entra por la parte superior del ciclón y abandona el ciclón por el mismo sitio. Esta configuración es la más utilizada en el caso de ciclones cónicos (tangenciales). Por otro lado, existen ciclones de flujo directo, en los cuales el flujo entra por la parte superior del ciclón y lo abandona por la parte inferior del mismo. Esta configuración es la más utilizada en los ciclones de cuerpo cilíndrico (axiales).

Por último los ciclones pueden ser clasificados también según su *disposición geométrica* [5]. De acuerdo a ella se distinguen los siguientes tipos de separadores ciclónicos, que se pueden ver en la figura 5:

- (a) entrada tangencial y descarga axial.
- (b) entrada tangencial y descarga periférica.
- (c) entrada y descarga axiales.
- (d) entrada axial y descarga periférica.

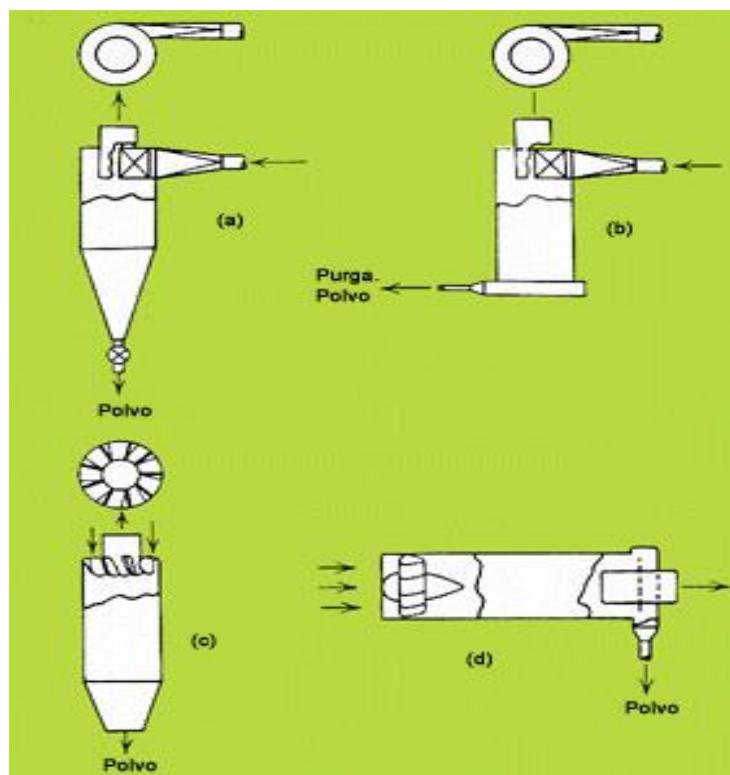


Figura 5. Diferentes disposiciones geométricas en ciclones [5].

- (a) Los ciclones de entrada tangencial y descarga axial representan el clásico ciclón.
- (b) En los ciclones con entrada tangencial y descarga periférica, lo que ocurre es que el gas sufre un retroceso en el interior del dispositivo como en los ciclones convencionales. Sin embargo, esta configuración presenta el inconveniente de que las partículas no son separadas en su totalidad de la corriente gaseosa.

## Clasificación de ciclones

- (c) Los ciclones con entrada y descarga axial se diferencian de las anteriores en que sus diámetros son más pequeños, pero gracias a esta característica su eficiencia es mayor aunque por otro lado su capacidad es menor.
- (d) En cuanto a los ciclones de entrada axial y salida periférica operan con un flujo directo de gran volumen. Se utilizan en aquellas aplicaciones donde un cambio en la dirección de la corriente gaseosa podría dar lugar un problema.

## 2.4 Geometría de un ciclón

En el diseño de la geometría el diámetro de ciclón ( $D_c$ ) tiene el papel más importante [3] ya que es la dimensión básica a partir de la cual se dimensiona todo el ciclón, todas las demás dimensiones simplemente son proporcionales a dicho diámetro. La geometría de un ciclón se determina por las siguientes dimensiones:

- Diámetro del ciclón (parte del cuerpo de diámetro constante),  $D_c$
- Altura de la parte cilíndrica del ciclón,  $h = H - H_c$
- Altura total del ciclón,  $H = 4 \cdot D_c$
- Diámetro del “vortex finder”,  $D_x = D_c/2$
- Longitud del “vortex finder”,  $S = 5 \cdot D_c/8$
- Altura y anchura de la entrada del ciclón (caso de sección rectangular),  $a$  y  $b$  respectivamente donde:  $a = D_c/2$  y  $b = D_c/4$
- Altura de la parte cónica del ciclón,  $H_c = 2 \cdot D_c$
- Diámetro de la salida inferior del ciclón,  $D_d = D_c/4$

En la figura 6 se representa un croquis de un ciclón de entrada tangencial donde se pueden ver las diferentes dimensiones mencionadas y que definen la geometría de un ciclón.

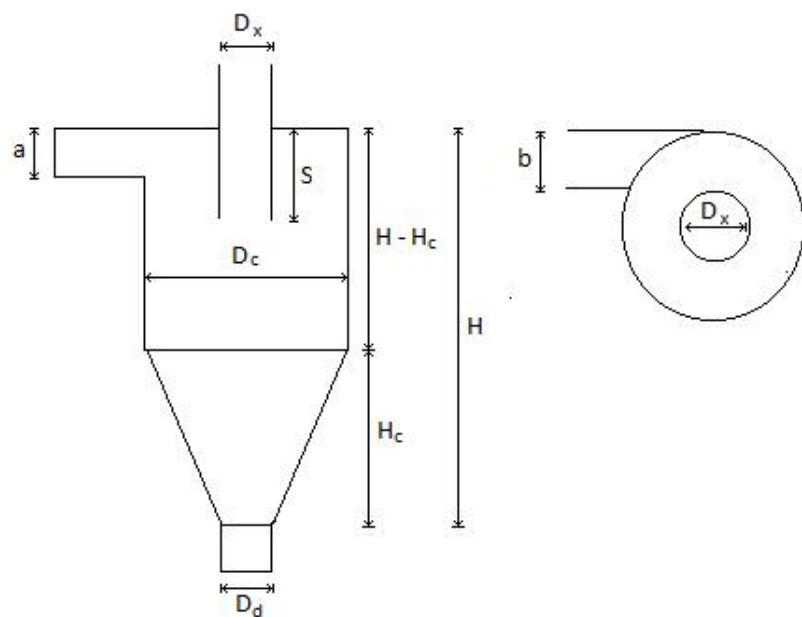


Figura 6. Dimensiones de un ciclón.

## 2.5 Patrón de flujo

La velocidad de la corriente gaseosa dentro de un ciclón consta de tres componentes: axial, radial y tangencial. Una vez que el gas entra en el ciclón se pueden distinguir dos zonas diferentes. Estas dos zonas se encuentran separadas por el llamado cilindro ideal de Stairmand [5] cuyo diámetro es  $0,4 \cdot D_x$  (siendo  $D_x$  el diámetro del “vortex finder”). Dicho cilindro separa la zona en la cual las partículas van a ser capturadas de aquella en la que van a escapar junto con el gas. Por ejemplo, si la partícula sigue una trayectoria cuya órbita se encuentra dentro del cilindro ideal de Stairmand y con una componente axial ascendente, la partícula abandonará el ciclón sin ser retenida. Si en caso contrario la órbita es exterior a este cilindro y con una componente axial descendente, entonces la partícula acabará depositándose en el fondo del ciclón. Estas dos zonas presentan diferentes características dinámicas y cinemáticas:

- En la zona próxima a la entrada del gas y en la más exterior del cilindro predomina la velocidad tangencial. La velocidad radial tiene un “sentido centrípeto”, en cuanto a la axial, es de sentido descendente.
- La zona interior del cilindro corresponde al llamado núcleo del ciclón. Dicha zona, como se ha mencionado anteriormente, tiene un diámetro aproximadamente igual a 0,4 veces el del “vortex finder”. En ella el flujo es altamente turbulento y las velocidades que predominan son la axial con sentido ascendente y la tangencial.

La distribución de la velocidad tangencial  $v_t$  en la dirección radial cumple la siguiente ecuación [6] en el interior de un ciclón tangencial:

$$C_n = v_t \cdot r^z \quad (1)$$

Donde  $C_n$  es una constante,  $r$  el radio y el exponente de vórtice “z” depende de  $r$ . Esta distribución de la velocidad tangencial en el interior de un ciclón puede apreciarse en la figura 7. Observando dicha figura se puede explicar que en la región interna cercana al eje de ciclón, el exponente “z” se acerca al valor de -1, lo que da lugar a un vórtice forzado. En cuanto a la región cercana a la pared dicho exponente se acerca a 1, lo que produce un vórtice libre. El vórtice forzado sólo abarca una región cercana a la línea central del ciclón (eje), de este modo el punto en el cual la velocidad tangencial logra su máximo valor está dentro del radio del “vortex finder” ( $R_x$ ), como puede verse en la figura 8. En la práctica, para la zona interna cuyo radio es menor a  $R_x$ , el exponente se aproxima a -1. Pero para la zona externa cuyo radio es mayor a  $R_x$  (excluyendo la disminución repentina que se da lugar muy cerca de la pared del ciclón) el exponente “z” se encuentra en un rango entre 0,4 - 0,8.

En cuanto a la velocidad axial,  $v_z$ , es la responsable del transporte de las partículas que se recolectan en el ciclón. Por este motivo su investigación y compresión tiene una gran importancia. Existe un modelo cuantitativo simple que supone una estructura de doble vórtice: una con valores radialmente constantes para la zona exterior del “vortex finder” ( $r > R_x$ ), donde el flujo va en sentido descendente y la otra en la que la velocidad axial alcanza sus valores máximos para la zona interior del “vortex finder” ( $r < R_x$ ), donde el flujo va en sentido ascendente. La velocidad axial toma el valor de cero en la región de paso de la zona externa a la interna. Todo esto puede observarse en la figura 8. En la entrada del “vortex finder” la velocidad axial puede ser calculada a partir la relación entre el caudal de flujo que atraviesa al propio “vortex finder” y del área de la sección del mismo.

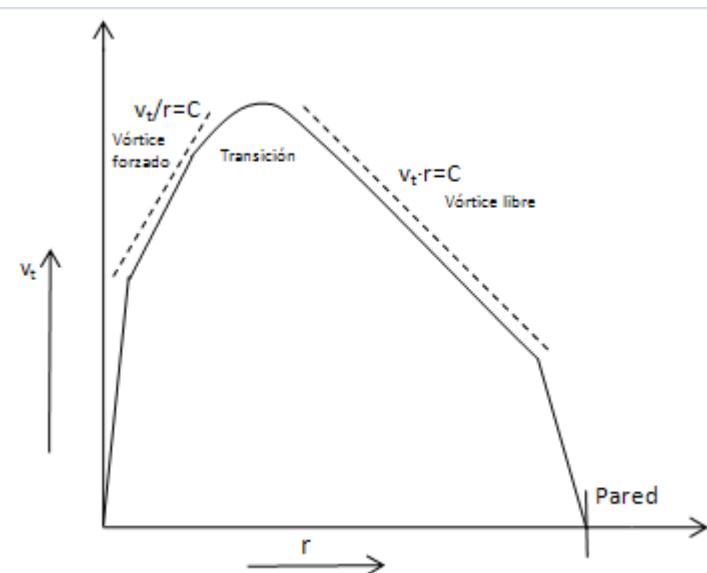


Figura 7. Perfil de la velocidad tangencial en un ciclón tangencial. Figura adaptada de [6]

La velocidad radial,  $v_r$ , es de mucha menor magnitud que las otras dos componentes. Como se puede apreciar en la figura 8 la velocidad axial ronda el valor de cero en la zona exterior del cilindro ideal de Stairmand ( $r > 0,8 \cdot R_x$ ) y crece en su zona interior ( $r < 0,8 \cdot R_x$ ), alcanzando su valor máximo cerca del eje del ciclón ( $r=0$ ) donde el flujo va en sentido ascendente.

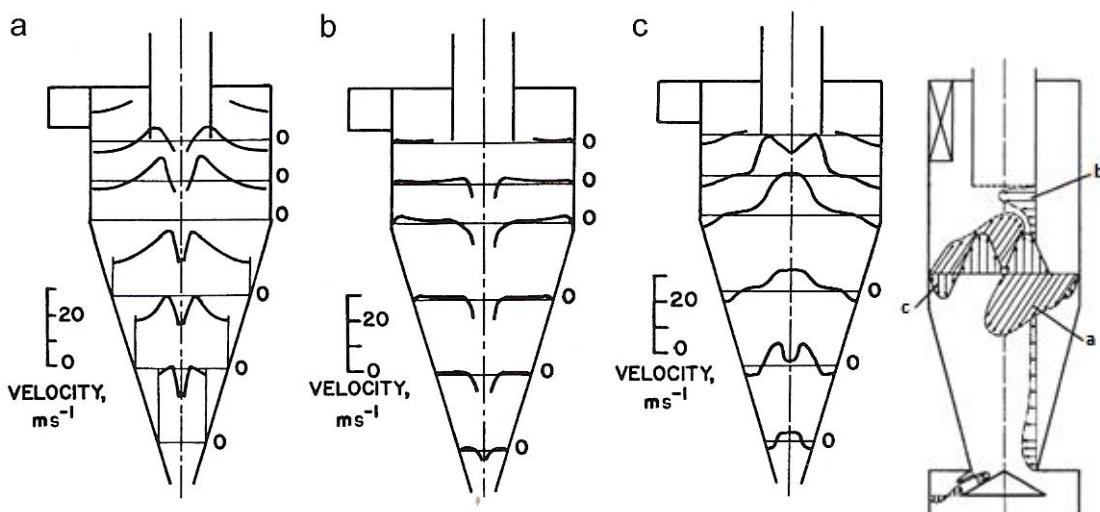


Figura 8. Perfil de las componentes de la velocidad en un ciclón: (a) tangencial, (b) radial. (c) axial [6].

La distribución del flujo y de la presión a lo largo de un ciclón, se puede comprender con la presión estática y dinámica:  $p$  y  $\frac{1}{2}\rho v^2$ , respectivamente, donde  $\rho$  es la densidad del fluido. La ecuación de Bernoulli para un flujo estable sin fricción afirma que [3]:

$$\frac{p}{\rho} + gx + \frac{1}{2}v^2 = \text{constante a lo largo de la linea de corriente} \quad (2)$$

El término de la izquierda de esta ecuación es conocido como “Trinomio de Bernoulli”. En el caso de los ciclones el primer y tercer término de dicho trinomio son los importantes, ya que las diferencias de alturas no son muy grandes.

Esta ecuación demuestra que la presión estática y dinámica se pueden intercambiar en el campo de fluido. En las áreas donde la velocidad es alta, la presión estática será baja y viceversa. Por consiguiente, examinando de nuevo la figura anterior se puede afirmar que la presión estática en la zona interna del cilindro de Stairmand es baja y fuera de él, es alta. En cuanto a la presión dinámica, es proporcional al cuadrado de la velocidad, por lo que su distribución será similar a la de la velocidad, cuando ésta es alta la presión también y viceversa.

## 2.6 Eficiencia de un ciclón

La eficiencia o rendimiento de separación global se define como el porcentaje de la masa de partículas que entra al ciclón con la corriente gaseosa y que es separada de la misma en el interior del ciclón. Aunque el rendimiento depende del tamaño y de la densidad de las partículas sólidas, no es suficiente para caracterizar adecuadamente un ciclón. Dicho esto, la siguiente ecuación determina el rendimiento de separación global, donde  $M_c$  es la masa de partículas capturadas y  $M_a$  es la masa de partículas que entran en el ciclón:

$$\eta = \frac{M_c}{M_a} \quad (3)$$

Existen básicamente dos conceptos en los que se basan los modelos de eficiencia de un ciclón: el concepto “órbita de equilibrio” (equilibrium-orbit) y el concepto “tiempo de vuelo” (time-of-flight) [3]. Ambos dependen del tamaño ( $d$ ) y la densidad de partículas ( $\rho_p$ ), incrementándose su dependencia a medida que aumenta el tamaño de dichas partículas. Por consiguiente, estos modelos son apropiados para determinar la eficiencia de un ciclón. El primero se basa en un balance de fuerzas sobre la partícula que está rotando en un volumen de control (cilindro ideal de Stairmand, VC). El segundo concepto se fundamenta en la idea de si una partícula, inyectada en alguna posición lateral en la entrada, tiene el tiempo suficiente para alcanzar la pared de ciclón y ser recogida antes de llegar a la parte inferior del ciclón. A raíz de estos dos conceptos han aparecido algunos modelos híbridos entre ambos, considerando tanto un intercambio de partículas a través del volumen de control como a través de la migración de partícula a la pared de ciclón.

En conclusión, se puede comentar que los modelos obtenidos a raíz del concepto de “tiempo de vuelo” son completamente diferentes a los que se obtienen con el concepto “órbita en equilibrio”, pero dan valores de eficiencia correctos y similares, en una amplia gama de diseños de ciclón y condiciones de funcionamiento. En cuanto a la forma de la función de la eficiencia del ciclón, que es determinada con estos modelos, idealmente es un escalón de valor igual a 1 a partir del punto crítico o de corte ( $d_{50}$  valor de tamaño de la partícula para el cual el rendimiento del ciclón es del 50%). Sin embargo, tiene perfil de curva “S”, este cambio se debe principalmente a las siguientes causas:

- Debido a la turbulencia creada por la corriente gaseosa algunas de las partículas que deberían ser atrapadas en el ciclón no lo son y viceversa.
- Existen partículas pequeñas que no deberían de ser separadas pero al adherirse a otras de mayor tamaño, son capturadas con ellas.

## Eficiencia de un ciclón

- Las partículas a causa de su agitado movimiento se dan continuos choques con las paredes del ciclón y entre ellas mismas, produciéndose un desgaste y reducción de tamaño. Por lo que, algunas de estas partículas que tendrían que ser capturadas no lo son y dan lugar a una mayor concentración de partículas de menor tamaño.
- La posición de la partícula a la entrada puede a su captura.

## 2.7 Caída de presión en un ciclón

Existe un compromiso importante entre la caída de presión y la eficiencia de captura en un ciclón tangencial. En general, cuanto mayor es la eficiencia mayores son las pérdidas de presión y en consecuencia su consumo energético también. Esto es debido en gran parte a que si la velocidad de la corriente gaseosa en la entrada del ciclón se incrementa, tanto la eficiencia como la pérdida de carga son mayores. En el caso de la caída de presión, este aumento es proporcional a dicha velocidad al cuadrado.

El proceso estándar que se lleva a cabo en la industria para evaluar la pérdida de carga en un ciclón es medir la presión estática en la pared de su tubería de aguas arriba y de aguas abajo. Este proceso es complicado realizarlo en el interior del ciclón debido al movimiento helicoidal que existe en el flujo. La caída de presión en un ciclón se divide normalmente en tres contribuciones o zonas. Por lo que se considerara que la caída total de presión es la suma de tales contribuciones:

1. Las pérdidas en la entrada del ciclón.
2. Las pérdidas en el cuerpo del ciclón.
3. Las pérdidas en el “vortex finder”.

Las pérdidas en la entrada se originan por la expansión o compresión de la corriente gaseosa, la disminución de la presión estática y por la fricción en la entrada del ciclón. Dichas pérdidas, son frecuentemente despreciables en comparación con las otras dos contribuciones. La menor de estas pérdidas se da en los ciclones con entrada tangencial. En cuanto a las pérdidas en el cuerpo del ciclón, que son mayores que las anteriores, se producen por la fricción con las propias paredes y su gran trascendencia radica en que limitan la intensidad en el vortex. Las pérdidas en el “vortex finder” son las más importantes. En conclusión todas estas pérdidas dan lugar en la corriente gaseosa a una disminución de su presión dinámica y estática entre la entrada y la salida.

La caída de presión que sufre el flujo dentro de un ciclón,  $\Delta p$ , es proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo, ya que en un ciclón el flujo es turbulento. Esta caída de presión es caracterizada a partir del número de Euler[3]:

$$\zeta_c = \frac{\Delta P_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ze}^2} \quad (4)$$

Donde  $v_{ze}$  es la velocidad axial de la corriente de gas en la entrada del ciclón.

En el análisis de la caída de presión en un ciclón tangencial influyen una serie de parámetros como el número de Froude, Reynolds (opera bajo condiciones de flujo turbulento), la relación entre la densidad de partículas y la del gas, etc... Pero los

## Caída de presión en un ciclón

factores más influyentes son la geometría del ciclón y la carga de partículas. Esto explica la estructura que tienen la mayoría de los modelos de caída de presión en un ciclón. En algunos de ellos, los dos efectos son introducidos independientemente, y el producto de ambos será el número de Euler del ciclón,  $\zeta_c$ , [6]:

$$\zeta_c = \zeta_g \cdot \zeta_s \quad (5)$$

Donde  $\zeta_g$  representa el número de Euler que habría en ausencia de partículas (vacío),  $\zeta_g$  es una función de la geometría del ciclón. En cuanto a  $\zeta_s \leq 1$  estima la reducción de la caída de presión cuando el ciclón opera con una alta carga de partículas. En conclusión a todo lo explicado, se puede deducir que la caída de presión en un ciclón es función de su geometría, de la velocidad del flujo a la entrada así como de la densidad y caudal de partículas que circulan por él.

## 2.8 Modelos para el coeficiente, $\zeta_g$ , de caída de presión en vacío

Como se ha mencionado anteriormente se sabe que el número de Euler para la caída de presión en vacío en un ciclón tangencial es función de las dimensiones del ciclón, aunque en algunos modelos este número también depende las propiedades del gas y sus condiciones de operación. Actualmente existen varios modelos que han sido desarrollados para estimar la caída de presión en vacío, entre ellos destacan el de: Shepherd y Lapple (1939), Alexander (1949), Stairmand (1949, 1952), Barth (1956), Muschelknautz (1972), Casal Y Martines (1983), etc...

Sin embargo, existen discrepancias entre ellos sobre la contribución más relevante en la caída de presión. Para algunos autores, como Shepherd y Lapple (1939), Alexander (1949), Stairmand (1949, 1952), Casal Y Martines (1983), la más importante es la correspondiente a la zona de entrada y al cuerpo del ciclón. Mientras que otros modelos como Barth (1956) y Muschelknautz (1972), tratan las pérdidas en la zona del “vortex finder” como las más importantes.

Algunos de estos modelos son empíricos y otros teóricos pero ninguno de ellos predice la caída de presión con precisión para un amplio rango de diseños de ciclones. Además, se debe mencionar que algunos modelos de cálculo como el de Stairmand, Barth y Muschelknautz son complejos. Se necesita conocer condiciones de funcionamiento (cinemática) que no son fáciles de obtener como son las del “vortex finder”. Por esto, a causa de su dificultad y a que con otros modelos más sencillos se pueden obtener ya estimaciones buenas de la caída de presión, no se han utilizado para el estudio del ciclón tangencial tratado en este proyecto.

2.8.1 Modelo de Shepherd y Lapple (1939)

El Modelo de Shepherd y Lapple, que es puramente empírico, determina una simple expresión del número de Euler,  $\zeta_g$ , en función de la geometría del ciclón, puesto que supone un número de Reynolds lo suficiente alto como para despreciar su influencia. Las dimensiones que utiliza dicho modelo son el diámetro del cuerpo del “vortex finder” y de la entrada del ciclón, en el caso de un ciclón con una entrada tangencial la anchura y la altura. Este modelo es ampliamente utilizado debido a su buena relación de cálculo y aproximación. Shepherd y Lapple dieron la siguiente expresión para el número de Euler [6]:

$$\zeta_g = \frac{16ab}{D_x^2} \quad (6)$$

Existe un modelo muy similar a este para determinar el número de Euler,  $\text{Eu}_g$ , el cual se conoce como el modelo de Coker. Dicho modelo tiene la misma estructura que el modelo de Shepherd y Lapple. Para un ciclón con una entrada tangencial depende de la misma geometría lo único que cambia es el valor de la correlación de 16 a 9,47. Por lo tanto este modelo también será puramente empírico. Para algunos diseños de ciclones con este modelo se obtienen mejores aproximaciones de la caída de presión en vacío que con el modelo de Shepherd y Lapple.

Por otro lado, la velocidad característica del ciclón que se utilizara en “ambos modelos” es el valor promedio de velocidad axial en la entrada del mismo, es decir:

$$v_{ze} = \frac{Q_{\text{ciclón ent}}}{ab} \quad (7)$$

Donde  $Q_{\text{ciclón ent}}$  es el caudal del fluido que entra en el ciclón.

## 2.8.2 Modelo de Alexander (1949)

El modelo de Alexander determina el número de Euler,  $\zeta_g$ , en función de la geometría del ciclón pero a diferencia del modelo anterior, Alexander introdujo la dependencia de la viscosidad del gas con la temperatura a partir del exponente de vórtice “ $n_1$ ”. Por otro lado en este modelo de la geometría del ciclón se utilizan el diámetro del cuerpo del ciclón y el del “vortex finder”. También se ha de mencionar que se trata de un modelo semi-empírico y que para su estudio se necesitan conocer más propiedades del gas que en el modelo de Shepherd y Lapple. Pero aun así su cálculo no resulta difícil y su aproximación es mejor. Alexander definió la siguiente expresión del número de Euler [6]:

$$\zeta_g = 4.62 \left( \frac{ab}{D_c D_x} \right) \left[ \left( \left( \frac{D_c}{D_x} \right)^{2n_1} - 1 \right) \left( \frac{1 - n_1}{n_1} \right) + f_g \left( \frac{D_c}{D_x} \right)^{2n_1} \right] \quad (8)$$

$$f_g = 0.8 \left[ \frac{1}{n_1(1 - n_1)} \left( \frac{4 - 2^{2n_1}}{3} \right) - \left( \frac{1 - n_1}{n_1} \right) \right] + 0.2 \left[ (2^{2n_1} - 1) \left( \frac{1 - n_1}{n_1} \right) + 1.5(2^{2n_1}) \right] \quad (9)$$

$$n_1 = 1 - (0.67 D_c^{0.14}) \left( \frac{T}{283} \right)^{0.8} \quad (10)$$

En cuanto a la velocidad característica del ciclón que se utiliza en este modelo es el valor medio de la velocidad axial a la entrada del ciclón,  $v_{ze}$ , al tratarse de un modelo que también considera las pérdidas en la entrada y cuerpo del ciclón como las más relevantes.

2.8.3 Modelo de Casal y Martines (1983)

---

El modelo de Casal y Martines, es puramente empírico y determina el número de Euler,  $\zeta_g$ , en función solo de la geometría del ciclón, en concreto del diámetro del “vortex finder” y de las dimensiones de la entrada que para un ciclón de una entrada tangencial son la anchura y la altura. Este modelo como se puede observar parte del modelo de Shepherd y Lapple y aparte de obtener otro valor de la correlación, como fue el de 11,3 y de elevar la parte en función de la geometría de la ecuación, añadieron otra correlación independiente de valor 3,33. De esta manera, la expresión del número de Euler que se obtuvo fue la siguiente [6]:

$$\zeta_g = 3.33 + 11.3 \left( \frac{ab}{D_x^2} \right)^2 \quad (11)$$

Con estas tres modificaciones Casal y Martines mejoraron la estimación presión del cálculo de la caída de presión en vacío en un rango de diseños de ciclones, en comparación con el método de Shepherd y Lapple. En cuanto a la velocidad característica del ciclón que se utiliza en este modelo es el valor medio de la velocidad axial a la entrada del ciclón,  $v_{ze}$ , porque como ocurre con los modelos explicados trata las pérdidas en la entrada y cuerpo del ciclón como las más relevantes.

## 2.9 Modelos para el coeficiente, $\zeta_s$ , de caída de presión en carga

Existe constancia de que en un ciclón la caída de presión se ve influenciada cuando está operando con una concentración de sólidos alta, de tal forma que al aumentar la carga, la caída de presión disminuye. Este efecto se atribuye principalmente a la propia inercia de las partículas. Por este motivo se introduce un coeficiente de corrección,  $\zeta_s$ , al número de Euler del ciclón,  $\zeta_c$ .

Esta reducción de la caída de presión cuando existe una alta concentración de partículas ha sido estudiada por varios investigadores en el tema como: Briggs (1946), Smolik (1975), Baskakov (1990),.... Dichos autores obtuvieron diferentes modelos de cálculo de  $\zeta_s$ , y como ocurre cuando se trabaja en ausencia de carga (vacío) existen discrepancias entre ellos. En esta ocasión dichas discrepancias radican especialmente en la cuantificación de su efecto.

Por otra parte, al igual que ocurre con los modelos en vacío ninguno de estos modelos predice la caída de presión en carga con una gran precisión para un amplio rango de diseños de ciclones.

### 2.9.1 Modelo de Briggs (1946)

El modelo de Briggs determina una expresión del número de Euler,  $\zeta_p$ , en función de la concentración de partículas y la densidad del gas. A pesar de ser la correlación más antigua de todas, con ella se obtienen unos resultados muy correctos. Esto se debe a que es un modelo mucho más conservador que el resto. Por todo esto, esta correlación es ampliamente utilizada por su buena relación de cálculo y aproximación. Briggs obtuvo la siguiente expresión para el coeficiente de corrección,  $\zeta_s$ [6]:

$$\zeta_s = \frac{1}{1 + 0.0086 \cdot \sqrt{C_{si} \cdot \rho}} \quad (12)$$

Donde  $C_{si}$  es la concentración de partículas en  $\text{g}_{\text{sol}}/\text{kg}_{\text{gas}}$ .

2.9.2 Modelo de Smolik (1975)

---

El modelo de Smolik define el número de Euler,  $\zeta_p$ , en función de la concentración de sólidos y de la densidad del gas. A diferencia del modelo anterior, éste no es muy conservador y por ello su estimación es peor que la del resto de modelos. Como ventaja se puede decir que su cálculo es el más sencillo de todos por este motivo para tener una idea de la tendencia de la caída de presión de forma rápida y fácil puede resultar beneficioso (acertado). Smolik obtuvo la siguiente ecuación del factor de corrección,  $\zeta_s$  [6]:

$$\zeta_s = 1 - 0.02(C_{si}\rho)^{0.6} \quad (13)$$

Donde  $C_{si}$  es la concentración de partículas en  $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{Kg}_{\text{gas}}$ .

2.9.3 Modelo de Baskakov (1990)

---

En 1990 Baskakov obtuvo una expresión del número de Euler,  $\zeta_p$ , a diferencia del resto solo en función de la concentración de sólidos. Este modelo es el más reciente de todos y uno de los más complejos. Pero a pesar de esto, no asegura que su estimación sea la más adecuada siempre, ya que en algunos diseños de ciclones se sigue obteniendo mejor aproximación con el método de Briggs, como es el caso del ciclón estudiado en este proyecto. Baskakov determinó la siguiente expresión del factor de corrección,  $\zeta_s$  [6]:

$$\zeta_s = \frac{1}{1 + 3.1C_{si}^{0.7}} + 0.67C_{si} \quad (14)$$

Donde  $C_{si}$  es la concentración de partículas en  $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{kg}_{\text{gas}}$ .

## 2.10 Modelo de Enrico Grieco y Luca Marmo

El modelo de Enrico Grieco y Luca Marmo es empírico y describe el comportamiento de la caída de presión de un ciclón tangencial en condiciones de trabajo con una alta carga de sólidos. Dicho modelo estima la caída de presión en función de la concentración de partículas, la densidad del gas y la velocidad del gas a la entrada del ciclón. A diferencia del resto de modelos explicados, en éste no se necesita calcular el número de Euler ya que la caída de presión se estima de una forma “directa” como se puede observar en la siguiente expresión [7]:

$$\Delta P_c = 0.618 \rho v_{ze}^2 + (24.54 v_{ze}^{0.68}) \dot{m}_e^{0.61} \quad (15)$$

Donde  $\dot{m}_e$  es la relación de carga correspondiente a  $\dot{m}_s/\dot{m}_g$ . Estos autores elaboraron un modelo con un cálculo muy sencillo ya que las diferentes variables que se necesita conocer son fáciles de obtener.

En la siguiente tabla puede verse un resumen de los modelos teóricos empleados en el estudio de los ciclones de esta instalación:

Modelo teórico	Condiciones de Operación	Correlación	Observaciones
Shepherd y Lapple	Vacio	$\frac{16ab}{D_x^2}$ (6)	Depende solo de la geometría. Solo valido para ciclones con entrada tangencial. Aire en condiciones del ambiente.
Coker	Vacio	$\frac{9,47ab}{D_x^2}$ (6b)	Modelo basado en el de Shepherd y Lapple.
Alexander	Vacio	$4.62 \left( \frac{ab}{D_c D_x} \right) \left[ \left( \frac{D_c}{D_x} \right)^{2n_1} - 1 \right] \left( \frac{1 - n_1}{n_1} \right) + f_g \left( \frac{D_c}{D_x} \right)^{2n_1} \quad (8)$	Depende de la geometría del ciclón y de la temperatura del aire a través de los parámetros $n_1$ y $f_g$ . Modelo valido para ciclones con entrada tangencial y voluta.
Casal y Martines	Vacio	$3.33 + 11.3 \left( \frac{ab}{D_x^2} \right)^2$ (11)	Depende solo de la geometría. Valido para ciclones con entrada tangencial.

## Modelo de Enrico Grieco y Luca Marmo

<b>Briggs</b>	En carga	$\frac{1}{1 + 0.0086 \cdot \sqrt{C_{si} \cdot \rho}} \quad (12)$	Depende de la densidad del gas. $C_{si}$ en $\text{g}_{\text{sol}}/\text{kg}_{\text{gas}}$ . Aire en condiciones del ambiente.
<b>Smolik</b>	En carga	$1 - 0.02(C_{si}\rho)^{0.6} \quad (13)$	Depende de la densidad del gas. $C_{si}$ en $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{kg}_{\text{gas}}$ .
<b>Baskakov</b>	En carga	$\frac{1}{1 + 3.1C_{si}^{0.7}} + 0.67C_{si} \quad (14)$	$C_{si}$ en $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{kg}_{\text{gas}}$ .
<b>Enrico Grieco y Luca Marmo</b>	Vacio y Carga	$0.618\rho v_{ze}^2 + (24.54v_{ze}^{0.68})\dot{m}_e^{0.61} \quad (15)$	Valido para ciclones con entrada tangencial. $\dot{m}_e$ en $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{kg}_{\text{gas}}$ . El valor de la caída de presión se estima de forma “directa”.

Tabla 1. Modelos teóricos de la caída de presión de los ciclones.

### 3 ANÁLISIS EXPERIMENTAL

#### 3.1 Descripción teórica de la instalación

Se tiene una instalación de captura de dióxido de carbono basada en un ciclo de carbonatación-calcinación con dos lechos fluidos circulantes. La instalación es de flujo frío porque en ella solo se desea estudiar la fluidodinámica. Por consiguiente, no es necesario que existan reacciones. Así que, como no se opera a altas temperaturas, la instalación está construida principalmente con metacrilato. De esta manera, se puede observar la circulación del flujo y, a su vez el sistema es más sencillo. Por otro lado, en los diferentes ensayos que se realizaron en esta instalación de flujo frío, se empleó una corriente de aire y caliza ( $\text{CaCO}_3$ ).

Los ensayos para analizar el objetivo de este proyecto se realizaron con un solo circuito en concreto el de carbonatación. Por lo que, solo se emplearon los equipos que componen este circuito como principalmente son: un ciclón, un lecho fluido circulante y una válvula no mecánica (loopseal). El motivo de esta configuración de la instalación para el desarrollo de los ensayos se explicara más adelante.

##### 3.1.1 Equipos principales e instrumentación de la instalación

Esta instalación está compuesta por un conjunto de equipos y una serie de instrumentos de medida que se explicarán a continuación:

- **VENTILADOR**: Dispositivo mecánico encargado de suministrar un caudal de gases a la instalación, a bajas presiones. Esta turbomáquina está constituida principalmente por un rodeté con álabes, un motor eléctrico y una carcasa. El rodeté con aspas tiene la función de girar produciendo una diferencia de presiones haciendo que circule una corriente de aire. En cuanto al motor eléctrico, tiene la función de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para así girar el rodeté. El ventilador de la instalación, que se muestra en las figuras 9 y 10, tiene las siguientes características técnicas: consumo=9,2 kW; caudal=0,1  $\text{m}^3/\text{s}$  y presión máxima=0,136 bar.

## Descripción teórica de la instalación



Figura 9. Vista delantera del ventilador.



Figura 10. Vista trasera del ventilador más motor eléctrico.

- **CONJUNTO DE VÁLVULAS:** Sistema encargado de la regulación y control del caudal de aire que circula por la instalación. Dicho conjunto nos permite controlar de forma manual la instalación y con ello poder estudiar su fluidodinámica. Por lo que se consideran la parte más importante de la instalación. En la figura 11 se muestra la válvula de mariposa del ventilador y el conjunto de válvulas del circuito de carbonatación, que está formado por válvulas de compuerta y de mariposa.



Figura 11. Conjunto de válvulas del circuito de carbonatación.

- LECHO FLUIDO CIRCULANTE: La instalación consta de dos lechos, uno para la parte del ciclo de la carbonatación (véase figura 12) y otro para la de la calcinación. En una instalación de este tipo siendo de flujo no frio, ambos lechos harían de reactores ya que sería donde se producirían las reacciones del dióxido de carbono. En el caso de la instalación analizada es de flujo frio, como se ha explicado anteriormente, no se producen en ella reacciones.

Los lechos circulantes de esta instalación sustentan “un sorbente sólido” (caliza tanto en el lecho del carbonatador como en el del calcinador) mientras se les introduce una corriente de aire hacia arriba. El resultado es la formación de rápidos movimientos que favorecen, la mezcla del aire con la caliza.



Figura 12. Lecho fluido circulante del circuito de carbonatación.

Como se mencionó al principio de este apartado solo se empleó el lecho del circuito de carbonatación. Por consiguiente, solo se conocen las características de operación principales de dicho lecho que son: una velocidad del fluido entre 0,5 y 2,5 m/s y un inventario de partículas en el lecho ( $I_v$ ) entre 5 y 20 kg<sub>sol</sub>. En cuanto a las dimensiones geométricas son de altura 4 metros en ambos y 170 y 160 mm de diámetro de la base, para el carbonatador y calcinador, respectivamente.

## Descripción teórica de la instalación

- CICLÓN TANGENCIAL: Esta instalación consta de dos ciclones tangenciales de iguales características geométricas, uno en el circuito de carbonatación (véase figura 13) y otro en el de calcinación. En cuanto a su geometría, se conoce en la siguiente tabla:

DATOS GEOMETRICOS	
$H(\text{mm})$	837
$H_c(\text{mm})$	439
$A_{c\text{ entrada}}(\text{m}^2)$	0,003
$a (\text{mm})$	43
$b (\text{mm})$	71
$D_x(\text{mm})$	93
$D_c(\text{mm})$	180
$S (\text{mm})$	112
$D_d(\text{mm})$	70

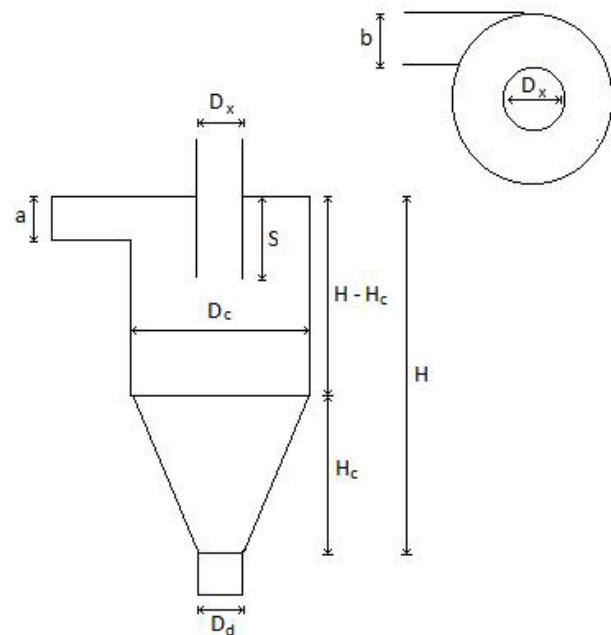


Tabla 2. Datos geométricos de los ciclones de la instalación.

Por tener un concepto básico del funcionamiento, al operar en los ensayos solo con el circuito de carbonatación, se analizó solo el ciclón de este circuito con una corriente de aire y caliza. Por lo tanto, la función que desempeña dicho ciclón es la de separar la caliza de la corriente de aire.



Figura 13. Ciclón tangencial.

- FILTROS DE MANGA: Los filtros de manga son equipos que tienen como función separar las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa mediante un medio poroso. En esta instalación de captura de CO<sub>2</sub> se ha decidido colocar uno en la salida de cada ciclón, con el fin de, recoger partículas de caliza que no se han podido atrapar con su respectivo ciclón. Los filtros de mangas seleccionados para esta instalación, que pueden observarse en la figura 14, están formados por una bolsa de fibra sintética con forma de manga. Dicha bolsa es colocada (sin carcasa) en unos soportes.



Figura 14. Filtros de manga.

## Descripción teórica de la instalación

- VÁLVULA NO MECÁNICA O LOOPSEAL: Dispositivo de la instalación, que está construido de metacrilato, funciona como sello de presiones entre el ciclón (baja presión) y su correspondiente lecho fluido circulante (a más presión). Además de recircular las partículas sólidas entre ambos equipos. Esta instalación tiene dos loopseals, uno para cada circuito. En la figura 15 puede observarse la loopseal del circuito de carbonatación.

Estos equipos constan de dos entradas: una de partículas que es la salida del ciclón y otra de aire proveniente del ventilador, y una salida de partículas dirigida al lecho fluido circulante. Dicho esto, una característica importante de estos equipos es que según se distribuyan sus entradas y su salida cambian la configuración de la instalación dependiendo del estudio y ensayo que se vaya a realizar en ella (véase figura 16). En cuanto a su funcionamiento en esta instalación, básicamente consiste en favorecer la circulación de la caliza entre el ciclón y el lecho fluido circulante que están conectados.

En los ensayos realizados en esta instalación, como se ha mencionado anteriormente, solo se trabajó con uno de los circuitos en concreto con el del carbonatador. Por consiguiente, la salida de la loopseal está dirigida al lecho fluido circulante del mismo circuito, véase figura 17.



Figura 15. Loopseal del circuito de carbonatación.



Figura 16. Conexiones de las loopseals de los circuito de carbonatación y calcinación.



Figura 17. Conexiones de la loopseal del circuito de carbonatación.

## Descripción teórica de la instalación

- **CALENTADOR ELÉCTRICO**: Este dispositivo de la instalación, el cual se puede observar en las figuras 18 y 19, es un sencillo equipo eléctrico que transforma la energía eléctrica en energía calorífica. Dicho dispositivo, si se emplea tiene la función en la instalación de calentar el aire de fluidificación del modelo del calcinador. Es decir, el calentador eléctrico es únicamente un requerimiento del escalado de la instalación para mantener los números adimensionales y los ratios de densidad entre la corriente de aire y las partículas de caliza.



Figura 18. Calentador eléctrico (vista frontal).



Figura 19. Calentador eléctrico (vista perfil).

- **EQUIPOS DE MEDIDA (INSTRUMENTACIÓN)**: Para el estudio de esta instalación se han empleado una serie de equipos de medida de presión, temperatura y velocidad de la corriente de aire. Estos equipos se colocan en posiciones estratégicas de la propia instalación, como por ejemplo en los lechos fluidos circulantes, loopseals así como en los ciclones. De esta manera, se pueden obtener medidas, que son enviadas a un sistema de adquisición de datos, que permiten conocer en todo momento cómo está operando la instalación.

Para medir la presión se utilizan transductores de presión diferencial. En la instalación existen transductores de diferentes rangos de lectura/medida: de 0 a 10 mbar, de 0 a 50 mbar y de 0 a 100 mbar.

Para medir la temperatura y la velocidad de la corriente gaseosa se usa un termo-anemómetro de sonda de hilo caliente. El rango de medida de velocidad del termo-anemómetro utilizado es de 0 a 20 m/s.

En la figura 20 se puede observar la válvula de mariposa del circuito de carbonatación, que se utiliza en los ensayos realizados con carga para medir la circulación de partículas con la que se está trabajando.



Figura 20. Válvula de mariposa (Tipo: cuarto de giro).

3.1.2 Funcionamiento de la instalación

En este apartado es importante detallar que se va a exponer el funcionamiento de esta instalación en flujo frío (figura 21), no del funcionamiento real, es decir, con reacciones químicas que tendría una instalación de este tipo (ciclo de carbonatación-calcinación). Por este motivo, en esta instalación de flujo frío se decidió operar con una corriente de aire y caliza como sorbente, ya que es barata, disponible y abundante.



Figura 21. Instalación de experimentación.

El funcionamiento de la instalación, donde se han llevado a cabo los distintos ensayos, se puede explicar apoyándose en el proceso que rige un ciclo de carbonatación-calcinación. En primer lugar, en el lecho fluido circulante de carbonatación se mezcla una corriente de aire, proveniente del ventilador, con carbonato cálcico (caliza). Esta corriente de aire con partículas de caliza se conduce por una tubería al ciclón del circuito de carbonatación. En este ciclón se captura la caliza contenida en la corriente de aire, y dicha corriente sale del ciclón limpia de caliza. Antes de abandonar la instalación la corriente atraviesa un filtro de mangas

para capturar partículas de caliza que el ciclón no haya sido capaz de separar. La caliza, que es atrapada por el ciclón, se deposita en la loopseal circuito de carbonatación. Este dispositivo hace circular la caliza al lecho fluido circulante del circuito de calcinación. Por otro lado, se puede pasar una corriente de aire proveniente del ventilador por la resistencia eléctrica de la instalación donde se calienta antes de introducirse en el lecho fluido circulante. Este calentador eléctrico se emplea únicamente para conservar los números adimensionales y los ratios de densidad entre la corriente de aire y las partículas de caliza.

A continuación en el lecho fluido circulante de calcinación se mezcla la corriente de aire calentada con la caliza para luego dirigirse al ciclón del circuito de calcinación. En donde la caliza se separa de la corriente de aire. Finalmente, la caliza se conduce a la loopseal del circuito de calcinación para reenviarla al circuito de carbonatación y así reciclarla para volverla a usar, en cuanto al aire, se expulsa del ciclón limpio de caliza. Pero como ocurre en el circuito de carbonatación, antes de salir de la instalación la corriente atraviesa un filtro de mangas, en donde, se capturan las partículas de caliza que el ciclón no ha sido capaz de atrapar.

3.1.3 Aplicaciones y ventajas/desventaja de la instalación

---

Este sistema de captura de CO<sub>2</sub> con un ciclo de carbonatación-calcinación se aplicará principalmente en plantas de generación eléctrica tanto de carbón como de gas, tales como, centrales térmicas convencionales y ciclos combinados, respectivamente. Y además en procesos industriales donde existan hornos, calderas, etc... La problemática que tiene este sistema es que aun está en fase de investigación y demostración. Pero si llega a ser válido se daría un gran cambio beneficioso en el mundo de la captura de CO<sub>2</sub> porque tiene muy buenas ventajas en comparación con el resto de procesos basados principalmente en pre-combustión y en oxicombustión.

Por otro lado, esta instalación de flujo frio en concreto presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- El sorbente elegido, la caliza es barata, disponible y abundante.
- Coste de inversión de la instalación no es alto.
- La instalación no presenta ningún riesgo a la hora de operar con ella, ya que, es un proceso que no es nada peligroso.
- El mantenimiento de esta instalación es muy simple, aunque ello no quita que no sea importante.
- Permite realizar distintas configuraciones de circuitos dentro de la propia instalación para llevar acabo diferentes ensayos y estudios en ella.

Desventajas:

- Existe un consumo energético en la resistencia eléctrica (calcinador).
- Se produce una degradación del sorbente, es muy importante calcularla para conocer la cantidad de sorbente con la que se está operando.

### 3.2 Planteamientos de los ensayos

La problemática que presenta esta instalación de captura de dióxido de carbono es poder medir de manera continua el caudal de partículas que circula por el ciclón. Actualmente, esta medida no es continua ya que no se puede conocer en cualquier instante. Además, es intrusiva debido a que su medida afecta al funcionamiento de la instalación. Resolver esto es necesario para conocer y analizar la fluidodinámica del sistema. Partiendo de que se puede medir de manera continua y no intrusiva tanto la caída de presión como la velocidad de la corriente a la entrada del ciclón, y como se ha explicado anteriormente, se sabe que la caída de presión es función de la geometría del ciclón, la densidad del gas, la velocidad de la corriente a la entrada y el caudal de partículas respectivamente:

$$\Delta P_c = F(a, b, D_c, \rho, v_{ze}, C_{si}) \quad (16)$$

En consecuencia, si se conoce cómo se relacionan, se podrá calcular de manera continua y no intrusiva el caudal de partículas que circula por el ciclón. El objetivo principal de este proyecto es obtener una correlación de la caída de presión en los ciclones en función de la carga de partículas con la que trabaja y la velocidad del flujo a la entrada y la densidad de la corriente. Para obtener dicha correlación, se necesita realizar un estudio experimental (en la instalación) y teórico (con los modelos) de los ciclones tangenciales de la instalación. Es importante comentar también que como ambos ciclones operarán bajo las mismas condiciones de trabajo y tienen la misma geometría, esta correlación de la caída de presión será válida para los dos ciclones. De ahí, que una configuración adecuada de la instalación para realizar los ensayos haya sido sólo el circuito de carbonatación, es decir, el lecho fluido circulante se conectó a la loopseal del mismo circuito, tal y como muestran las figuras 22 y 23 (siguiente página).

En cuanto a la función, que ha desarrollado el ciclón de dicho circuito ha sido la de separar la caliza de la corriente de aire y circularla hacia la loopseal, mientras que la corriente de aire sale de la instalación casi limpia de partículas, por ello antes de abandonar la instalación esta corriente atraviesa un filtro de mangas, en donde se atrapa partículas pequeñas que el ciclón no ha podido capturar. Principalmente, esto es necesario por seguridad, para que los operarios de dicha instalación no respiren partículas de caliza, además, para que la nave donde está la instalación no se ensucie con la caliza.

## Planteamientos de los ensayos



Figura 22. Conexión de la loop seal con el lecho fluido circulante del circuito de carbonatación.



Figura 23. Configuración del circuito de carbonatación de la instalación.

Con esta configuración de la instalación se ejecutaron un conjunto de ensayos para conocer la caída (pérdida) de presión experimental en el ciclón del circuito de carbonatación. Estos experimentos se efectuaron bajo diferentes condiciones de trabajo en vacío y en carga. Esto se debe a que la correlación de la caída de presión en un ciclón, básicamente, está compuesta por un término independiente de la carga de partículas y otro dependiente. Por consiguiente, para conocer el término independiente, que es función de la geometría, es necesario realizar ensayos operando en vacío. Y para conocer el término dependiente es necesario hacer los ensayos trabajando en carga.

En el caso de los ensayos en vacío, es decir, en ausencia de partículas (carga nula), sólo se varió la velocidad de la corriente de aire a la entrada del ciclón. Su objetivo fue conocer la caída de presión en el ciclón cuando opera en vacío, mientras que, en el caso de los ensayos en carga, en el cual se utilizó caliza, se varió tanto la velocidad como la carga de partículas. Su objetivo fue conocer la caída de presión en el ciclón que tenía lugar cuando opera con carga de partículas. Estos ensayos fueron más complejos que los realizados en el caso de vacío debido a que se tuvo que ir variando la cantidad de partículas (inventario,  $I_0$ ) con la que se deseaba trabajar. Para ello antes de efectuar el ensayo, era necesario pesar el inventario de partículas con el

que se quería operar e introducirlo en el lecho fluido circulante y la loop seal del circuito de carbonatación. Además en estos ensayos a diferencia de los de vacío fue necesario esperar a que el funcionamiento de esta configuración de la instalación fuera estacionario para tomar medidas correctas de la caída de presión en el ciclón y la velocidad en el lecho fluido circulante del circuito de carbonatación cuando se trabaja en carga. A continuación en la tabla 2 se muestran los rangos de funcionamiento en los que operó dicho ciclón en los diferentes ensayos:

Condiciones de Operación	Velocidad entrada (m/s)	Carga (kg <sub>sol</sub> /kg <sub>gas</sub> )
Vacio	0 a 18,5	0
En carga	0 a 17,5	0,01 a 1,7

Tabla 3. Condiciones de operación del ciclón de carbonatación.

En cada uno de ellos se midió con dos transductores apropiados la presión de la corriente de aire a la entrada y salida del ciclón, para así conocer la pérdida de presión a una determinada velocidad y carga de partículas (nula para los ensayos en vacío). La velocidad de la corriente de aire, introducida en la instalación por el ventilador, se midió por medio de una sonda de hilo caliente colocada en la tubería que conecta el ventilador con el lecho fluido circulante del circuito de carbonatación.

Además para cada ensayo con o sin carga de partículas también se midió la temperatura para obtener a partir de ella la densidad de la corriente gaseosa. Estos dos datos son necesarios conocerlos para calcular la caída de presión tanto con modelos teóricos, que se expusieron anteriormente, como con el modelo experimental que se analizará posteriormente. Todos los diferentes parámetros y datos de operación que se variaron y midieron en cada clase de ensayos pueden apreciarse en la siguiente tabla:

Ensayos\Parámetros de operación	Velocidad lecho (m/s)	Caudal de partículas (kg <sub>sol</sub> /s)	Temperatura del flujo (°C)	Densidad del flujo	Caída de presión en el ciclón (Pa)
Vacio	0 a 2,5	0	28 a 42	1,12 a 1,17	0 a 785
Con carga	0 a 2,5	0,0002 a 0,1	30 a 44	1,11 a 1,16	0 a 460

Tabla 4. Rango de parámetros de operación de los dos tipos de ensayos.

## Planteamientos de los ensayos

Al final de cada ensayo con carga se midió la carga de caliza (caudal de partículas) con la que se trabajó. Para ello, se abrió durante un corto tiempo cronometrado (del orden de segundos) la válvula de mariposa (figura 20) que conecta la loopseal con el lecho fluido todo ello del circuito de carbonatación (figura 17). Y se capturó una cantidad de partículas de la corriente en un recipiente conveniente apropiado para esto, posteriormente, en una bascula se pesó. De esta forma, conocido el peso de la muestra capturada y el tiempo de apertura de la válvula se calculó la carga de caliza ( $\text{kg}_{\text{sol}}/\text{s}$ ) con la que trabaja el ciclón. Por lo tanto, como se mencionó anteriormente el proceso que se emplea, actualmente, en esta instalación es no continuo porque no se puede conocer en todo momento e intrusivo por que afecta al funcionamiento de la instalación dando lugar a perdidas de partículas y de presión, al abrir la válvula de mariposa. Por este motivo, dicho proceso se realizó en cada ensayo siempre después de haber tomado todos los datos requeridos (caída de presión en el ciclón, velocidad de la corriente en el lecho y temperatura), debido a que una vez llevado a cabo el funcionamiento de la instalación no es el adecuado ya que no es estacionario y existen unas pérdidas.

Con la realización de todos estos ensayos se pretende estudiar y calcular una correlación de la caída de presión en el ciclón que se aproxime lo máximo posible a los datos experimentales obtenidos. Finalmente, gracias a esta correlación para una determinada velocidad y caída de presión se podrá conocer de manera continua y no intrusiva el caudal de partículas que circula por los ciclones, es decir, el que circula también por cada lecho fluido circulante de la instalación.

### 3.3 Resultados experimentales

A continuación en este último apartado se van a mostrar los resultados experimentales obtenidos en diferentes ensayos y se va a exponer una correlación, que se estudió y analizó, para determinar la caída de presión en los ciclones de la instalación. Dicha ecuación es del mismo tipo que las de los modelos teóricos para así poder ser comparada y evaluada con ellos y los datos experimentales. De esta manera, se demostrará que esta correlación obtenida es la más idónea para los ciclones de la instalación. En cuanto a los cálculos de la correlación, se realizaron con el programa informático Microsoft Office Excel 2007.

#### 3.3.1 Comparación entre las diferentes alternativas teórico-experimentales

##### 3.3.1.1 Pruebas en vacío con variación de la velocidad

El primer paso consistió en calcular el número de Euler teórico con los modelos de vacío analizados en el tercer apartado. Como se ha explicado, dicho número en vacío depende sólo de la geometría del ciclón. Por lo tanto, es necesario conocer los datos geométricos del ciclón que se muestran anteriormente en la tabla 2. Todas estas dimensiones pueden comprenderse más claramente con ayuda del apartado 2.4 de esta memoria. Además, como en el lecho fluido circulante es donde se mide de manera continua y no intrusiva la velocidad de la corriente. Por consiguiente, es imprescindible conocer su diámetro para calcular su área y aplicar la ley de la conservación de la masa para calcular la velocidad en la entrada del ciclón, tal que así:

$$Q_{lecho} = Q_{ciclón\ ent} \quad (17)$$

$$A_{lecho} \cdot v_{zlecho} = A_{c\ entrada} \cdot v_{zi} \quad (18)$$

$$v_{zi} = \frac{A_{lecho} \cdot v_{zlecho}}{A_{c\ entrada}} \quad (19)$$

## Resultados experimentales

Conocido esto, los números de Euler en vacío que se obtuvieron según los modelos teóricos explicados en el apartado 2.7 fueron los siguientes:

Modelo teórico para la caída de presión en vacío	Número de Euler en vacío, $\zeta_g$
Shepherd and Lapple	5,633
Alexander	3,949
Coker	3,334
Casal	3,731

Tabla 5. Números de Euler en vacío calculados por diferentes modelos teóricos.

El siguiente paso fue analizar los resultados experimentales que se obtuvieron en las pruebas en vacío variando la velocidad, dichos resultados fueron los siguientes:

Prueba/ Ensayo	$v_{z\text{echo}}$ [m/s]	$v_{zi}$ [m/s]	$\Delta P_{c\text{ exp}}$ [mbar]	$\Delta P_{c\text{ exp}}$ [Pa]	$T^a$ [°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\zeta_g\text{ exp}$
V0	0,000	0,000	0,000	0,000			
V1	0,521	3,884	0,314	31,405	28,343	1,171	3,555
V2	0,967	7,207	1,264	126,394	29,182	1,168	4,167
V3	1,477	11,011	2,958	295,833	30,263	1,164	4,194
V4	2,017	15,037	5,051	505,101	32,375	1,156	3,866
V5	2,429	18,109	7,805	780,474	36,561	1,140	4,175
V6	0,452	3,368	0,195	19,457	37,862	1,135	3,022
V7	1,018	7,592	1,137	113,723	38,627	1,132	3,485
V8	1,490	11,106	2,550	255,022	39,131	1,131	3,658
V9	1,965	14,650	4,669	466,922	39,322	1,130	3,851
V10	2,442	18,200	6,444	644,423	38,876	1,132	3,439
V11	0,531	3,961	0,322	32,232	37,143	1,138	3,612
V12	1,019	7,594	2,004	200,407	37,844	1,135	6,122
V13	1,515	11,296	3,236	323,605	39,285	1,130	4,489

<b>V14</b>	1,988	14,817	5,157	515,691	40,549	1,125	4,174
<b>V15</b>	2,408	17,948	7,664	766,425	41,956	1,120	4,247

Tabla 6. Resultados experimentales de los ensayos en vacío realizados en el ciclón de la instalación.

De estos resultados experimentales obtenidos para cada ensayo se calculó el número de Euler teórico del ciclón de la instalación con la siguiente ecuación, la cual se definió en el apartado 2.7:

$$\zeta_g = \frac{\Delta P_c \text{ exp}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{zi}^2} \quad (20)$$

La media de estos valores fue el número de Euler en vacío que se analizó y evaluó como ajuste para el ciclón de esta instalación cuando opera en vacío, cuyo valor es 4,004. Comentar que para lograr una mejor estimación del cálculo de la caída de presión con los modelos teóricos y con el ajuste, que se está examinando, se han utilizado las condiciones de trabajo ( $v_{zi}$ ) y las propiedades de la corriente aire ( $\rho$  y  $T$ ) de cada prueba o ensayo. Esta caída de presión se ha obtenido a partir de la ecuación anterior:

$$\Delta P_c = 1/2 \cdot \rho \cdot \zeta_g \cdot v_{zi}^2 \quad (21)$$

Posteriormente, una vez realizados los cálculos necesarios, los valores de la caída de presión obtenidos con este nuevo ajuste se comparan tanto con los resultados experimentales como con los valores de los modelos teóricos evaluados. De esta manera, en la tabla 7 se presentan los valores de la función  $R^2$ , de cada modelo teórico. Estos valores de  $R^2$  nos indican de forma numérica cuánto se ajustan los valores de la caída de presión calculados a los obtenidos experimentalmente.

Prueba/ Ensayo	$\Delta P_c$ teo cyclone [Pa]	$\Delta P_c$ teo Shepherd [Pa]	$\Delta P_c$ teo Alexander [Pa]	$\Delta P_c$ teo Casal [Pa]	$\Delta P_c$ teo Coker [Pa]
$R^2$	0,979546	0,979546	0,979546	0,979546	0,979546

 Tabla 7. Valores de la función  $R^2$  de los diferentes modelos teóricos analizados.

## Resultados experimentales

Por otro lado, en la figura 24 se han representado gráficamente los valores de la caída de presión obtenidos con los modelos teóricos examinados y valores experimentales en función de la velocidad de entrada en el ciclón.

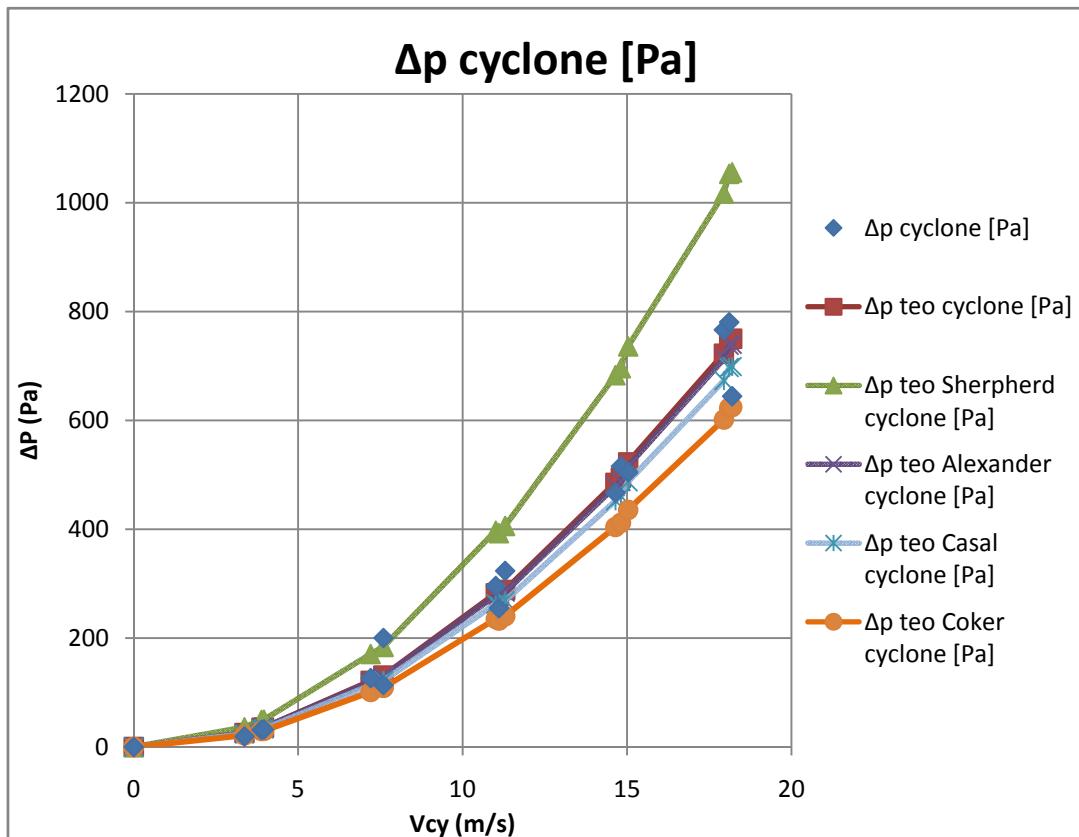


Figura 24. Representación de los resultados de la caída de presión en vacío.

En la figura 25 se exponen los valores de la caída de presión calculada con los diferentes modelos teóricos en vacío, respecto de los valores experimentales obtenidos. Esta representación gráfica informa visualmente mucho mejor que la anterior de la aproximación de cada valor teórico de la caída de presión obtenido con su respectivo valor experimental del ensayo.

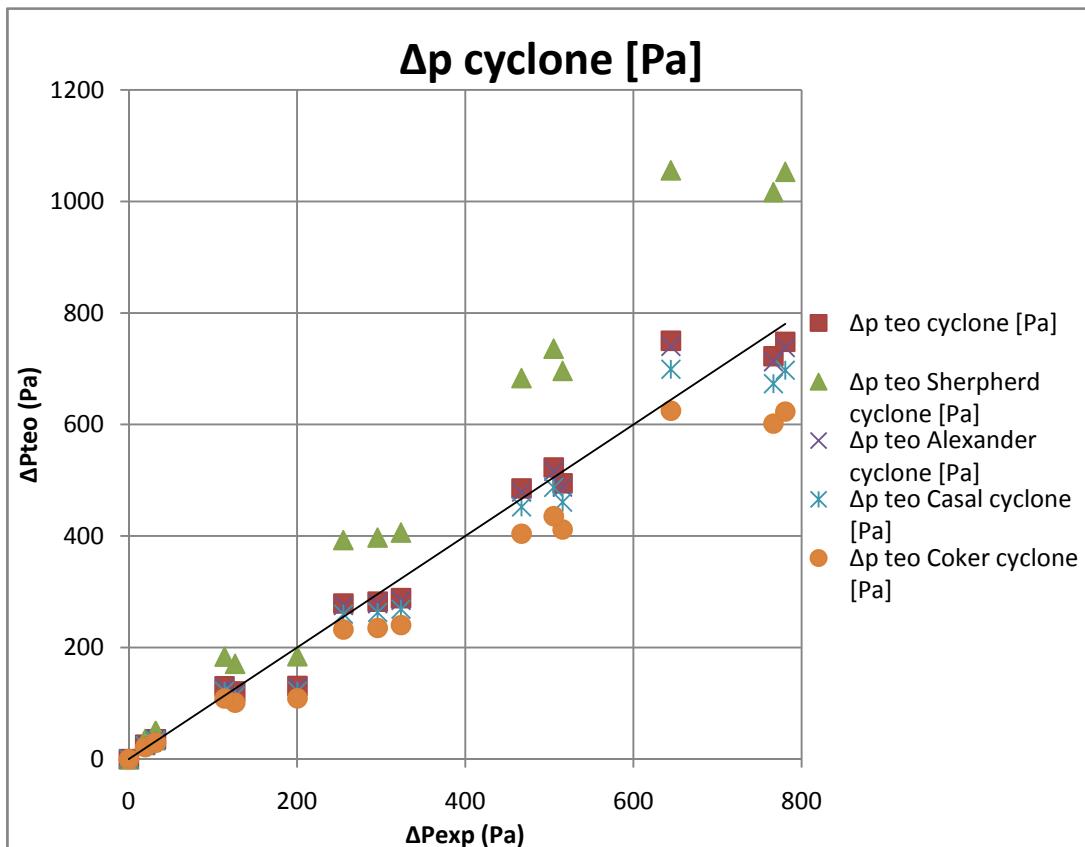


Figura 25. Representación de los resultados de la caída de presión en vacío teórica respecto de la experimental.

Por lo tanto, examinando la tabla anterior se puede comprobar que los resultados del ajuste realizado en este apartado, al igual que los de los demás modelos teóricos, tiene una aproximación muy buena a los resultados experimentales. Por otro lado, observando la figura 25 se puede apreciar cómo unos modelos se ajustan mejor que otros a los valores experimentales, es decir, sus puntos están más próximos a la recta  $x=y$  ( $\Delta P_{c\ exp}=\Delta P_{c\ teo}$ ). En conclusión, el ajuste de la caída de presión en vacío que mejor se asemeja a los resultados experimentales, y que por ello es el más idóneo para representar la caída de presión en los ciclones de la instalación cuando operan en ausencia de partículas, es el ajuste teórico estudiado en este apartado ( $\Delta P_{teo\ cyclone}$ ). Otros ajustes que tienen una buena aproximación son el modelo de Casal y el modelo de Alexander.

## Resultados experimentales

### 3.3.1.2 Pruebas en carga con la variación de velocidad

Los resultados experimentales que se obtuvieron en las pruebas en carga variando la velocidad y carga de partículas fueron los siguientes:

Prueba/ Ensayo	$v_{zlecho}$ [m/s]	$v_{zi}$ [m/s]	$\Delta P_{c\ exp}$ [mbar]	$\Delta P_{c\ exp}$ [Pa]	$T^a$ [° C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m_p$ [kg <sub>sol</sub> ]	t [s]	$G_s$ [kg <sub>sol</sub> /s]	$C_{si}$ [kg <sub>sol</sub> /kg <sub>gas</sub> ]	$\zeta_s\ exp$
C1	0,583	4,344	0,421	42,115	31,509	1,159	0,010	60	0,0002	0,011	0,962
C2	1,209	9,014	1,461	146,146	35,352	1,144	0,316	60	0,0053	0,168	0,785
C3	2,223	16,572	3,945	394,534	39,145	1,131	1,374	20	0,0687	1,204	0,635
C4	2,305	17,182	3,554	355,390	33,517	1,151	0,554	10	0,0554	0,920	0,522
C5	0,595	4,433	0,425	42,451	33,472	1,151	0,010	60	0,0002	0,011	0,937
C6	0,968	7,216	1,011	101,100	35,139	1,145	0,028	30	0,0009	0,037	0,847
C7	1,374	10,243	1,463	146,317	37,951	1,135	0,234	30	0,0078	0,220	0,614
C8	1,874	13,966	3,078	307,825	40,287	1,126	0,652	15	0,0435	0,907	0,700
C9	2,309	17,215	4,574	457,367	41,218	1,123	0,978	10	0,0978	1,661	0,686
C10	0,558	4,162	0,329	32,853	36,708	1,139	0,010	60	0,0002	0,012	0,832
C11	1,124	8,378	1,300	130,045	39,671	1,129	0,066	30	0,0022	0,076	0,820
C12	1,246	9,286	1,760	175,976	40,497	1,126	0,140	20	0,0070	0,220	0,906
C13	1,282	9,559	1,943	194,281	41,100	1,123	0,178	20	0,0089	0,272	0,945
C14	1,687	12,576	2,554	255,428	42,356	1,119	0,552	15	0,0368	0,859	0,721
C15	2,150	16,025	2,976	297,571	43,735	1,114	1,020	16	0,0638	1,173	0,520
C16	0,561	4,181	0,319	31,922	39,101	1,131	0,010	60	0,0002	0,012	0,807
C17	0,834	6,217	1,194	119,365	42,234	1,119	0,038	60	0,0006	0,030	1,378
C18	1,125	8,385	1,478	147,844	43,918	1,114	0,160	60	0,0027	0,094	0,943

Tabla 8. Resultados experimentales de los ensayos en carga realizados en el ciclón de carbonatación de la instalación.

Una vez conocida la carga de partículas en cada ensayo se calculó la caída de presión en el ciclón a partir de los distintos modelos teóricos en carga, los cuales se expusieron en los apartados 2.8 y 2.9. Estos valores teóricos de la caída de presión y la función  $R^2$  de cada modelo se expresan en la tabla 9 y figura 26.

Prueba/ Ensayo	$\Delta P_c$ Briggs [Pa]	$\Delta P_c$ Smolik [Pa]	$\Delta P_c$ Baskakov [Pa]	$\Delta P_c$ Grieco [Pa]
$R^2 =$	0,93219	0,73533	0,90769	0,94805

Tabla 9. Valores de la función  $R^2$  los diferentes modelos teóricos analizados.

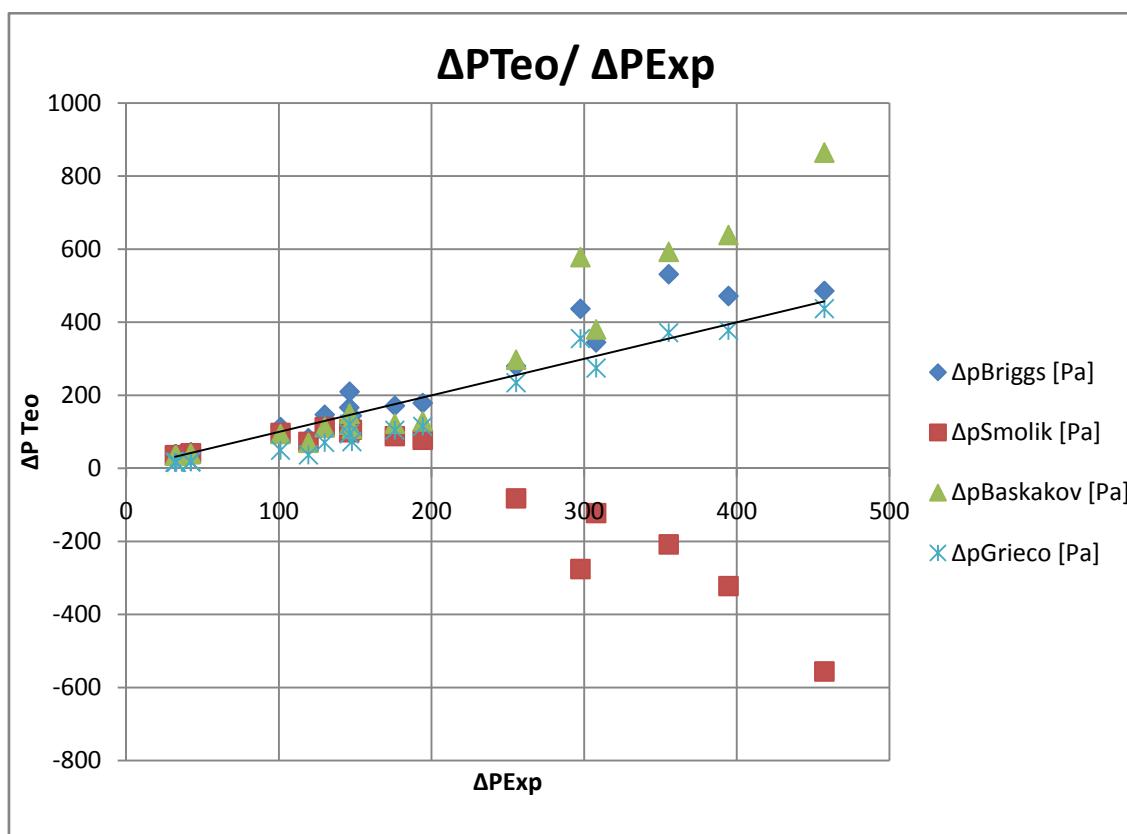


Figura 26. Representación de los resultados teóricos de la caída de presión en carga respecto de los datos experimentales.

## Resultados experimentales

Evaluando tanto el valor de la función de  $R^2$  como la gráfica mostrada en la figura 26, que relacionan los resultados teóricos con los experimentales, se puede deducir que el modelo teórico en carga que mejor se asemeja a los datos experimentales, sin duda, es el modelo de Grieco. Existen otras correlaciones como  $\Delta P_c$  Briggs la cual obtiene resultados muy favorables. También se puede observar que la correlación  $\Delta P_c$  Smolik es la que peores valores calcula.

Por lo tanto, la correlación de la caída de presión que se va a analizar tiene como base el modelo de Grieco, como se muestra en la ecuación (19):

$$\Delta P_{c\ cal} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot \zeta_g \cdot v_{zi}^2 + B \cdot v_{zi}^m \cdot C_{si}^n \quad (22)$$

Donde tanto “B” como “n” y “m” son las constantes que se calcularan bajo un procedimiento de ajuste como se expondrá en el siguiente apartado 3.3.2. En cuanto al número de Euler en vacío  $\zeta_g$  del ciclón se trabajará con el valor obtenido por el ajuste realizado en el apartado anterior, ya que como se ha demostrado es el más adecuado. Como se observa y se pretendía esta correlación es función (entre otros datos) de la carga de partículas y la velocidad de la corriente gaseosa en los ciclones de la instalación.

### 3.3.2 Selección de la correlación adecuada y ajuste de la misma

En este apartado se explicará el ajuste de la correlación investigada. Se comentará tanto el tipo de correlación como el método de ajuste por el cual fue calculada. Todo esto también podrá verse en el archivo de Excel en el cual se realizaron todos los cálculos necesarios. Seguidamente, los resultados de esta correlación se comparan con los resultados obtenidos de los modelos teóricos y experimentales. Para finalizar se elegirá aquel ajuste de la correlación que se aproxime mejor que los modelos teóricos a los datos experimentales.

La correlación examinada fue:

$$\Delta P_{c\ cal} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot \zeta_g \cdot v_{zi}^2 + B \cdot v_{zi}^m \cdot C_{si}^n \quad (23)$$

Esta correlación es compleja ya que consta de tres incógnitas como son “B”, “m” y “n”. El cálculo de esta correlación, cómo se va explicar, se realizó bajo la suposición de que el ciclón opera a velocidad constante con carga variable, utilizando los datos experimentales (tabla 8). En dicho criterio el valor de  $\zeta_g$  (vacío) con el que se trabajó fue 4,004 (ajuste experimental).

Para obtener el valor de “B”, “m” y “n” se realizaron los siguientes pasos:

- 1) Los ensayos representados en la tabla 5 se agruparon en parejas, aquellos que tenían una velocidad ( $v_{zi}$ ) muy similar. De esta clasificación se obtuvieron las siguientes parejas de ensayos: C1 con C10, C4 con C9 y C11 con C18.
- 2) El valor de “n” se obtuvo a partir de las parejas de ensayos elegidas en el paso anterior. Para ello, se aplicó el siguiente proceso de cálculo y las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P_i = (1/2) \cdot \rho_i \cdot \zeta_g \cdot v_{zi_i}^2 + B \cdot v_{zi_i}^m \cdot C_{si_i}^{n_{ij}} \quad (24)$$

$$\Delta P_j = (1/2) \cdot \rho_j \cdot \zeta_g \cdot v_{zi_j}^2 + B \cdot v_{zi_j}^m \cdot C_{si_j}^{n_{ij}} \quad (25)$$

Donde el subíndice “i” representa los valores experimentales de un ensayo y el “j” los del otro ensayo de la pareja. A partir de este sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas se calculó el valor de “ $n_{ij}$ ”. De una de ellas, por ejemplo,  $\Delta P_i$  se despejó  $v^m$  para sustituirlo en la otra y aplicando propiedades logarítmicas se obtuvo:

$$n_{ij} = \log\left(\frac{c_{sij}}{c_{sii}}\right) \left( \frac{\Delta P_j - (1/2) \cdot \rho_j \cdot \zeta_g \cdot v_{zij}^2}{\Delta P_i - (1/2) \cdot \rho_i \cdot \zeta_g \cdot v_{zii}^2} \right) \quad (26)$$

Una vez resuelto esto para cada pareja, se tomó como valor de “n” para la correlación el valor medio de la suma de todas las “n” de las parejas de ensayos analizadas.

- 3) Se realizó el siguiente cambio de variable  $B' = B \cdot v_{zi}^m$ , para posteriormente como se explicará, calcular “B” y “m” de la correlación por medio de un ajuste logarítmico. Para cada ensayo de la tabla 8 se calculó su valor de “B’”, suponiendo el valor de “n” obtenido en el paso anterior. Despejando “B’” de la ecuación 23 se tiene que:

$$B'_i = \frac{\Delta P_i - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho_i \cdot \zeta_g \cdot v_{zii}^2}{c_{sii}^n} \quad (27)$$

Donde el subíndice “i” representa cada ensayo.

- 4) En este último paso se calculó el valor de “B” y “m” a partir una aproximación logarítmica. Pero antes, como los valores de B’ de los ensayos son negativos y como se sabe que no existe el logaritmo de un número negativo, es necesario realizar el siguiente cambio de variable:

$$B' = B \cdot v_{zi}^m \rightarrow -B' = -B \cdot v_{zi}^m$$

$$a' = a \cdot v_{zi}^m \quad \text{siendo, } a' = -B' \text{ y } a = -B$$

Aplicando varias propiedades logarítmicas se obtiene que:

$$a' = a \cdot v_{zi}^m \rightarrow \ln(a') = \ln(a) + m \cdot \ln(v_{zi})$$

Por lo tanto, el ajuste logarítmico consistió en representar gráficamente los valores del  $\ln(a')$  frente a los del  $\ln(v_{zi})$  para cada ensayo de la tabla 5. Dichos valores se aproximaron por la recta  $y = A + qx$  y se calcularon los valores de A y q con el programa informático Excel 2007. Para seguidamente, obtener “B” y “m” con este procedimiento:

$$y = \ln(a')$$

$$A = \ln(a) \rightarrow a = e^A \rightarrow B = -a$$

$$q = m$$

Finalmente, los valores de “B”, “m” y “n” que se lograron fueron -2,7813E-05, 5,701 y -0,74754 respectivamente. De tal manera, que la correlación calculada se define como:

$$\Delta P_{c\ cal1} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot 4,004 \cdot v_{zi}^2 + (-2,7813 \cdot 10^{-5}) \cdot v_{zi}^{5,017} \cdot C_{si} \quad (28)$$

Una vez definida esta correlación, se calcularon sus valores de la caída de presión para compararlos con los resultados experimentales y teóricos que se han obtenido anteriormente. Para elegir aquel ajuste que mejor se aproxime a los datos experimentales se utilizó la función estadística  $R^2$ , además de la representación gráfica como se puede ver en la siguiente tabla y figuras:

Prueba/ Ensayo	$\Delta P_c$ Briggs [Pa]	$\Delta P_c$ Smolik [Pa]	$\Delta P_c$ Baskakov [Pa]	$\Delta P_c$ Griego [Pa]	$\Delta P_c$ Cal1 [Pa]
$R^2$	0,93219	0,73533	0,90769	0,94805	0,95863

Tabla 10. Valores de la función  $R^2$  de los modelos teóricos e investigados analizados.

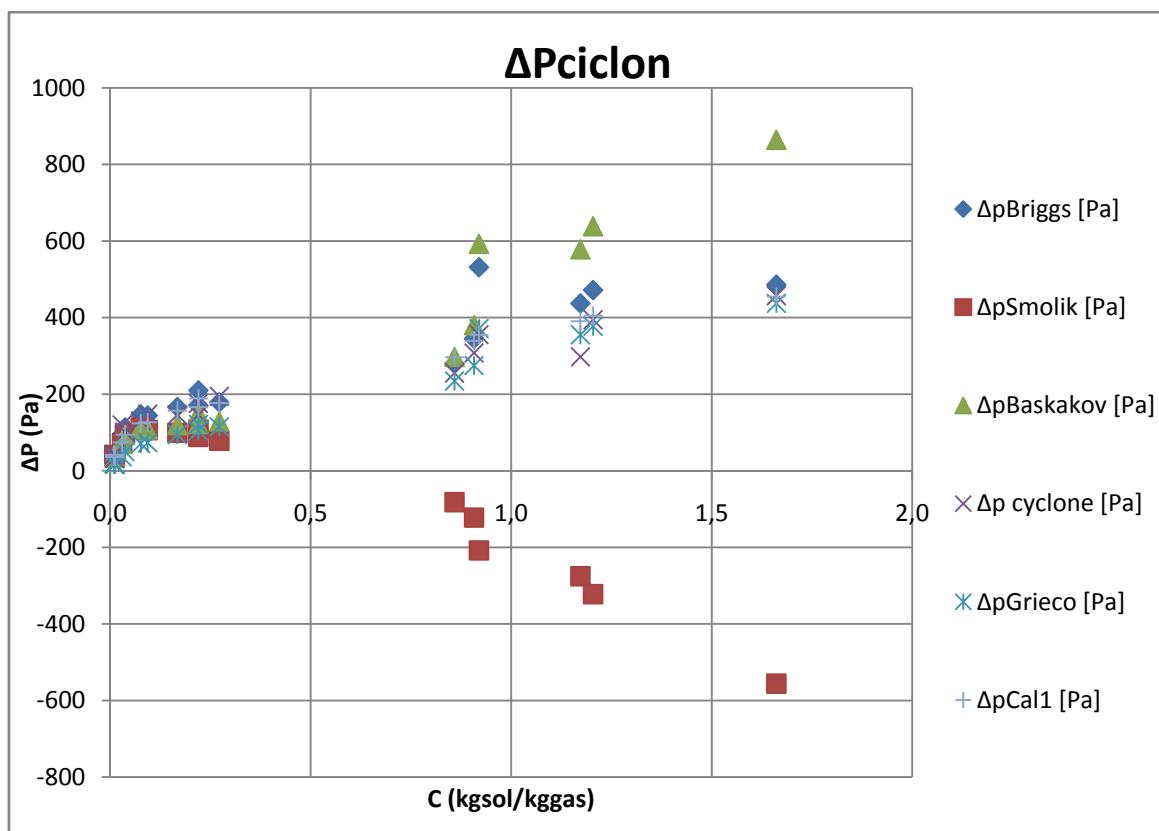


Figura 27. Representación de los resultados de la caída de presión en carga en función de la misma.

## Resultados experimentales

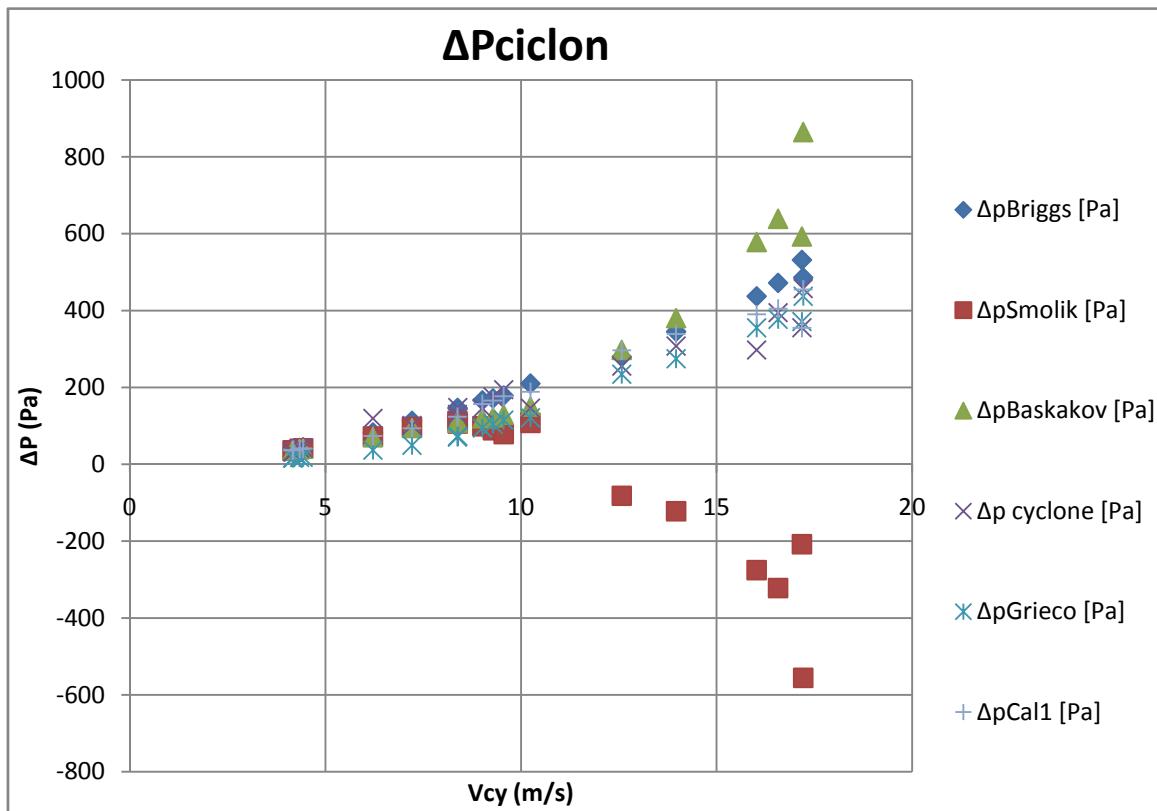


Figura 28. Representación de los resultados de la caída de presión en carga en función de la velocidad.

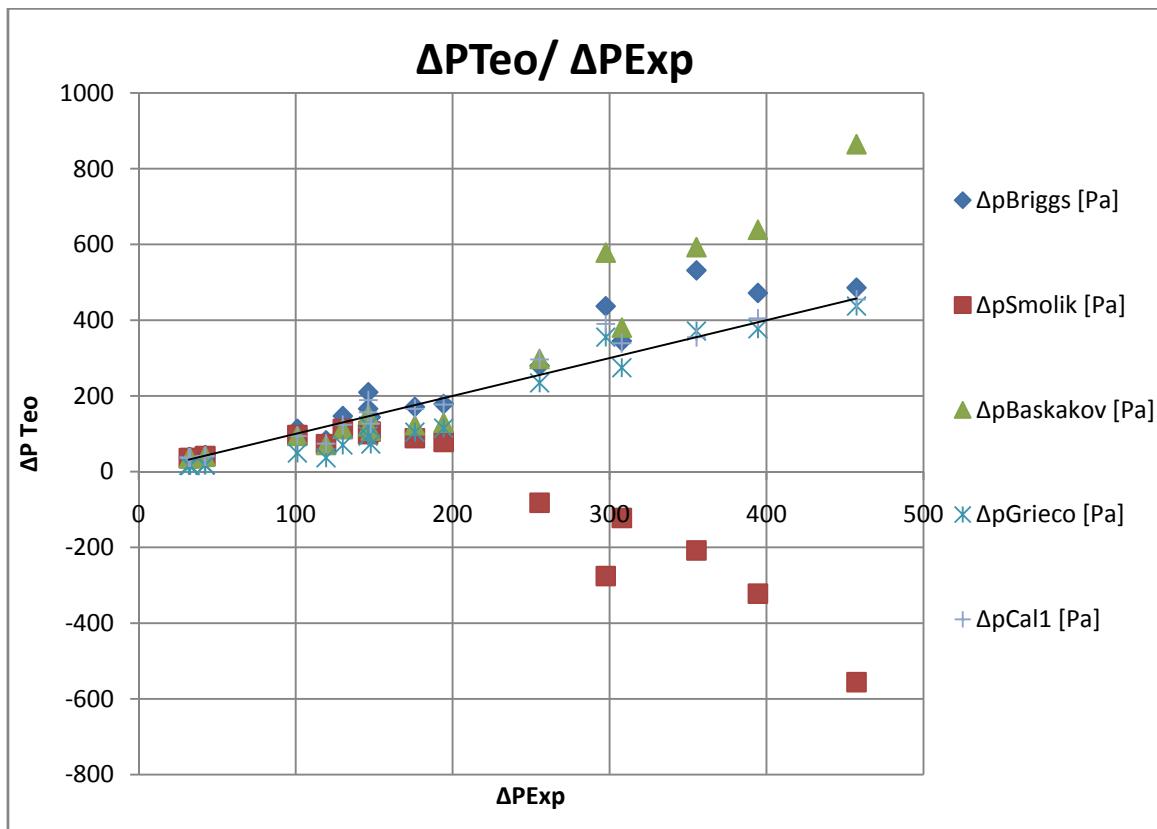


Figura 29. Representación de los resultados teóricos de la caída de presión en carga respecto de los datos experimentales.

Examinando los resultados de todas las correlaciones analizadas se puede apreciar que la correlación,  $\Delta P_c \text{ Cal1}$ , tiene el valor de la función  $R^2$  más próximo a la unidad de todas y por tanto el mejor de todos. Dicho valor es superior al modelo de Grieco, como se ha comentado anteriormente, es el que mejores resultados obtiene de todos los modelos teóricos. Por consiguiente, se puede deducir a través de esta función estadística ( $R^2$ ), que la correlación  $\Delta P_c \text{ Cal1}$  es la que mejor se ajusta de todas a los datos adquiridos experimentalmente.

Además analizando las representaciones gráficas una a una se puede observar que la última de ellas es la que mayor y mejor información proporciona para conocer cuál de todas las correlaciones es la que mejor se aproxima a los datos conseguidos experimentalmente. De esta forma, en esta última gráfica se puede apreciar cómo para valores bajos de la caída de presión todas las correlaciones se ajustan muy correctamente. Pero para valores altos y en general, las que mejor se aproximan a los resultados experimentales son:  $\Delta P_c \text{ Cal1}$ ,  $\Delta P_c \text{ Briggs}$  y  $\Delta P_c \text{ Grieco}$ . Y de todas ellas la correlación que tiene más puntos cercanos a la recta  $x=y$ , es decir  $\Delta P_c \text{ exp} = \Delta P_c \text{ exp}$ , es  $\Delta P_c \text{ Cal1}$ . Por lo tanto, se demuestra gráficamente que esta correlación es la que obtiene resultados de la caída de presión en el ciclón más próximos a los datos experimentales.

En definitiva para terminar la selección y el ajuste de la correlación más adecuada para los ciclones de la instalación, por lo razonado anteriormente, se deduce que es  $\Delta P_c \text{ Cal1}$ , es decir, la correlación investigada.

## Resultados experimentales

**4 CONCLUSIONES**

Se ha realizado el estudio y análisis de un dispositivo centrífugo como es un ciclón tangencial. Este equipo forma parte de una instalación de captura de dióxido de carbono basada en un ciclo de carbonatación-calcinación. Dicha instalación consta de dos ciclones iguales. En ella al ser de flujo frío ambos ciclones realizan la misma operación, la cual es tratar de capturar la caliza existente en una corriente de aire. Pero en una instalación de este tipo cuyo funcionamiento fuera real, cada ciclón realizaría una función diferente: uno separaría la caliza de la corriente gaseosa en el circuito de carbonatación, y el otro, separaría la caliza existente en una corriente de dióxido de carbono en el circuito de calcinación.

Esta instalación presentaba un problema importante que era poder medir de manera continua y no intrusiva el caudal de partículas que circula por ella. Dicho problema era necesario solucionarlo para poder estudiar adecuadamente la fluidodinámica de este proceso de captura de dióxido de carbono. Sabiendo que en ella se puede medir tanto la velocidad de la corriente en el lecho fluido circulante como la caída de presión en el ciclón de manera continua y no intrusiva con una instrumentación apropiada para ello. Se decidió para resolver este problema hacer un estudio teórico y experimental del ciclón para obtener una correlación de la caída de presión, en donde, dependiese de la velocidad de la corriente y la carga de partículas que circula por él. Además de otros datos que se pueden obtener fácilmente y correctamente. Por consiguiente, el objetivo principal de este proyecto consistió en seleccionar, analizar y ajustar una correlación adecuada de la caída de presión en el ciclón para a partir de ella conocer el caudal de partículas que circula por la instalación.

Lo primero que se planteó para abordar dicho objetivo fue hacer un estudio teórico del funcionamiento de un ciclón tangencial, así como sus características principales. El siguiente paso fue examinar con más profundidad la caída de presión en un ciclón. Por un lado, se dedujo que la caída de presión depende de la geometría del ciclón, la densidad de la corriente, la carga de partículas y la velocidad de la corriente en la entrada del ciclón, como se requería. Y por otro lado, se analizaron varios modelos teóricos para el cálculo de la caída de presión en un ciclón tangencial en vacío y en carga, como han sido expuestos. Tras este estudio, teóricamente se concluyó que al aumentar la velocidad, la caída de presión en el ciclón se incrementa de forma cuadrática, mientras que, con carga de partículas no sucede lo mismo dependiendo del modelo teórico que se utilice al incrementar dicha carga, la caída de presión en el ciclón aumenta o disminuye exponencialmente.

## Conclusiones

Una vez conocida la parte teórica lo siguiente fue analizar la caída de presión de manera experimental en la instalación que se dispone para el estudio de la fluidodinámica de este proceso de captura de CO<sub>2</sub>. Como se comentó ambos ciclones son idénticos y realizan la misma función, por lo tanto, para estudiar la problemática, que presentaba la instalación, con analizar uno fue suficiente. Por este motivo, la configuración de la instalación en la que se efectuaron los ensayos fue sólo la del circuito de carbonatación, es decir, la loopseal se conectó directamente con el lecho fluido circulante del mismo circuito y así cerrarlo. Los ensayos que se llevaron a cabo con esta configuración se clasificaron en dos tipos, los que se realizaron en condiciones de operación en vacío y los que se realizaron en condiciones de operación en carga. El proceso de desarrollo de los ensayos en carga fue mucho más complejo y laborioso que el realizado en vacío, debido a que, en ellos se trabajó con diferentes inventarios de partículas y luego se tuvo en cada ensayo se tuvo que esperar a que el proceso tuviera un estado estacionario para poder obtener los datos necesarios y correctos, como la caída de presión en el ciclón, la temperatura de la corriente (para calcular la densidad) y la velocidad de la misma en el lecho fluido circulante. Posteriormente, a la toma de todos estos valores en cada ensayo en carga se midió la carga de partículas, tal y como se explica en su correspondiente apartado en esta memoria. Tras realizar todos los ensayos necesarios con las diferentes condiciones de trabajo y examinar los resultados, se concluye lo siguiente:

En cuanto a la dependencia de la caída de presión con la velocidad del flujo. Se puede observar en las gráficas de los resultados experimentales que tanto cuando se trabaja con carga de partículas como sin ella, al aumentar la velocidad del flujo la caída de presión aumenta de forma exponencial. Esto demuestra lo deducido tras analizar la teórica estudiada de que la caída de presión es proporcional a la velocidad del flujo al cuadrado.

Respecto a la dependencia de la caída de presión con la carga de partículas. Examinando las gráficas de los resultados experimentales en los ensayos en carga se puede extraer la siguiente información: al aumentar la carga la caída de presión aumenta. Pero también se puede observar que según concreto modelo teórico se analice la caída de presión en el ciclón aumenta o disminuye (Smolik), cuando la carga de partículas aumenta. Por lo tanto, se demuestra lo supuesto en el estudio teórico previo.

El próximo punto consistió en realizar un análisis, selección y ajuste de la correlación adecuada con el que se solucionó el problema que presenta esta instalación. Para elaborar esta correlación se partió del modelo teórico que mejor se approxima a los datos experimentales, el cual fue el modelo de Enrico Grieco. A continuación se desarrolló un proceso de ajuste de esta correlación, que se enseñó anteriormente en esta memoria con sus respectivos cálculos. De todo este estudio,

se extrajo la correlación de la caída de presión que se estaba buscando y con la que consiguió el objetivo fijado en este proyecto, la cual es:

$$\Delta P_{cCal1} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot \zeta_g \cdot v_{zi}^2 + (-2,7813 \cdot 10^{-5}) \cdot v_{zi}^{5,701} \cdot C_{si}^{-0,74754} \quad (29)$$

Una vez ajustada esta nueva correlación se representó y examinó conjuntamente con los modelos teóricos estudiados y los datos experimentales. De este análisis, que se explica en su correspondiente apartado, se concluyó y demostró que esta correlación obtenida era la que mejor se adecuaba al comportamiento de la caída de presión en los ciclones de la instalación por encima que las de los demás modelos.

Para finalizar se ha de hacer mención sobre las conclusiones personales obtenidas tras la realización de este proyecto. De todas ellas cabe destacar, que gracias a las buenas condiciones de trabajo, la solución elegida a los problemas de organización y gestión del proyecto ha sido la más adecuada. Además la temática del proyecto ha resultado motivadora a la hora de instruirse en lo necesario para una correcta compresión y un adecuado desarrollo de dicho proyecto. Aunque la carga de aprendizaje tanto de nuevos conceptos como de metodología de trabajo ha sido elevada, el resultado a nivel personal ha sido muy satisfactorio. También, se ha de comentar que a lo largo de la elaboración de este proyecto se han aplicado conocimientos y destrezas adquiridas durante los estudios universitarios cursados.

## Conclusiones

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer, “*La captura y el almacenamiento de dióxido de carbono*”, ISBN 92-9169-319-7. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005.
- [2] Página web de “*Scottish Centre for Carbon Storage*”, vista en dic/09: [www.geos.ed.ac.uk/sccs/capture/postcombustion.html](http://www.geos.ed.ac.uk/sccs/capture/postcombustion.html)
- [3] Alex C. Hoffmann y Louis E. Stein, “*Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation*”, ISBN 3-540-43326-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002.
- [4] C.D. Cooper y F.C. Callejón, “*Cyclones: control de la contaminación atmosférica*”, 1986.
- [5] Página web de ChEViC (Chemical Engineering Virtual Class), visitada en enero/10:  
<http://www.diquima.upm.es/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/INDICE1.HTM>
- [6] Cristóbal Cortes y Antonia Gil, “*Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators*”, Progress in Energy and Combustion Science, 33, 2007, 409-452.
- [7] Enrico Grieco y Luca Marmo, “*A model for the pressure balance of a low density circulating fluidized bed*”, Chemical Engineering Journal, 140, 2008, 414-423.

## Referencias bibliográficas

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un  
cyclón tangencial

Análisis experimental de la influencia de la carga de sólidos en la caída de presión en un ciclón tangencial