

**PLAN DE MEJORAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE LA FÁBRICA DE CAL Y
CARBUROS DEL NORTE, UBICADA EN OCAÑA, NORTE DE SANTANDER**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Químico

**Realizado por:
Fabián Alfredo Carrascal Delgado**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2007**

**PLAN DE MEJORAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE LA FÁBRICA DE CAL Y
CARBUROS DEL NORTE, UBICADA EN OCAÑA, NORTE DE SANTANDER**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Químico

Realizado por:
Fabián Alfredo Carrascal Delgado

Dirigido por el Doctor:
Carlos Guerra, Ingeniero Químico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2007**

RESUMEN

Titulo

PLAN DE MEJORAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE LA FABRICA DE CAL Y CARBUROS DEL NORTE, UBICADA EN OCAÑA, NORTE DE SANTANDER*

Autor

Fabián Alfredo Carrascal Delgado**

Palabras claves

Cal, Ciclones, Filtros de Mangas, Separación Sólido-Gas

Descripción

La “Fabrica de Cal y Carburos del Norte”, ubicada en Ocaña, Norte de Santander, ha operado, desde sus inicios, de forma empírica con tecnología rudimentaria, mucha astucia y creatividad del dueño de la misma y sin el apoyo de ningún profesional en la materia. Esto, aunque no es del todo malo, ha presentado como consecuencia altas emisiones de polvo al ambiente durante el procesamiento de la cal, perjudicando principalmente los empleados y generando pérdidas considerables de cal durante su procesamiento.

En esta tesis de pre-grado en Ingeniería Química, se desarrolló una metodología conducente a solucionar el problema de emisión particulado al ambiente de esta fábrica y mejorar las condiciones operativas de los empleados; para ello, se diseñó un sistema de separación aire – cal que consta de dos ciclones operando en serie, filtros de mangas y el diseño de un ventilador encargado de realizar el transporte neumático.

Los resultados obtenidos muestran que las mejores condiciones de separación sólido – gas para esta fábrica constan de un diseño de dos ciclones operando en serie de 1,5 y 0,5 metros de diámetro, con una velocidad de operación diseñada de 11 m/s para lograr eficiencias de separación de %83,81 y %91,00 respectivamente, lo cual brinda una eficiencia global de operación del %98,44 para los ciclones en serie. Además, se encontró que, teóricamente, dos filtros de mangas de 4 metros de altura y 20 centímetros de diámetro son suficientes para entregar el aire más puro al ambiente, disminuir las pérdidas de cal y mejorar las condiciones operativas de los empleados.

Del mismo modo, se determinaron las principales variables de diseño del ventilador. Estas son: volumen de aire de 103 ft³/min, caída de presión de la mezcla aire-cal en el sistema de 68,4 pulgadas de agua y finalmente una potencia de 15 Hp.

* Tesis

** Facultad de Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director: Álvaro Ramírez García

SUMMARY

Title

PLAN OF IMPROVEMENT AND PREPARING OF THE “FABRICA DE CAL Y CARBUROS DEL NORTE”, LOCATED IN OCAÑA, NORTH OF SANTANDER*

Author

Fabián Alfredo Carrascal Delgado**

Key words

Lime, Cyclones, Filters of Sleeves, Separation Solid-gas

Description

The "Fabrica de Cal y Carburos Del Norte ", located in Ocaña, North of Santander, it has operated, from their beginnings, in an empiric way with technology rudimentary, a lot of cunning and the owner's of the same one creativity and without the support of any professional in the matter. This, although it is not completely bad, it has presented as consequence discharges powder emissions to the atmosphere during the prosecution of the lime, harming mainly the employees and generating lost considerable of lime during their prosecution.

In this pre-grade thesis in Chemical Engineering, a conducive methodology was developed to solve the problem of solid emission to the atmosphere of this factory and to improve the operative conditions of the employees; for it, it was designed a system of separation air - lime that consists of two cyclones operating in series, filters of sleeves and the design of a fan in charge of carrying out the pneumatic transport.

The obtained results show that the best conditions of separation solid - gas for this factory consists of a design of two cyclones operating in series of 1,5 and 0,5 diameter meters, with a speed of designed operation of 11 m/s to achieve efficiencies of separation of %83,81 and %91,00 respectively, that which offers a global efficiency of operation of the %98,44 for the cyclones in series. Also, it was found that, theoretically, two filters of sleeves 4 meters high and 20 centimeters of diameter are enough to give the purest air to the atmosphere, to diminish the lost of lime and to improve the operative conditions of the employees.

In the same way, the main variables of design of the fan were determined. These are: volume of air of 103 ft³/min, fall of pressure of the mixture air-lime in the system of 68,4 inches of water and finally a power of 15 Hp.

* Thesis

** Faculty of Physiochemical, School of Chemical Engineering, Director: Álvaro Ramírez García

DEDICATORIA

A toda mi familia y en especial a mi Papa, Alfredo Carrascal Casadiego, en quien reconozco un emprendedor de primera que ha hecho empresa a partir del querer hacer sin importar los obstáculos a que las especializaciones conducen.

A Gloria Isabel...

AGRADECIMIENTOS

En este segundo trabajo de grado, después de graduarme como Químico, quiero agradecer de nuevo a mis padres y hermanas, a mis familiares, a mis compañeros y amigos, y a todos aquellos que han estado presentes en mi vida y que han contribuido en mi desarrollo como persona.

Además, quiero agradecerle a Gloria Isabel, a quien nunca tendré para pagarle todo su esfuerzo, dedicación, comprensión y cariño hacia mí. Sin tu apoyo no hubiese podido ser posible este nuevo logro.

Gracias a todos por creer en mí.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN.....	9
MARCO TEÓRICO	10
1 LA CAL.....	10
2 PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO GAS	11
2.1 CICLONES.....	11
2.1.1 <i>Eficiencia de separación.....</i>	12
2.1.2 <i>Variables de diseño.....</i>	14
2.2 FILTROS DE MANGAS.....	17
2.2.1 <i>Eficiencia de separación.....</i>	18
2.2.2 <i>Variables de diseño.....</i>	18
2.3 LIMPIADORES HÚMEDOS	20
2.4 PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.....	20
DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	22
1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CAL.....	22
1.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA AL CICLÓN.....	23
2 DISEÑO DEL CICLÓN	23
2.1 COMPROBACIÓN DEL DIÁMETRO DEL CICLÓN	23
2.2 EFICIENCIA DE SEPARACIÓN.....	24
2.3 DIMENSIONES DEL CICLÓN.....	24
2.4 COMPROBACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL CICLÓN	24
3 DISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS.....	25
4 DISEÑO DEL VENTILADOR	25
4.1 VOLUMEN DE AIRE A TRANSPORTAR.....	25
4.2 CAÍDA DE PRESIÓN DEL SISTEMA.....	26
4.3 POTENCIA DEL VENTILADOR	27
RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	28
1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CAL.....	28
1.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA AL CICLÓN.....	29
2 DISEÑO DEL CICLÓN	30
2.1 COMPROBACIÓN DEL DIÁMETRO DEL CICLÓN	31
2.2 EFICIENCIA DE SEPARACIÓN.....	33
2.2.1 <i>DISEÑO DE CICLÓN EN SERIE</i>	35

2.3	DIMENSIONES DE LOS CICLONES.....	36
2.4	COMPROBACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL CICLÓN	36
3	DISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS.....	37
4	DISEÑO DEL VENTILADOR	38
4.1	VOLUMEN DE AIRE A TRANSPORTAR.....	38
4.2	CAÍDA DE PRESIÓN DEL SISTEMA.....	38
4.3	POTENCIA NECESARIA	40
5	DISEÑO COMERCIAL DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN CAL-AIRE	41
6	CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS: TEÓRICO VS COMERCIAL	41
	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42
	CONCLUSIONES.....	43
	RECOMENDACIONES	43
	ANEXOS	44
1.	GRÁFICAS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CAL.....	44
2.	ESQUEMA DEL DISEÑO REALIZADO DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN AIRE-CAL.....	45
3.	MOLIENDA.....	46
4.	PROPORCIONES TÍPICAS DE DISEÑO DEL SEPARADOR DE CICLÓN.....	47
5.	RESTRICCIONES DIMENSIONALES Y OPERACIONALES DEL DISEÑO DE CICLONES	48
6.	CAÍDA DE PRESIÓN DEL SISTEMA.....	50
7.	FILTROS DE MANGAS	52
8.	LIMPIADORES HÚMEDOS	54
8.1.	LIMPIADOR POR ATOMIZADO	54
8.2.	LIMPIADOR CENTRÍFUGO.....	55
8.3.	LIMPIADOR DE CHOQUE	55
8.4.	LIMPIADOR DE LECHO FLOTANTE.....	55
8.5.	LIMPIADOR DINÁMICO	55
8.6.	LIMPIADOR DE CHORRO.....	56
8.7.	LIMPIADOR DE BOQUILLA SUMERGIDA.....	56
8.8.	LIMPIADOR VENTURI.....	56
9.	PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	56
9.1.	TIPO PLACA	57
9.2.	TIPO TUBO	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

INTRODUCCIÓN

La “Fabrica de Cal y Carburos del Norte”, ubicada en Ocaña, Norte de Santander, ha operado, desde sus inicios, de forma empírica con tecnología rudimentaria, mucha astucia y creatividad del dueño de la misma y sin el apoyo de ningún profesional en la materia. Esto, aunque no es del todo malo, ha presentado como consecuencia altas emisiones de polvo al ambiente durante el procesamiento de la cal, perjudicando principalmente los empleados y generando perdidas considerables de cal durante su procesamiento*. A partir de lo anterior, se realizó este trabajo de grado en el cual se diseño un proceso adecuado para el procesamiento de la cal en el cual se busco, primero, mejorar las condiciones laborales de los empleados, segundo, reducir las emisiones de polvo de cal al ambiente y mejorar la relación con este y, finalmente, disminuir las perdidas de cal durante su procesamiento.

* Carrascal Casariego Alfredo. Propietario de “Fabrica de Cal y Carburos del Norte”.

MARCO TEÓRICO

La “Fabrica de Cal y Carburos del Norte” actualmente es una comercializadora de cal, adquiere la cal viva o apagada y le realiza tratamientos químicos o físicos, según las exigencias del cliente. Opera de forma artesanal, tamizando la cal en cedazos corrientes y moliéndola en un molino de martillos de alta velocidad y finalmente empacando el producto manualmente en bolsas plásticas (Carrascal Casariego Alfredo). Durante estas operaciones los empleados están en riesgo permanente debido a la falta de medidas de control y a la alta agresividad de la cal; además, durante la molienda la emisión de material particulado al ambiente es alta, dejando en riesgo también al ambiente y originándose, lógicamente, pérdidas de cal.

1 LA CAL

Es el producto de reacción de la calcinación y descarbonatación de la roca caliza. La cal viva o gruesa esta compuesta principalmente por oxido de calcio CaO , aunque en ocasiones por una mezcla de oxido de calcio y magnesio. Cuando el contenido de MgO es alrededor del 15-20% la cal recibe la denominación de dolomítica¹.

La cal con alto contenido de CaO es más resistente, de color blanco nieve, pero con presencia, así sea mínima, de impurezas tales como hierro o magnesio toma una coloración gris o amarilla^{1,2}. La calcinación del mineral se realiza en equipos de calcinación, normalmente llamados hornos para cal, pueden ser de estructura vertical u horizontal rotatoria. La calcinación se inicia a temperaturas cercanas a los 650°C y se finaliza alrededor de los 1150°C ^{1,3}. Finalizado este proceso la cal se enfría y dependiendo del uso que se le quiera brindar esta sufre transformaciones químicas y/o físicas. Entre los procesos químicos se tiene el apagado o hidratación de la cal, esta reacción se produce al agregarle agua a la cal viva para producir hidróxido de calcio, principalmente. Esta reacción es fuertemente exotérmica, en menor medida para la cal dolomítica. Posterior al apagado, algunas veces la cal es tamizada y molida según las especificaciones del cliente. También es común encontrar en el

mercado un producto finamente molido y coloreado de cal, comúnmente denominado carburo para pintar y se obtiene al moler la cal apagada y tamizada mezclada con tintes inorgánicos (Carrascal Casariego Alfredo).

Las aplicaciones industriales de la cal son amplias y conocidas desde hace gran tiempo, otras por el contrario, son novedosas y prometedoras para el desarrollo del mercado de la cal. Algunas de las aplicaciones de la cal se encuentran en: el tratamiento de agua potable, de desecho industrial y de alimentación para calderas, la manufactura de la caña de azúcar, la industria del papel, la producción de hidrógeno y metanol, la producción de concentrados animales, la construcción y materiales de construcción, estabilización de suelos y carreteras, recubrimientos nanotecnológicos, la industria de productos químicos, el control y la eliminación de los óxidos de azufre y nitrógeno productos de la combustión, entre otras.

2 PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO GAS

Existe gran variedad de equipos para la separación de partículas de un chorro de gas antes que sean descargados a la atmósfera. Según la naturaleza y propiedades de las partículas, el proceso industrial implicado y las condiciones de recolección se tienen cuatro diferentes tipos generales de separadores: ciclones, filtros de mangas, limpiadores húmedos y precipitadores electrostáticos⁴.

2.1 CICLONES

El equipo más usado para separar partículas sólidas pequeñas o polvo fino de los gases es el separador de ciclón. El ciclón es un cilindro vertical con fondo cónico en el que la mezcla de gas y partículas sólidas entra tangencialmente a gran velocidad por la parte superior produciendo un movimiento giratorio, alrededor y hacia abajo del ciclón, que arrastra a las partículas hacia la pared de forma radial debido a la fuerza centrífuga que se desarrolla. Los sólidos son recogidos en el fondo mientras el aire separado abandona el equipo por una tubería ubicada en la parte superior del ciclón^{5,6,7,8}.

El ciclón es esencialmente un dispositivo de sedimentación en el que una intensa fuerza centrífuga, que actúa radialmente, es la que se utiliza en vez de una fuerza gravitacional relativamente débil dirigida verticalmente. La fuerza centrífuga en un ciclón va desde unas 5 veces la fuerza de gravedad en unidades grandes de baja velocidad, hasta 2500 veces en unidades pequeñas de alta resistencia.

Estos equipos son muy comunes en ciertas aplicaciones, como el secado de alimentos por rociado, en el que las partículas secas se separan con ciclones; en equipos separadores de polvos ambientales; y en la separación de rocíos finos de los gases. Los ciclones constituyen uno de los sistemas más económicos para la separación de gases y partículas y se pueden en partículas de más de 5 μm de diámetro suspendidas en gases; para partículas de más de 200 μm , se prefieren las cámaras de precipitación por gravedad. Algunas veces se usan ciclones de purificación en húmedo, en los cuales se rocía agua para ayudar a separar los sólidos^{4,5,9}.

Las partículas de polvo que entran en el ciclón son aceleradas radialmente, pero la fuerza que actúa sobre una partícula no es constante debido a la variación del radio (r) y también a que la velocidad tangencial en el vórtice varía con r y con la distancia por debajo de la entrada. El cálculo de las trayectorias de las partículas es difícil por lo que la eficacia de un ciclón se predice ordinariamente a partir de correlaciones empíricas⁷.

2.1.1 Eficiencia de separación

La eficiencia de separación se basa en el efecto de arrastre que produce el aire sobre las partículas que no se separan por acción centrífuga en el cuerpo del ciclón. Los ciclones pueden alcanzar eficiencias de separación del 95% para partículas de 5 μm y hasta del 99% para partículas de mayor tamaño.

La capacidad y eficacia dependen de la velocidad de entrada de la mezcla, de las dimensiones del ciclón y del tamaño de las partículas. En términos generales, velocidades altas de entrada de la mezcla, diámetro pequeño del ciclón y partículas

no muy pequeñas favorecen una alta eficiencia de operación. La eficiencia se afecta solo con variar relativamente un poco las condiciones de operación.

El factor de diseño más determinante en la eficiencia es el diámetro del ciclón, una unidad de operación de diámetro pequeño ajustada a una caída de presión específica produce la mayor eficiencia. Ciclones de diámetro pequeño, sin embargo, requieren de múltiples unidades en paralelo para una capacidad en específico. En este caso, se pueden acoplar numerosos ciclones de pequeño diámetro en una sola cámara con conducciones comunes para la alimentación y los gases que salen, así como un único colector de polvo^{4,9,10}.

La eficiencia de separación se afecta considerablemente, incluso más de lo predicho por la teoría, al disminuir el tamaño de las partículas. Para partículas pequeñas, la velocidad radial y la eficacia de separación serán una función de D_p^2 , pero puede producirse aglomeración de partículas finas, aumentando la eficacia para estas partículas. Debido al efecto del tamaño de las partículas, el polvo no recogido que sale con el gas tiene un tamaño medio mucho menor que el del polvo que entra, lo cual puede ser importante al establecer los límites de emisión. Por otra parte, la eficacia global es una función de la distribución de tamaños de las partículas y no se puede predecir a partir del tamaño medio^{4,7,9,10}.

Reduciendo el diámetro de salida del gas se incrementa la eficiencia de separación y la caída de presión. Cuando este es el caso, la longitud del ciclón se debe incrementar para compensar las fuerzas internas (la figura 2 muestra las dimensiones principales para el diseño del ciclón: ver anexos).

El ciclón es uno de los pocos dispositivos de separación que opera mejor a toda carga. A veces se utilizan dos ciclones idénticos en serie para obtener una separación más completa de los sólidos, pero la eficacia de la segunda unidad es menor que la de la primera debido a que la alimentación de la segunda unidad tiene un tamaño de partículas mucho menor.

2.1.2 Variables de diseño

El diámetro del ciclón se diseña teniendo en cuenta el caudal de entrada de la mezcla aire-sólido, el tamaño de las partículas, la viscosidad del aire y las densidades del aire y del sólido, principalmente^{4,7}.

La velocidad de entrada de la mezcla al ciclón debe estar en el rango de 6 a 45 m/s (20 a 150 ft/seg), entre más alta mejor, pero es limitada por la caída de presión. Por esta razón, los ciclones son usualmente diseñados para operar con una velocidad a la entrada de 15 m/s (50 ft/s), aunque este valor no debe seguirse estrictamente^{4,7,9,10,11}. Un concepto importante, en el diseño del ciclón, es el diámetro crítico de partícula, $(D_p)_{crit}$, el cual hace referencia al tamaño teórico de partículas de las cuales el ciclón separa el 50% de la mezcla. La ecuación para determinar el diámetro de partícula crítico es^{4,7,9,12}:

Ecuación 1. Diámetro crítico de partícula

$$(D_p)_{crit} = \left(\frac{9 * \mu * D_c}{4 * N_t * V * (s - g)} \right)^{0,5}$$

Esta ecuación contiene los efectos del tamaño del ciclón, velocidad viscosidad y densidad del sólido y del gas de arrastre. D_c corresponde al diámetro del ciclón (ft) y V es la entrada lineal la velocidad (ft/seg). La cantidad N_t es el número de giros hecho por el gas en el ciclón.

Ecuación 2. Cálculo del número de giros realizados por el sólido

en el ciclón en función de la velocidad lineal de entrada

$$N_t = (0,1079 - 0,00077 * V + 1,924 * 10^{-6} * V^2) * V$$

Donde:

N_t [=] adimensional; y V [=] ft/seg

La correlación indicada por la Ecuación 2¹² representa la forma analítica de determinar el número de giros realizados por el gas en el ciclón. La viscosidad del gas es μ y las cantidades s y g corresponden a las densidades del sólido y del gas respectivamente.

Se ha determinado que la operación normal del ciclón, sin reentrada de polvo, se logra para relaciones de velocidad de entrada a velocidad de saltación (V_s) igual o menor de 1,35. Del mismo modo, la máxima eficiencia de separación se alcanza para una relación de velocidad de entrada a velocidad de saltación igual o menor a 1,25^{9,11,12}.

Operación del ciclón
sin reentrada de polvo

$$V / V_s \quad 1,35$$

Máxima eficiencia
de separación del ciclón

$$V / V_s \quad 1,25$$

La velocidad de saltación se define como “la velocidad necesaria para levantar las partículas asentadas y transportarlas sin asentamientos”. La formula desarrollada para el cálculo de esta variable se muestra en la Ecuación 3:

Ecuación 3. Cálculo de la velocidad de saltación

$$V_s = 2,055 * W * \left[\left(\frac{B_c}{D_c} \right)^{0,4} \left[\frac{1}{1 - \frac{B_c}{D_c}} \right]^{1/3} \right] * D_c^{1/15} * V^{2/3}$$

Donde:

B_c : ancho de la entrada al ciclón, [=] ft

D_c : diámetro del ciclón, [=] ft

V : velocidad de entrada al ciclón, [=] ft/seg

W : se define con base en las propiedades del material y del fluido. Se calcula según la Ecuación 4.

Ecuación 4. Evaluación del termino W

$$W = \left[\frac{4 * g * \mu * (\rho_{cal} - \rho_{aire})}{3 * \rho_{aire}^2} \right]^{1/3}$$

Donde:

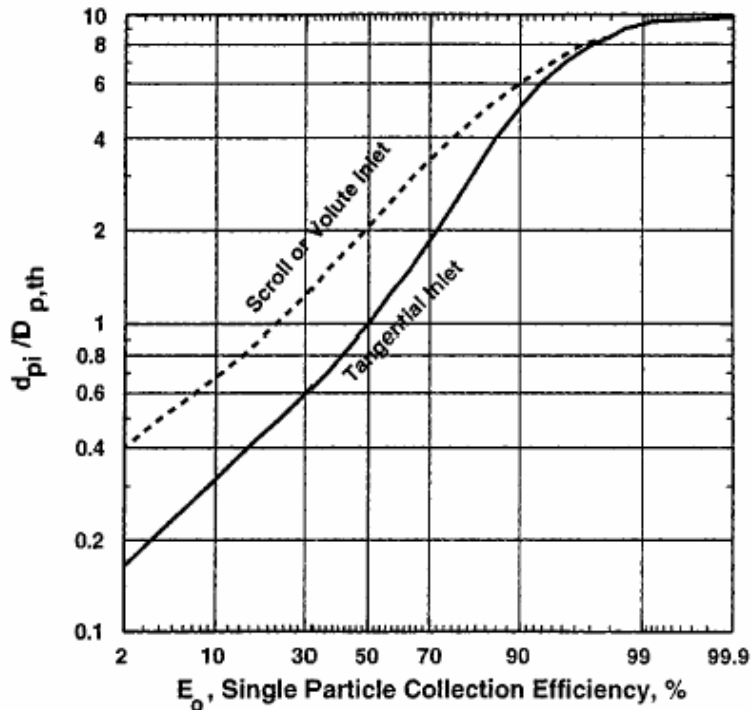
g : aceleración de la gravedad, [=] ft/seg²

μ : viscosidad del aire, [=] lb/ft*seg

ρ_{cal} : densidad de la cal, [=] lb/ft³

ρ_{aire} : densidad del aire, [=] lb/ft³

FIGURA 1. Curva de eficiencia de separación de partículas en un ciclón como función de sus diámetros relativos a el diámetro crítico⁴



El correspondiente porcentaje de remoción de los diferentes tamaños de partícula (D_p) se puede leer en la FIGURA 1⁴ como una correlación que muestra el porcentaje de separación (E_0) contra la relación $D_p / (D_p)_{crit}$.

En los ciclones de este tipo, de entrada tangencial, salida axial y sin paletas directrices, la caída de presión se puede calcular mediante el uso de la Ecuación 5^{9,10,12}. Sin embargo, existen muchas teorías respecto a la caída de presión a través de ciclones y su correcta medición se realiza de manera experimental.

Ecuación 5. Caída de presión a través del ciclón

$$P_C = n * \left[\frac{V}{66,8} \right]^2$$

Donde:

P_C : pérdida de presión a través del ciclón en pulgadas de agua

n : número de cabezas de velocidad de entrada (1 a 4)

V : [=] ft/seg

Se aprecia que la caída de presión es altamente dependiente de la velocidad, causando a veces excesivas pérdidas de presión con el consiguiente consumo de potencia y el arrastre del material, disminuyendo la eficiencia. Si se requieren caídas de presión muy bajas, implica tamaños de ciclón muy grandes y en caso contrario puede demandar alto consumo de potencia⁴. El valor de la caída de presión se diseña normalmente para un valor de 4 psi, aunque este valor puede variar con el diseño^{7, 9, 11, 12}. En los anexos se encuentra una breve descripción que indica como calcular las perdidas de presión en todo el sistema.

2.2 FILTROS DE MANGAS

Los filtros de este tipo son, como su nombre lo indica, mangas o talegas de tela en las que se descarga una corriente de aire contaminado para retirar de él los sólidos transportados. Se disponen de muchas formas, pero la más utilizada es en forma cilíndrica, dispuesta verticalmente con entrada de aire por la parte superior y descarga de polvo por la inferior, saliendo el aire radialmente a través de la tela. Estos filtros operan por cribado, es decir, forzando el paso del aire a través de orificios tal que no permitan el paso de partículas de diámetro mayor que el del agujero. Su acción se completa al retener partículas sobre la tela ya que se forma una capa del mismo material que se esta filtrando el cual disminuye el tamaño de los agujeros, induciendo el aumento de la presión estática dentro de las mangas al reducir el área de salida del aire y aumentando la eficiencia del filtro al disminuir la cantidad de polvo que puede pasar por el filtro al exterior⁴.

Las velocidades de filtración son generalmente muy bajas, del orden de 0,3 a 3,0 m/min, lo que produce áreas de filtro muy grandes. La velocidad del aire se afecta mucho por la frecuencia de limpieza del filtro. Si se dispone de un medio sacudidor permanente, para asegurar que la presión no pase de un valor pre-determinado, pueden trabajarse los filtros con velocidades entre 3 y 6 m/min, reduciendo considerablemente el área de la tela, para operación continua. Debe considerarse que en cada sacudida una parte del polvo acumulado en la tela cae al exterior de la manga¹¹.

2.2.1 Eficiencia de separación

La eficiencia de separación inherente a los filtros de tela suele ser tan alta que, para propósitos prácticos, el nivel preciso no es tema de mucha reocupación. Además, para la recolección de un polvo determinado, la eficiencia está determinada generalmente por la selección de la tela filtrante, la velocidad de filtración, el método y el ciclo de limpieza⁴.

Se han realizado pocos estudios básicos de la eficiencia de los filtros de mangas. Se ha observado que la penetración de polvo se incrementa inmediatamente después de una limpieza, mientras se restablece la cantidad de polvo. Sin embargo, los estudios de campo y laboratorio indican que durante el resto del ciclo de filtración la concentración del efluente de polvo tiende a permanecer constante, con independencia de la concentración de entrada^{4,11}.

2.2.2 Variables de diseño

En el diseño de los filtros de mangas deben considerarse, además de las velocidades, la temperatura, la resistencia física y química del material de construcción y la presión recomendada para cada material.

La caída de presión a través de la tela y la capa de polvo recolectada se puede determinar con la Ecuación 6; sin embargo, la mejor forma de determinar la presión es por medio de un tubo de vidrio de plástico en forma de U conectado en el interior de la manga, es decir, debe realizarse de forma experimental ya que las correlaciones existentes no son exactas⁴.

Ecuación 6. Cálculo de la caída de presión en un filtro de mangas

$$P_F = K_1 * V_F + K_2 * w * V_F$$

Donde:

P_F : caída de presión en el filtro de mangas, [=] pulgadas de agua

V_F : velocidad a través del filtro, [=] ft/min

w : carga de polvo sobre el filtro, [=] lb/ft²

K_1 y K_2 representan los coeficientes de resistencia para la tela “acondicionada” y la capa de polvo, respectivamente. [=] pulgadas de agua/(ft/min)

En la práctica, K_1 y K_2 se miden directamente en experimentos de filtración y son dependientes del tipo y las características del material.

La tela acondicionada es una tela en la que una carga relativamente consistente de polvo permanece depositada profundamente después de los ciclos de filtración y limpieza. Puede ser 10 veces mayor al valor del coeficiente de resistencia para la tela original limpia. El tamaño de la tela también es importante, siendo preferibles los diámetros pequeños. Se recomienda, en todo caso, no pasar de los 30 cm de diámetro^{4,11}. En la tabla 15 (ver anexos) se presentan las principales características operacionales según los materiales de construcción de los filtros de mangas.

Considerando los inconvenientes que presentan los coeficientes de resistencia para la tela “acondicionada” y la capa de polvo al momento de realizar cálculos teóricos, se ha desarrollado una expresión opcional en la que la viscosidad del gas está explícito en la ecuación de cálculo. La Ecuación 7⁴ muestra esta modificación y, además, se incorpora el tiempo como una variable de filtración, demostrando que la caída de presión debida a la acumulación de polvo varía con el cuadrado de la velocidad a través del filtro.

Ecuación 7. Cálculo modificado de la caída de presión en un filtro de mangas

$$P_t = K_d * \mu * c_d * V_F^2 * t$$

Donde:

P_F : caída de presión en el filtro de mangas, [=] pulgadas de agua

K_d : coeficiente de resistencia de la capa de polvo, [=] pulgadas de agua/(cP*(ft/min)*(gr/ft²))

μ : viscosidad del gas, [=] cP

c_d : concentración de polvo en el gas sucio, [=] g/ft³

V_F : velocidad a través del filtro, [=] ft/min

T: tiempo, [=] min

El valor de K_d se puede obtener de la figura 3 (ver anexos), en la que este valor se especifica según el diámetro d de las partículas a filtrar.

En las pequeñas unidades de estos filtros, la vibración de las bolsas se puede realizar manualmente, más por lo general, la vibración por medio de un motor se proporciona en las unidades grandes.

2.3 LIMPIADORES HÚMEDOS

Son colectores inerciales compactos capaces de separar partículas sólidas o líquidas, o ambas, de un chorro de gas. En ellos, la limpieza se da en dos etapas: Etapa de contacto, en la que las partículas son humedecidas o capturadas por gotas del líquido limpiante; y etapa de separación, en la cual se elimina la niebla por medios inerciales o por gravedad.

El tamaño del equipo y el costo inicial los hacen poco rentables, pero su alta eficiencia en unidades grandes de producción equilibra los costos. Requieren moderado mantenimiento y su indiferencia al contenido de humedad y temperatura del gas los hacen ideales para trabajar con gases calientes y húmedos. Existen diferentes equipos de este tipo, según su operación, entre los cuales se encuentran: limpiador por atomizado, centrífugo, de choque, de lecho flotante, dinámico, de chorro, de boquilla sumergida y limpiador venturi. En los anexos se encuentran brevemente expuestos cada uno de esos sistemas.

2.4 PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

Es el aparato de control de contaminación ambiental de más alta eficiencia ya que puede remover hasta un %99 de las partículas submicrónicas de un chorro de gas. Su alta eficiencia se debe a que la fuerza de colección se aplica directamente a las partículas a separar sin importar la velocidad del chorro de gas. El costo de instalación es mayor que en la mayoría de los mecanismos de separación de sólidos de gases pero los costos de operación son menores debido a los bajos requerimientos de potencia.

La principal característica del material a separar es su conductividad eléctrica. Debe oscilar entre la de un buen conductor y la de un buen aislante, sin llegar a extremos. Del mismo modo, la resistividad es de gran importancia, ya que si es muy alta puede cubrir y aislar el electrodo de colección. Esto puede causar una chispa de descarga que invierte la ionización lo cual acarrea una chispa de descarga con reentrada de polvo. Si son de baja resistividad pierden su carga en el electrodo de colección permitiendo también la reentrada de polvo.

Existen dos tipos de precipitadores electrostáticos según su arreglo, el de tipo placa y el de tipo tubo. En los anexos se encuentran brevemente resumidas sus principales características.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La “Fabrica de Cal y Carburos” cuenta con un molino de martillos de alta velocidad que tiene un sistema de cribado interno, comercialmente clasificado como cribas número 1, 2, 3 y 4 de 1, 2, 3 y 4 mm de diámetro de abertura de las mismas, respectivamente. La fábrica actualmente muele la cal sin el sistema de clasificación interno, salvo aquellos casos en que el cliente demande una cal extrafina en la cual se usan cribas número 2 o 3.

En el desarrollo experimental del presente trabajo se evaluaron dos propuestas, la primera consistió en el diseño de un sistema de separación de aire y la segunda la evaluación de un modelo de separación comercial. Los diseños se valoraron con base en la presente producción de la fábrica; es decir, cal molida sin sistemas de clasificación interna, considerando el actual rendimiento del molino y separando la cal del aire inmediatamente sale del molino.

1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

El diseño del ciclón para el proceso de separación de la cal del aire se realizó en dos etapas, primero se realizó un análisis granulométrico de la cal y el cálculo de la velocidad de entrada al ciclón; posteriormente, se determinó la cantidad de aire a transportar y la caída de presión del sistema de separación, condiciones esenciales para el diseño del ventilador.

1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CAL

El análisis de distribución de tamaño y el diámetro de partícula, de la cal molida, se determinó usando tamices normalizados de la serie de Tyler. Para esto, se pesaron 100 gramos de cal y se procedió a realizar el tamizado agitando los tamices durante 15 minutos. Finalmente, se calculó la cantidad de masa retenida y la fracción acumulativa en cada tamiz.

1.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA AL CICLÓN

La velocidad de entrada al ciclón (V) se calculó analíticamente como la suma de la velocidad de flotación (V_F) (Ecuación 8) y la velocidad horizontal (V_H) (Ecuación 9), considerando las características de la cal, de esta forma se obtuvo un valor numérico a partir del cual se consideró un rango de velocidades de trabajo de +/- 40 ft/seg.

Ecuación 8. Cálculo de la velocidad de flotación

$$V_F = 10,75 * (GS * D_p)^{0,5}$$

Ecuación 9. Cálculo de la velocidad horizontal

$$V_H = 9,71 * (C_{cal})^{0,5}$$

Ecuación 10. Cálculo de la velocidad de entrada al ciclón

$$V = V_F + V_H$$

Donde:

D_p : Diámetro medio de las partículas, [=] mm

C_{cal} : Densidad de la cal, [=] lb/ft³

V_F , V_H , V : Velocidades de transporte de la cal, [=] ft/seg

2 DISEÑO DEL CICLÓN

El diseño del ciclón se realizó a partir del diámetro de partícula crítico; es decir, el diámetro de partícula más pequeño encontrado en la cal molida.

Se simularon velocidades de entrada al ciclón, entre 20 y 105 ft/seg, y usando la Ecuación 1 y la Ecuación 2 se calculó el número de giros realizados por la cal y el diámetro del ciclón en función de la velocidad.

2.1 COMPROBACIÓN DEL DIÁMETRO DEL CICLÓN

Con el uso de la Ecuación 3 y la Ecuación 4, se determinó la velocidad de saltación (V_s) para cada velocidad de entrada asumida y se registraron los casos en que la relación V / V_s no fuera mayor de 1,35 y de 1,25, valores máximos permitidos para evitar reentrada de polvo y obtener una buena separación de polvo, respectivamente.

Los resultados obtenidos permitieron seleccionar un rango de velocidades de entrada al ciclón adecuados a la producción de la fábrica y, de este modo, seleccionar un diámetro del cuerpo del ciclón.

2.2 EFICIENCIA DE SEPARACIÓN

Con los datos obtenidos anteriormente se analizó y se asumió un diámetro de diseño del ciclón y con el se evaluó la eficiencia de separación como la suma de las separaciones parciales; es decir, la separación para cada diámetro de partícula, a partir de la relación $DP/(DP)_{Crit}$ y leyendo el valor respectivo de % de separación de la FIGURA 1 se determinó la cantidad de cal separada considerando una cantidad de 1000 Kg/h.

2.3 DIMENSIONES DEL CICLÓN

A partir del diámetro del ciclón y con las siguientes relaciones se estimaron las diferentes dimensiones del mismo (ver anexos: Dimensiones principales del ciclón):

- Altura del orificio de entrada (H_C)= $D_C / 6$
- Ancho del orificio de entrada (B_C)= $D_C / 6$
- Diámetro del ducto de salida del gas limpio (D_e)= $0,354 * D_C$
- Altura del cuerpo cilíndrico (L_C)= $1,25 * D_C$
- Penetración del ducto de salida del gas limpio (S_C)= $D_C / 8$
- Altura del cono (Z_C)= $D_C * 1,25$
- Diámetro del orificio de descarga de polvo (J_C)= $D_C / 8$

2.4 COMPROBACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL CICLÓN

Para determinar que el diámetro asumido fue el correcto, se evaluaron las siguientes restricciones para las diferentes relaciones dimensionales y condiciones de operación del ciclón (ver anexos: Restricciones dimensionales y operacionales del diseño de ciclones)⁹:

- Longitud natural del ciclón: $(H_C + S_C) < (L_C + Z_C)$
- Operación sin contra flujo: $H_C < (H_C + S_C)$
- Operación sin contracción brusca: $B_C < \frac{1}{2} * (D_C - D_e)$
- Operación normal de limpieza del gas: $(H_C + S_C) < L_C$
- Caída de presión normal: $P < 10$ pulgadas de agua

3 DISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS

El filtro de mangas se diseño considerando la Ecuación 7 y el % de separación de cal del aire logrado con los ciclones diseñados. Para esto, se diseño el filtro de mangas de modo que se entregue el aire más puro y mejorar las actuales condiciones de trabajo.

4 DISEÑO DEL VENTILADOR

El diseño del ventilador es necesario para asegurar las condiciones operacionales óptimas del ciclón diseñado. Para esto se estimó el caudal, la presión y la potencia consumida.

4.1 VOLUMEN DE AIRE A TRANSPORTAR

El volumen de aire a transportar se calculó como el producto de la velocidad de trabajo por el área de la tubería de descarga de la mezcla del molino al ciclón (Ecuación 11). Para esto, se consideró una tubería de 3 pulgadas de diámetro.

Ecuación 11. Cálculo del volumen de aire

$$Q = V * A$$

Donde

Q: Caudal de aire, [=] ft^3/seg

V: Velocidad de transporte neumático, [=] ft/seg

A: Área de la tubería de descarga del molino, [=] ft^2

4.2 CAÍDA DE PRESIÓN DEL SISTEMA

Los cálculos se realizaron inicialmente considerando el sistema aire, luego se aplicó un valor de corrección para determinar los valores aproximados para el sistema aire-cal.

Primero se determinó el factor de fricción a partir del número de Reynolds y con este valor se determinaron las pérdidas de presión para el sistema aire (Ecuación 12) como la suma las caídas de presión en tubería horizontal (Ecuación 13), vertical (Ecuación 14), por aceleración del material (Ecuación 15) y finalmente en el ciclón (Ecuación 5). Posterior a esto, se calculó la caída de presión para el sistema aire-cal (Ecuación 18) aplicando a la caída de presión del sistema aire un factor de corrección en función de la carga de cal y de la velocidad de operación (ver anexos: Caída de presión del sistema).

Ecuación 12. Caída de presión total para el sistema aire

$$P_{S \text{ (aire)}} = P_h + P_v + P_a + P_c + P_{cal}$$

Ecuación 13. Caída de presión en tubería horizontal

$$P_h = 0,269 * f * V^2 / D$$

Ecuación 14. Caída de presión en tubería vertical

$$P_v = 0,538 * f * V^2 / D$$

Ecuación 15. Caída de presión por aceleración del material

$$P_{cal} = 2,25 * R_c * P_v * N_a$$

Ecuación 16. Cálculo de la relación de carga

$$R_c = \frac{\text{peso de la cal}}{\text{peso del aire transportado}}$$

Ecuación 17. Cabeza de velocidad de transporte

$$P_v = (V/66,8)^2$$

Ecuación 18. Caída de presión para el sistema aire polvo

$$P_{S \text{ (aire-cal)}} = F * P_{S \text{ (aire)}}$$

Ecuación 19. Cálculo del factor adimensional de fricción de la mezcla cal-aire

$$F = 1 + R_c / K$$

Donde:

P_h : Caída de presión en pulgadas por 100 ft de tubería horizontal

P_v : es la caída de presión en pulgadas por 100 ft de tubería vertical

P_C : Perdida de presión a través del ciclón en pulgadas de agua

P_{cal} : Caída de presión por aceleración de la cal

$P_{S(aire)}$: Caída total de presión para el sistema aire, [=] pulgadas de agua

V : Velocidad de entrada al ciclón, [=] ft/seg

D : Diámetro de la tubería, [=] pulgadas

R_C : Relación de carga = peso de la cal / peso del aire transportado

P_v = Cabeza de velocidad de transporte

N_a = Número de aceleraciones que sufre el material durante el transporte, en nuestro caso se considerará igual a 1

K : constante adimensional dependiente de la velocidad⁹, $K=1,15$ para $V \leq 35$ ft/seg

F : factor adimensional de fricción de la mezcla cal-aire

4.3 POTENCIA DEL VENTILADOR

La potencia del ventilador se determinó en dos etapas, primero se calculó la potencia teórica, P_T , (Ecuación 20) y, posteriormente, se calculó la potencia real, P_R , (Ecuación 21) considerando un factor de potencia y la eficiencia mecánica del motor.

Ecuación 20. Cálculo
de la potencia teórica

$$P_T = P_{S(aire-cal)} * Q_{aire} * 1,57 * 10^{-3}$$

Ecuación 21. Cálculo
de la potencia real

$$P_R = P_T / (\eta_w * \text{Cos } \phi)$$

Donde:

$P_{S(aire-cal)}$: Caída de presión de la mezcla, [=] pulgadas de agua

P_T, P_R : Potencia del ventilador, [=] Hp

Q : volumen de aire [=] ft³/min

η_w : Eficiencia mecánica

$\text{Cos } \phi$: Factor de potencia

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados mostrados a continuación corresponden a la cal molida sin sistema de clasificación interna, ya que esta es la presentación en que principalmente se distribuye el producto. Además, la cal es separada del aire inmediatamente después de salir del molino.

1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Para diseñar un ciclón adecuado para la separación de la cal producida en la fábrica, primero se realizó un análisis granulométrico de la cal y se determinó la velocidad de entrada al ciclón.

1.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CAL

El análisis se inicio con una malla 25 y al finalizar el tiempo de agitación se encontró que el 50% de la cal acumulada no superó la malla 40. Esto como consecuencia de la humedad y el tamaño fino de la cal molida que hizo que se aglomerara formando agregados de tamaños considerables. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Teniendo en cuenta lo anterior, la cal se dejo secar en una mufla a 70°C durante 4 horas y se realizó de nuevo el tamizado obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 1. Análisis granulométrico por tamizado de la cal

Mallas	Abertura del tamiz (D _p mm)	Fracción másica retenida	Fracción acumulativa
25	0,707	0,174	0,826
30	0,595	0,102	0,724
35	0,500	0,134	0,590
40	0,420	0,327	0,264
45	0,354	0,019	0,245
50	0,297	0,089	0,156
	Fondo	0,156	0,156

Tabla 2. Análisis granulométrico por tamizado de la cal seca

Mallas	Abertura del tamiz (D_p mm)	Fracción másica retenida	Fracción acumulativa
35	0,500	0,008	0,992
40	0,420	0,002	0,990
45	0,354	0,011	0,979
50	0,297	0,021	0,958
60	0,246	0,028	0,930
70	0,21	0,048	0,882
80	0,177	0,040	0,842
100	0,149	0,060	0,782
120	0,125	0,064	0,718
140	0,105	0,071	0,647
170	0,088	0,128	0,519
200	0,074	0,199	0,320
230	0,063	0,317	0,003
270	0,053	0,003	0,000

De los resultados conseguidos se observa que la mayor cantidad de cal corresponde a diámetros de partículas entre 0,088 y 0,053 mm y que cal de diámetros mayores, hasta de 0,500 mm, se encuentra en menor proporción. Además, se observa que el 50% de las partículas colectadas se logra, aproximadamente, cuando la cal alcanza un diámetro de 0,088 mm, equivalente a un tamiz malla 170. Del mismo modo, se puede apreciar que la partícula de diámetro más pequeño encontrada corresponde a 0,053 mm, tamiz malla 270. Este valor correspondió, entonces, al diámetro de partícula crítico para el cual se diseñó el ciclón. (En los anexos se muestran las Gráficas 1 y 2, representaciones gráficas del análisis granulométrico, y de la distribución de tamaño en función de la fracción acumulada respectivamente).

1.2 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA AL CICLÓN

La velocidad de entrada es un parámetro de gran importancia para el diseño del ciclón ya que influye proporcionalmente en su eficiencia y, sobre todo, es el encargado de realizar el transporte neumático.

La velocidad de entrada se calculó como la suma de la velocidad de flotación (Ecuación 8) y la velocidad para el transporte horizontal de la cal (Ecuación 9)⁹.

Datos necesarios:

$$GS_{\text{Cal}} = 0,85$$

$$D_p = 0,088 \text{ mm}$$

$$\rho_{\text{Cal}} = 41,93 \text{ lb/ft}^3$$

- Cálculo de la velocidad de flotación

Este valor se determinó teniendo en cuenta la gravedad específica de la cal (valor reportado en Perry Robert H., 1999), la densidad de una muestra de cal molida determinada experimentalmente y el diámetro promedio de la cal calculado anteriormente.

$$V_F = 10,75 * (GS * D_p)^{0,5} = 10,75 * (0,85 * 0,09)^{0,5}$$
$$V_F = 2,94 \text{ ft/seg}$$

- Cálculo de la velocidad horizontal

La velocidad horizontal de transporte se determinó considerando la densidad de la cal molida.

$$V_H = 9,71 * (\rho_{\text{Cal}})^{0,5} = 9,71 * (41,93)^{0,5}$$
$$V_H = 62,86 \text{ ft/seg}$$

Finalmente, la velocidad de entrada al ciclón se calculó como la suma de las velocidades de flotación y de transporte horizontal de la cal.

$$V = V_F + V_H = 2,94 + 62,86$$
$$V = 65,80 \text{ ft/seg}$$

Para determinar el diámetro de ciclón más adecuado a la operación de la fábrica se optó por simular el diámetro del ciclón considerando un intervalo de cálculos de velocidades entre +/- 40 ft/seg.

2 DISEÑO DEL CICLÓN

A partir de los resultados anteriores; diámetro de partícula crítico y velocidades de entrada al ciclón, y usando la Ecuación 1 y la Ecuación 2, se calculó en función de la velocidad, primero, el número teórico de giros realizados por la cal en el ciclón y, posteriormente, se calculó el diámetro del ciclón.

Datos necesarios:

$$\rho_{\text{cal}} = 41,93 \text{ lb/ft}^3$$

$$(D_P)_{\text{crit}}^2 = 0,053 \text{ mm} = 173,88 * 10^{-6} \text{ ft}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 0,066 \text{ lb/ft}^3 \text{ (Valor tomado de Corredor Hernández y Vélez Laguado, 1995)}$$

$$\mu = 1,28 * 10^{-5} \text{ lb/ft} * \text{seg} \text{ (valor de la densidad del aire estándar a condiciones normales)}$$

Ecuación 1. Diámetro crítico de partícula

$$\frac{D_C}{N_t * V} = \frac{4 * (\rho_{\text{cal}} - \rho_{\text{aire}}) * (D_P)_{\text{crit}}^2}{9 * \mu}$$

Sustituyendo los valores respectivos obtenemos:

$$\frac{D_C}{N_t * V} = 13,75 * 10^{-2} \text{ seg}$$

Ahora, teniendo en cuenta el rango de velocidades considerados de entrada al ciclón, se calculó el número de giros dados por la cal (Ecuación 2) y se simularon los diámetros correspondientes para cada velocidad de diseño. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3 hallándose que al aumentar la velocidad de entrada al ciclón aumenta también el diámetro de diseño del mismo.

2.1 COMPROBACIÓN DEL DIÁMETRO DEL CICLÓN

Aplicando la Ecuación 3 y la Ecuación 4 se determinó el valor de la velocidad de saltación (V_s) para cada velocidad de diseño y se evaluó la relación V/V_s . Sustituyendo los respectivos valores en la Ecuación 4 se calcula el valor de W :

$$W = \left[\frac{4 * 32,20 * 1,285 * 10^{-5} * (41,93 - 0,066)}{3 * 0,066^2} \right]^{1/3} = 1,70$$

Considerando la relación $B_C/D_C = 0,25$ (anexo: Dimensiones principales del ciclón) se obtiene:

$$\left[\left(\frac{b}{D_C} \right)^{0,4} \left[\frac{1}{1 - \frac{b}{D_C}} \right]^{1/3} \right] = 0,63$$

Con los anteriores valores calculados es posible determinar la velocidad de saltación y evaluar la relación V/V_s , encontrándose reportados estos valores en la Tabla 3.

Tabla 3. Numero de vueltas dadas por la cal en el ciclón, diámetro del ciclón y valores de la V_s y de la relación V/V_s como funciones de la velocidad de entrada al ciclón

V (ft/seg)	N_t (adimensional)	Diámetro (ft)	V_s	V / V_s
20	1,86	5,13	19,27	1,04
25	2,25	7,72	22,98	1,09
30	2,60	10,71	26,52	1,13
35	2,92	14,04	29,93	1,17
40	3,21	17,64	33,22	1,20
45	3,47	21,49	36,41	1,24
50	3,71	25,52	39,51	1,27
55	3,92	29,69	42,53	1,29
60	4,12	33,98	45,47	1,32
65	4,29	38,34	48,35	1,34
70	4,44	42,75	51,17	1,37
75	4,57	47,17	53,93	1,39
80	4,69	51,59	56,64	1,41
85	4,79	56,00	59,30	1,43
90	4,88	60,36	61,91	1,45
95	4,95	64,69	64,48	1,47
100	5,01	68,96	67,01	1,49
105	5,06	73,18	69,50	1,51

En la Tabla 3 se muestran dos valores resaltados que corresponden a relaciones de V/V_s menores de 1,35 y de 1,25. El primer valor ($V/V_s = 1,35$) es el valor máximo permitido para evitar la reentrada de polvo en la senda del chorro; de esta forma se puede deducir que velocidades de entrada al ciclón mayores a 65 ft/seg afectarían el funcionamiento normal del ciclón. El segundo valor resaltado ($V/V_s = 1,25$) refleja la velocidad máxima de entrada al ciclón necesaria para alcanzar la eficiencia óptima de operación. Entonces, la velocidad máxima de entrada al ciclón necesaria para obtener la mayor eficiencia de separación es de 45 ft/seg. Por tanto, la velocidad de operación más adecuada para tratar la mezcla aire-cal de esta fábrica será menor o igual a 45 ft/seg.

Teniendo en cuenta la producción y capacidades de la fábrica, se tomó como diámetro de diseño del ciclón el valor promedio de los dos diámetros más pequeños; es decir, 6,43 ft, aproximadamente 2 metros.

2.2 EFICIENCIA DE SEPARACIÓN

La eficiencia de separación se estableció valorando la relación $D_p/(D_p)_{crit}$ (considerando $(D_p)_{crit} = 53 \mu m$), leyendo el respectivo valor de % de separación en la FIGURA 1 y con estos valores se calculó la cantidad de cal separada considerando una cantidad de 1000 Kg/h.

Para el ciclón diseñado se encontró que la cantidad teórica de cal separada es de 637,93 Kg y la cantidad que permanece en el aire es de 362,067 kg, lo cual resulta en una eficiencia del ciclón del %63,79. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4. Eficiencia de separación del ciclón diseñado

D_p (μm)	$D_p/(D_p)_{crit}$	% Separación	Cantidad promedio de cal (Kg)	Cal Separada (Kg)	Polvo de cal (Kg)
500	9,43	99,5	7,72	7,68	0,04
420	7,92	97,0	2,15	2,09	0,06
354	6,68	95,0	11,13	10,57	0,56
297	5,60	92,0	21,18	19,49	1,69
246	4,64	86,0	28,00	24,08	3,92
210	3,96	84,0	47,92	40,26	7,67
177	3,34	82,0	39,85	32,67	7,17
149	2,81	78,0	60,13	46,90	13,23
125	2,36	74,0	63,90	47,28	16,61
105	1,98	68,0	71,26	48,45	22,80
88	1,66	60,0	128,16	76,89	51,26
74	1,40	58,0	199,06	115,45	83,60
63	1,19	52,0	316,63	164,64	151,98
53	1,00	50,0	2,93	1,46	1,46
Total			1000	637,93	362,07

Teniendo en cuenta la poca eficiencia del ciclón anterior, se rediseñó y se calcularon las nuevas dimensiones para el sistema considerando, primero, la máxima eficiencia de operación ($V/V_s = 1,25$) y, segundo, las restricciones dimensionales y operacionales.

Tabla 5. Condiciones operacionales del ciclón rediseñado

V (ft/seg)	N_t	Diámetro (ft)	V_s	V/V_s
35	2,92	4,95	27,92	1,25

En la Tabla 5 se presentan las condiciones operacionales rediseñadas para el ciclón. Se puede observar que la velocidad se incrementó y el diámetro se disminuyó de tal forma que se alcanza la mayor relación V/V_s y se mejora la eficiencia de separación.

Tabla 6. Eficiencia de separación del ciclón rediseñado

D_p (μm)	$D_p/(D_p)_{crit}$	% Separación	Cantidad promedio de cal (Kg)	Cal Separada (Kg)	Polvo de cal (Kg)
500	19,39	-	7,72	7,72	-
420	16,29	-	2,15	2,15	-
354	13,73	-	11,13	11,13	-
297	11,52	-	21,18	21,18	-
246	9,54	99,8	28,00	27,94	0,06
210	8,14	98,5	47,92	47,20	0,72
177	6,86	96,0	39,85	38,25	1,59
149	5,78	91,0	60,13	54,72	5,41
125	4,85	88,0	63,90	56,23	7,67
105	4,07	86,0	71,26	61,28	9,98
88	3,41	82,0	128,16	105,09	23,07
74	2,87	80,0	199,05	159,24	39,81
63	2,44	77,0	316,62	243,80	72,82
53	2,05	73,0	2,93	2,14	0,79
Total			1000	838,08	161,92

Donde:

Cantidad promedio de cal= fracción másica acumulada (Tabla 2) * 1000 Kg/h de cal

Antes de evaluar la eficiencia de este nuevo ciclón, con la Ecuación 1 se evaluó el $(D_p)_{crit}$ para las condiciones operacionales: velocidad, número de giros dados por la cal y diámetro del ciclón. Se encontró que para el ciclón rediseñado:

$$(D_P)_{\text{Crit}} = 25,79 \mu\text{m}$$

En estas condiciones, se encontró que las partículas de diámetros entre 297 y 500 μm son separadas en su totalidad debido a su gran tamaño. Del mismo modo, se halló que la eficiencia de separación aumento hasta el %83,81, separando 838,08 Kg de cal y encontrando 161,92 Kg de cal mezclados con el aire (Tabla 6).

2.2.1 DISEÑO DE CICLÓN EN SERIE

Teniendo en cuenta que aun existen 161,92 Kg de polvo / 1000 Kg de cal, se calculó un nuevo ciclón que opere en serie con el anterior. Para esto, se diseñó a la misma velocidad de entrada (35 ft/seg) y considerando el mayor valor para que no haya reentrada de polvo ($V/V_s = 1,35$) y así obtener la mayor separación. En la Tabla 7 se muestran los valores operacionales del ciclón en serie.

Tabla 7. Condiciones operacionales del ciclón en serie

V (ft/seg)	N_t	Diámetro (ft)	V_s	V/V_s
35	2,92	1,64	25,94	1,35

De igual modo que en el caso anterior, para evaluar la eficiencia del ciclón primero, con la Ecuación 1, se calculó el $(D_P)_{\text{Crit}}$ para las condiciones operacionales, encontrándose que:

$$(D_P)_{\text{Crit}} = 14,84 \mu\text{m}$$

Conocido el $(D_P)_{\text{Crit}}$ para las condiciones actuales, se determinó la eficiencia de separación del ciclón. Al momento de estimar la eficiencia en este ciclón se consideró que la cantidad de cal por diámetro de partícula correspondía a la cantidad de cal que el ciclón anterior no logro separar del aire.

En el caso de este ciclón se encontró que la cal con diámetro de partículas entre 149 y 246 μm se separa totalmente debido a su tamaño. También es notorio que la eficiencia en esta unidad es mucho mayor, separándose 146,63 Kg de cal y restando 15,55 Kg de la misma en el aire, lo que brinda una separación aproximadamente del %91 y que en total suma para los dos ciclones una eficiencia global del %98,44 (ver Tabla 8).

Tabla 8. Eficiencia de separación del ciclón en serie

D_p (μm)	$D_p/(D_p)_{\text{crit}}$	% Separación	Cantidad promedio de cal (Kg)	Cal Separada (Kg)	Polvo de cal (Kg)
246	16,57	-	0,06	0,06	-
210	14,15	-	0,72	0,72	-
177	11,92	-	1,59	1,59	-
149	10,04	-	5,41	5,41	-
125	8,42	97,5	7,67	7,48	0,19
105	7,07	97,0	9,98	9,68	0,30
88	5,93	92,0	23,07	21,22	1,84
74	4,99	90,0	39,81	35,83	3,98
63	4,24	87,5	72,82	63,72	9,10
53	3,57	83,0	0,79	0,66	0,13
Total			161,92	146,36	15,55

2.3 DIMENSIONES DE LOS CICLONES

Definidos los diámetros de lo ciclones se estableció el valor de cada una de las dimensiones. Los respectivos valores se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones de los ciclones

Dimensión	Ciclón 1 (m)	Ciclón 2 (m)
Diámetro del ciclón	1,50	0,50
Ancho del orificio de entrada	0,25	0,08
Altura del orificio de entrada	0,25	0,08
Diámetro del ducto de salida del gas limpio	0,53	0,18
Penetración del ducto de salida del gas limpio	0,19	0,06
Altura del cuerpo cilíndrico	1,87	0,62
Altura del cono	1,87	0,62
Diámetro del orificio de descarga de polvo	0,19	0,06
Altura total del ciclón	3,74	1,24

2.4 COMPROBACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL CICLÓN

Determinadas las eficiencias y dimensiones de los ciclones, se comprobó si satisfacían las restricciones dimensionales y operacionales^{9,13}. En la tabla 10 se reportan los valores obtenidos.

Tabla 10. Valores de las restricciones dimensionales y operacionales de los ciclones

Tipo de restricción	Relación de cálculo	Ciclón 1	Ciclón 2
		Valor obtenido	Valor obtenido
Longitud natural del ciclón	$(H_C + S_C) (L_C + Z_C)$	0,44 < 3,74	0,14 < 1,24
Operación sin contraflujo	$H_C < (H_C + S_C)$	0,25 < 0,44	0,08 < 0,14
Operación sin contracción brusca	$B_C < \frac{1}{2} * (D_C - D_e)$	0,25 < 0,48	0,08 < 0,16
Operación normal de limpieza del gas	$(H_C + S_C) < L_C$	0,44 < 1,87	0,14 < 0,62
Caída de presión normal	P 10 pulgadas de agua	0,34 < 10 pulgadas de agua	0,34 < 10 pulgadas de agua

3 DISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS

Considerando que los ciclones diseñados no separan el %1,56 de la cal total, se diseñó un filtro de mangas mediante el uso de la Ecuación 7. Para esto, se tomaron los siguientes valores según recomendaciones dadas por Perry Robert H., Green Don y Maloney James O. 1999:

- Número de filtros de mangas: 2
- Diámetro de los filtros: 20 cm
- Altura de los filtros: 4 m
- Área superficial total de los filtros (A_F): $5 \text{ m}^2 = 53,82 \text{ ft}^2$
- Volumen total de los filtros (V_F): $0,25 \text{ m}^3 = 8,84 \text{ ft}^3$

De la figura 3 (anexos) y estimando una fracción de vacío de 0,4 se obtiene que $K_d = 0,07 \text{ pulgadas de agua} / (\text{cP} * (\text{ft}/\text{min}) * (\text{gr}/\text{ft}^2))$
 $\mu = 0,0185 \text{ cP}$

Cálculo de la concentración de polvo en el gas sucio:

$$1000 \text{ kg/h de cal molida} * \%1,56 = 15,56 \text{ kg/h} = 260 \text{ g/min}$$

$$c_d = 260 / 8,84 \text{ g/ft}^3 = 30 \text{ g/ft}^3$$

Cálculo de la velocidad a través del filtro

$$V_F = V * A \text{ tubería (3')} / A_F = 35 * 0,049 * 60 / 53,82 = 1,91 \text{ ft/min}$$

Sustituyendo los respectivos valores en la ecuación 7 para una operación de 60 minutos se obtiene:

$$P_F = K_d * \mu * c_d * V_F^2 * t = 0,07 * 0,0185 * 30 * 1,92^2 * t$$

$$P_F = 8,6 \text{ pulgadas de agua}$$

Del resultado obtenido se concluye que no es necesario implementar un sistema de agitación mecánico para el filtro, según lo reportan Perry Robert H., Green Don y Maloney James para unidades pequeñas.

4 DISEÑO DEL VENTILADOR

El diseño del ventilador es importante al momento de seleccionar el adecuado. Los principales parámetros de diseño del ventilador son caudal, presión y potencia necesaria.

4.1 VOLUMEN DE AIRE A TRANSPORTAR

El molino opera con tuberías de descarga de 3 pulgadas de diámetro; por tanto, el cálculo del volumen de aire (Ecuación 11) se realizó teniendo en cuenta este valor y la velocidad de transporte neumático antes hallada:

$$Q = V * A$$

Sustituyendo los respectivos valores se obtiene que para condiciones normales de presión y temperatura el caudal de aire a transportar es:

$$Q = 103 \text{ ft}^3/\text{min}$$

4.2 CAÍDA DE PRESIÓN DEL SISTEMA

Los cálculos se realizaron inicialmente considerando el sistema aire, finalmente se aplico un valor de corrección para obtener un valor aproximado al sistema aire-cal.

Se determinó el valor del Reynolds para el aire a las condiciones de operación y, con este valor, se estimó el valor del factor de fricción. Los resultados se muestran a continuación:

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re = D_T * V * \rho_{\text{aire}} / \mu_{\text{aire}}$$

Diámetro de la tubería (D_T)= 3 pulgadas

Ahora, sustituyendo los respectivos valores en las unidades adecuadas se obtiene:

$$Re = 44941,18$$

Valor que corresponde a flujo turbulento. Considerando tubería hidráulicamente lisa tenemos un valor de factor de fricción igual a:

$$f = 5,43 \cdot 10^{-3}$$

Con el valor del factor de fricción determinado y sustituyendo los valores respectivos en las unidades adecuadas se calcularon las pérdidas de presión en cada uno de los sectores del sistema: tubería horizontal, vertical, ciclón y aceleración del material; los resultados obtenidos se muestran a en la Tabla 11. Con estos valores determinados se evaluó la caída total de presión para el sistema aire.

Tabla 11. Caídas de presión del aire en cada uno de los sectores del sistema de separación de polvo

Sector del sistema	Ecuación de cálculo	Caída de presión (pulgadas de agua)
Tubería horizontal (16,4 ft de longitud)	$P_h (100 \text{ ft}) = 0,269 \cdot f \cdot V^2 / D$	0,1
Tubería vertical (24,4 ft de longitud)	$P_v (100 \text{ ft}) = 0,538 \cdot f \cdot V^2 / D$	0,3
Ciclones	$P_C = 2 \cdot [3 \cdot (V/66,8)^2]$	1,7
Aceleración del material ^a	$P_{cal} = 2,25 \cdot R_C \cdot P_V \cdot N_a$	1,3
Filtro de mangas	$P_F = K_d \cdot \mu \cdot C_d \cdot V_F^2 \cdot t$	8,6

Sector de tubería horizontal (Ver anexos Figura 4)

- 16,4 ft de tubería

Sector de tubería vertical (Ver anexos Figura 4)

- 24,4 ft de tubería

En el cálculo del sector denominado aceleración del material se considera que:

- Peso de la cal=1000 Kg/h = 36,75 lb/min
- Peso del aire transportado= $Q \cdot \rho_{\text{aire}} = 6,80 \text{ lb/min}$
- $P_V = 0,11$
- $N_a = 1$

$$R_C = \frac{\text{peso de la cal}}{\text{peso del aire transportado}} = 5,40$$

Con los anteriores resultados se encontró que la caída de presión total para el sistema aire es:

$$P_{S(\text{aire})} = 12 \text{ pulgadas de agua}$$

La caída de presión de la mezcla aire cal se determinó como el producto del factor de fricción de la mezcla y la caída de presión total para el aire.

$$F = 1 + R_C / 1,15 = 5,70$$

$$P_{S(\text{aire-cal})} = F * P_{S(\text{aire})} = 5,70 * 12$$

$$P_{S(\text{aire-cal})} = 68,4 \text{ pulgadas de agua}$$

4.3 POTENCIA NECESARIA

Para fijar la potencia es necesario establecer primero la potencia teórica y luego aplicar un factor de corrección para determinar la potencia real.

Aplicando la Ecuación 20 se obtiene la potencia teórica y con la Ecuación 21 y considerando un factor de potencia $W = 0,85$ y la eficiencia mecánica del motor $\text{Cos} = 0,85$ se obtiene la potencia real:

Ecuación 20. Cálculo de la potencia teórica

$$P_T = P_{S(\text{aire-cal})} * Q_{\text{aire}} * 1,57 * 10^{-3} = 68,4 * 103 * 1,57 * 10^{-3}$$

$$P_T = 11 \text{ Hp}$$

Ecuación 21. Cálculo de la potencia real

$$P_R = P_T / (W * \text{Cos}) = 11 / (0,85 * 0,85)$$

$$P_R = 15 \text{ Hp}$$

El factor de potencia y la eficiencia mecánica del motor son valores de corrección que se aplican para la determinación de la potencia real.

El diseño del ventilador indica que se requiere de un ventilador de 15 Hp de potencia.

5 DISEÑO COMERCIAL DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN CAL-AIRE

Comercialmente se ofrece un sistema recolector de polvo de cal probado en fábrica con carga real y garantiza la emisión de aire limpio al ambiente. Los filtros de mangas son construidos en tela de algodón con sistema de limpieza manual. Las características de diseño del sistema de separación se muestran a continuación:

- **Diseño del ciclón**
 - Diámetro: 1 m
 - Altura del cuerpo cilíndrico: 1,2 m
 - Altura del cono: 1,2 m
 - Altura total: 2,4 m
- **Diseño de los filtros de mangas**
 - Número de filtros de mangas: 12
 - Diámetro de los filtros: 20 cm
 - Altura de los filtros: 4 m
- **Potencia del ventilador: 15 Hp**

6 CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS: TEÓRICO Vs COMERCIAL

En la tabla 12 se encuentran resumidas las principales características de los dos diseños; además, se incluye el costo de fabricación.

Tabla 12. Características del diseño teórico Vs comercial

DISEÑO TEÓRICO	DISEÑO COMERCIAL
Número (y diámetro) de los ciclones	
2 (1,5 m y 0,5 m)	1 (1,0 m)
Material de fabricación de los ciclones	
Lámina <i>Cold Rolled</i> Calibre 14	Lámina <i>Cold Rolled</i> Calibre 14
Número (y diámetro) de filtros de mangas	
2 (20 cm)	16 (20 cm)
Material de fabricación de los filtros de mangas	
Tela de algodón	Tela de algodón
Potencia del ventilador	
15 Hp	15 Hp
Costo de fabricación (pesos \$)	
18'000.000	12'000.000

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- El diseño del sistema de separación cal-aire realizado resulta teóricamente práctico. Sin embargo, debe considerarse que las correlaciones usadas son empíricas y que no se encuentran ajustadas al sistema en cuestión.
- Este sistema opera con dos ciclones en serie y finalmente descargan en dos filtros de mangas de 4 metros de altura y 20 cm de diámetro. El sistema de ciclones operando en serie puede verse comprometido debido a la alta humedad de la cal y el diámetro relativamente pequeño del ciclón en serie, por ende debería realizarse un mantenimiento constante en el mismo para evitar obstrucciones. El número de mangas se determinó teniendo en cuenta la cantidad de aire a transportar. Además, se encontró que no necesitan sistema de limpieza continua debido a que los ciclones separan en gran proporción la cal.
- El diseño ofrecido comercialmente presenta la garantía de ser probado en planta, garantizando la correcta limpieza del aire. Desafortunadamente, requiere un mantenimiento constante y reparación continua de los filtros de mangas. Esto se justifica a partir del hecho de que en este sistema los filtros juegan un papel más determinante considerando que el ciclón no realiza una separación tan efectiva debido a las limitantes de diseño (número de ciclones, diámetro del ciclón, velocidad máxima permitida para evitar re-ingreso de polvo).
- La eficiencia de separación del filtro de mangas no se calcula de forma teórica debido a su alta efectividad. Por otra parte, el diseño de este sistema es escueto debido a que la determinación de los valores de operación se hace de forma experimental. Sin embargo, se aplicó una ecuación generalizada para diferentes partículas y diferentes materiales de diseño para el cálculo de la caída de presión y la frecuencia de la limpieza de las mangas⁴.
- Como material de diseño para el filtro de mangas se recomienda el uso de algodón, debido a su buena resistencia a la tensión, gran resistencia a la abrasión, excelente resistencia a los álcalis y su valor económico relativamente bajo.

CONCLUSIONES

- ✓ Se diseñó, para la “Fabrica de Cal y Carburos del Norte”, un sistema de limpieza del aire que consta de dos ciclones operando en serie de 4,95 ft (1,50 m) y 1,64 ft (0,50 m) de diámetro, respectivamente. La velocidad de operación de diseño fue de 35 ft/seg (11 m/seg) para alcanzar eficiencias de separación de %83,81 y %91,00 para los ciclones en serie, lo cual brinda una eficiencia global de operación del %98,44.
- ✓ Se diseñó un sistema de separación de dos filtros de mangas de 20 cm de diámetro y 4 m de altura con el cual se espera entregar un aire más limpio y mejorar las condiciones laborales de los empleados.
- ✓ Se determinaron las principales variables de diseño del ventilador. Estas son: volumen de aire de 103 ft³/min, caída de presión de la mezcla aire-cal en el sistema de 68,4 pulgadas de agua y finalmente una potencia de 15 Hp.

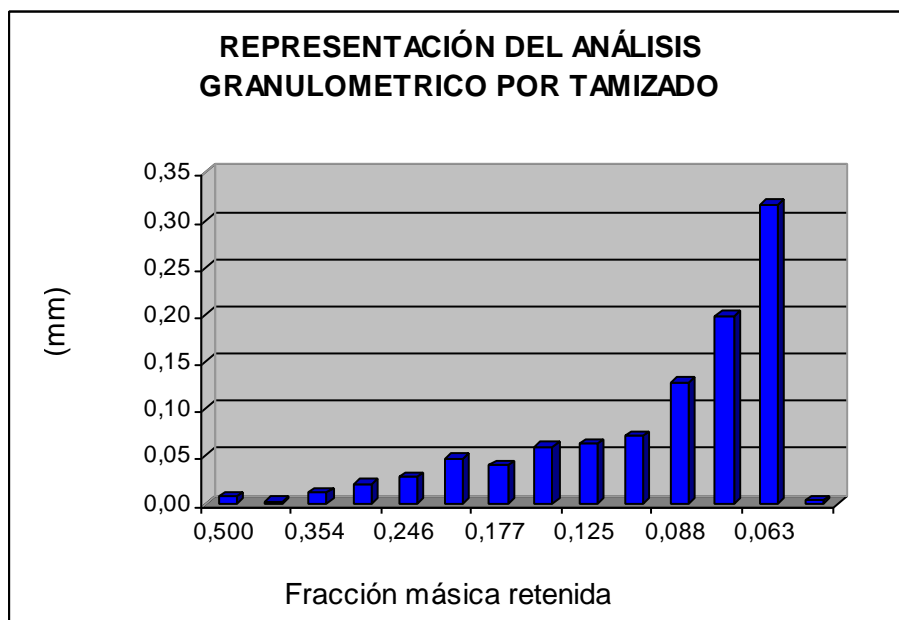
RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda implementar en la “Fabrica de Cal y Carburos del Norte” el sistema de separación cal-aire diseñado en este trabajo de grado y del mismo modo realizar un mantenimiento diario (limpieza) al sistema de separación, debido a que la humedad de la cal molida puede hacer que se obstruyan los ductos de transporte, los ciclones y que la cal se adhiera a la superficie del filtro e incrementar la presión disminuyendo su eficiencia.

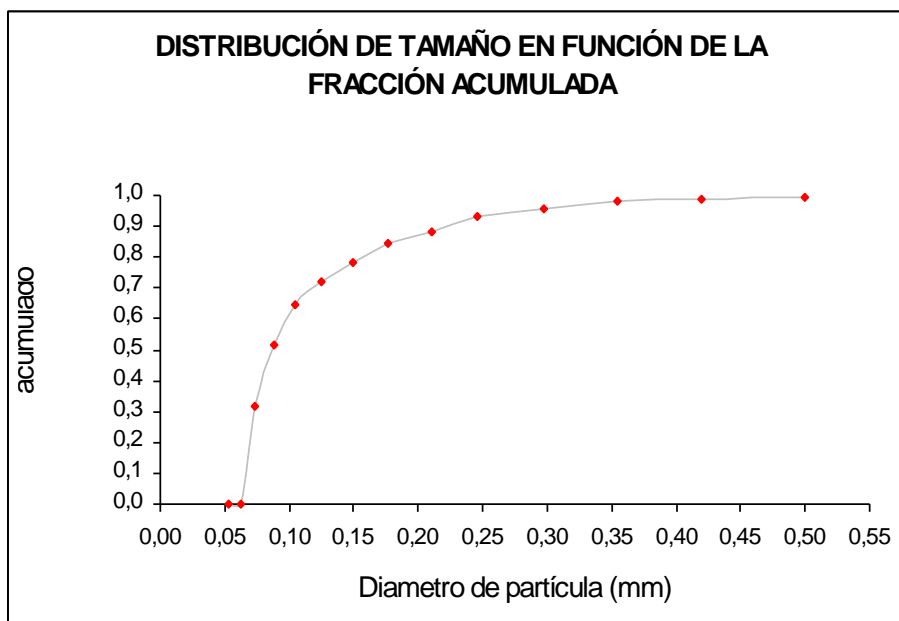
ANEXOS

1. GRÁFICAS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA CAL

GRÁFICA 1

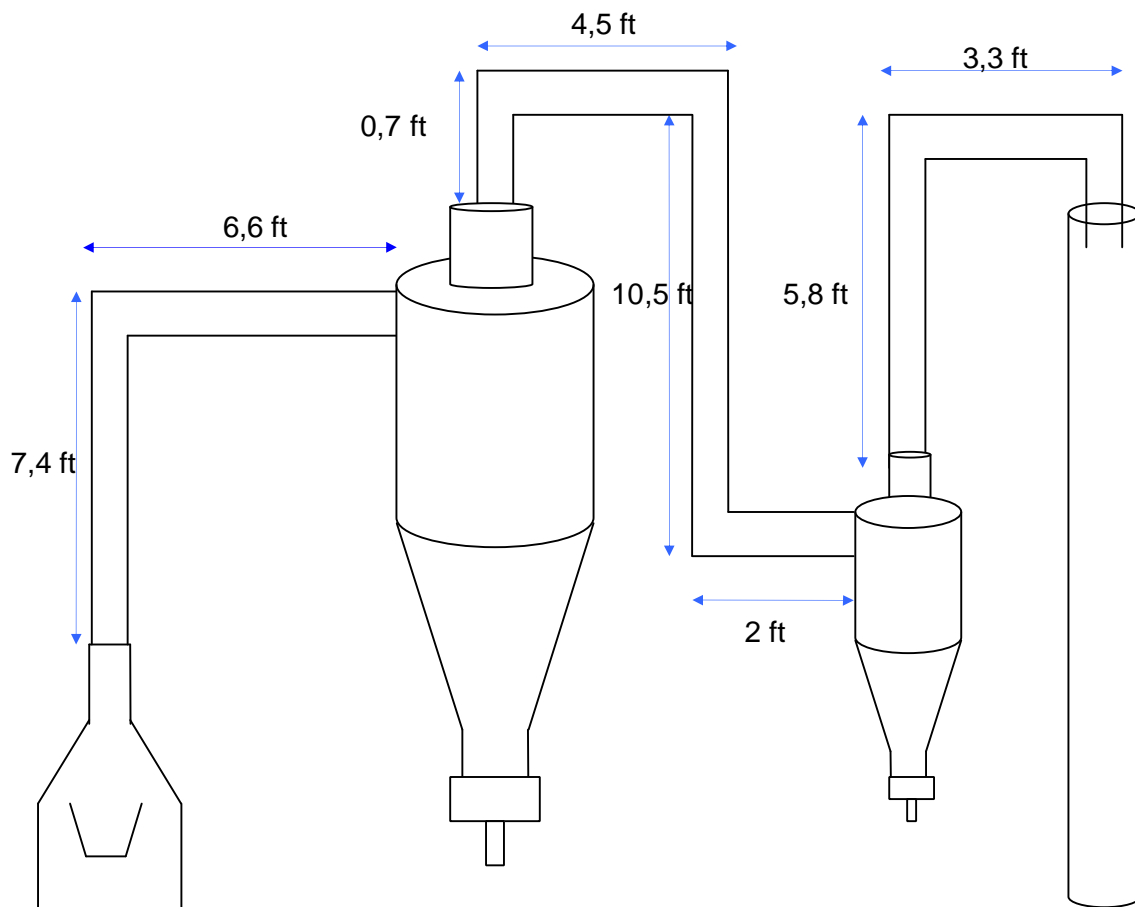


GRÁFICA 2



2. ESQUEMA DEL DISEÑO REALIZADO DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN AIRE-CAL

FIGURA 4.



3. MOLIENDA

La molienda se realiza en molinos y consiste en la reducción de tamaño del material hasta polvo. Existen diferentes tipos de molinos y su selección depende del tipo de material y del tamaño de partícula que se desea obtener.

La molienda de la cal se realiza generalmente con molinos de martillos. Todos estos molinos contienen un rotor que gira a alta velocidad en el interior de una carcasa cilíndrica. Las partículas se rompen por una serie de martillos giratorios acoplados a un disco rotor. Una partícula que entra en la zona de molienda no puede salir sin ser golpeada por los martillos. Se rompe en pedazos, se proyecta contra la placa estacionaria situada dentro de la carcasa rompiéndose todavía en fragmentos más pequeños. Estas a su vez son pulverizadas por los martillos y son impulsadas a través de una rejilla o tamiz que cubre la abertura de descarga. Con frecuencia se montan sobre el mismo eje varios discos rotores y con cuatro a ocho martillos. Los martillos pueden ser barras rectas de metal con los extremos planos o alargados, o bien afilados para formar un borde cortante⁴.

Los molinos de martillos con reducción de tamaño intermedio dan lugar a un producto con un tamaño de partículas de 1 pulg (25 mm) a 20 mallas. En molinos de martillos para una molienda fina la velocidad periférica de los extremos de los martillos puede llegar a ser de 22 000 pies/min (112 m/s), y tratan de 0,1 a 15 toneladas/h hasta tamaños más finos que 200 mallas. Los molinos de martillos pueden tratar casi cualquier producto: sólidos fibrosos como cortezas o cuero, virutas de acero, pastas blandas y húmedas, arcilla plástica o una roca dura. Para obtener una molienda fina están limitados a los materiales más blandos. Tanto la capacidad como el consumo de energía de un molino de martillos varían mucho con la naturaleza de la alimentación y no se pueden estimar con confianza a partir de consideraciones teóricas, sino que es preferible obtener estos valores a partir de ensayos a pequeña o gran escala realizados en el molino con una muestra real del material a tratar⁶.

Molinos de martillos de alta velocidad provistos de mecanismos de clasificación, interna o externa, que muelen el material hasta un producto más fino y mediante

ventiladores acoplados para impulsar aire a través del molino hasta el conducto de salida también son usados en el procesamiento de la cal. En la cámara de molienda las partículas del sólido se mueven con una elevada velocidad rotacional y concentran las partículas gruesas a lo largo de la pared de la cámara debido a la fuerza centrífuga que actúa sobre ellas. La corriente de aire transporta las partículas más finas desde el interior de la cámara de molienda hacia el eje mientras que las aspas del separador tienden a arrojar las partículas hacia fuera.

El que una determinada partícula pase o no entre las aspas del separador y llegue hasta el punto de descarga depende de cuál sea la fuerza que predomine: la fuerza de rozamiento ejercida por el aire o la fuerza centrífuga ejercida por las aspas. Las partículas aceptablemente finas pasan a través del separador mientras que las partículas demasiado grandes son devueltas hacia atrás para su posterior reducción en la cámara de molienda. El tamaño máximo de las partículas se puede variar modificando la velocidad del rotor o el tamaño y número de las aspas del separador⁵. Los molinos de este tipo reducen de 1 a 2 toneladas/h hasta un tamaño medio de partículas de 1 a 20 μm , con un consumo de energía de aproximadamente 50 CV-h/ton (40 kWh/ton)⁶.

4. PROPORCIONES TÍPICAS DE DISEÑO DEL SEPARADOR DE CICLÓN

Muchos autores recomiendan una longitud de la zona del vértice principal (L_c) mínima de 5,5 veces el diámetro del tubo de salida y una longitud total del ciclón de 8 veces el diámetro del ducto de salida. Aumentando la longitud sin variar ninguna otra dimensión se logra un mejoramiento de la eficiencia con poca variación en la pérdida de presión. Incrementando la relación del diámetro del ciclón al diámetro del ducto de salida se incrementa la eficiencia para un valor aproximado de 3 y para valores superiores se logra menor ganancia de la eficiencia. También existe un incremento de la caída de presión encontrándose un valor óptimo de dicha relación entre 2 y 3⁹.

Las proporciones de diseño de ciclones no son de estricto cumplimiento, pueden variar de un autor a otro según las especificaciones de cada caso (ver Tabla 13). De

tal modo que, para comprobar que las dimensiones para las que se diseña un ciclón sean efectivas se deben evaluar ciertas restricciones dimensionales y operacionales del diseño de ciclones

En la figura 3 se muestran las proporciones típicas de diseño del ciclón sugeridas por Perry Robert H., Green Don and Maloney James.

Tabla 13. Proporciones de diseño según algunos autores

Dimensión	Perry Robert H, at el. 1999.	Borda Pulido, 1998 Corredor H. y Vélez L., 1995
B_C	$D_C / 4$	$D_C / 6$
H_C	$D_C / 2$	$D_C / 6$
D_e	$D_C / 2$	$0,354 * D_C$
S_C	$D_C / 8$	$D_C / 8$
L_C	$2 * D_C$	$1,25 * D_C$
Z_C	$2 * D_C$	$D_C * 1,25$
J_C	$D_C / 4$	$D_C / 8$

5. RESTRICCIONES DIMENSIONALES Y OPERACIONALES DEL DISEÑO DE CICLONES

Koch W. and Licht W. proponen ciertas restricciones para las diferentes relaciones dimensionales del ciclón y condiciones de operación⁹:

- Longitud natural del ciclón: $(H_C + S_C) + s \quad (L_C + Z_C)$
- Operación sin contra flujo: $H_C < (H_C + S_C)$
- Operación sin contracción brusca: $B_C < \frac{1}{2} * (D_C - D_e)$
- Operación normal de limpieza del gas: $(H_C + S_C) < L_C$
- Caída de presión normal: $P \quad 10$ pulgadas de agua

Donde:

$$P \text{ ([=] pulgadas de agua)} = 3 * (V / 4008)^2$$

V : velocidad de entrada al ciclón, [=] ft/min

H_C: Altura del orificio de entrada del ciclón

S_C: Penetración del ducto de salida del gas limpio

L_C: Altura del cuerpo cilíndrico

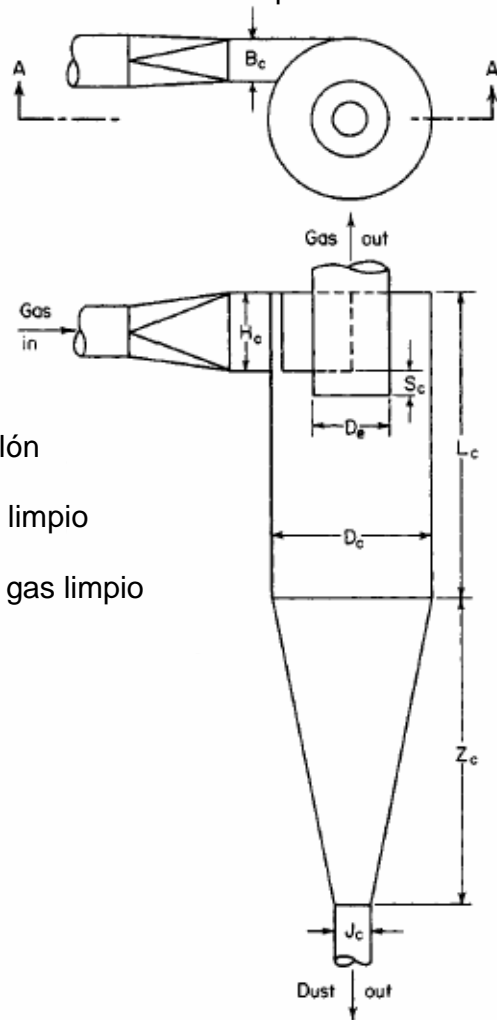
Z_C: Altura del cono

B_C: Ancho del orificio de entrada

D_C: Diámetro del ciclón

D_e: Diámetro del tubo de salida del gas limpio

FIGURA 3. Proporciones típicas de diseño del separador de ciclón



B_C: Ancho del orificio de entrada

H_C: Altura del orificio de entrada del ciclón

D_e: Diámetro del tubo de salida del gas limpio

S_C: Penetración del ducto de salida del gas limpio

L_C: Altura del cuerpo cilíndrico

D_C: Diámetro del ciclón

Z_C: Altura del cono

J_C: Orificio de salida

V : Velocidad de entrada al ciclón

6. CAÍDA DE PRESIÓN DEL SISTEMA

La caída total de presión del sistema de separación de polvo se calcula primero para el sistema aire como la suma de las caídas de presión en los diferentes tramos, estos son: tubería horizontal, tubería vertical, ciclón y por aceleración del material. Para determinarla es necesario conocer la velocidad de operación, el factor de fricción del fluido y las longitudes de las tuberías, principalmente. A continuación, se aproxima la caída de presión para el sistema aire-cal multiplicando la caída de presión del aire por un factor que depende de la relación de carga de material a aire y de una constante proporcional que depende de la velocidad de operación.

La velocidad de operación, en este momento, se debe conocer y con ella se calcula primero el número de Reynolds y posteriormente el factor de fricción.

En un diagrama de factores de fricción en tubos contra número de Reynolds, se lee el valor calculado analíticamente del número de Reynolds para el aire y se intercepta con las líneas del diagrama, ubicándolo en flujo laminar o turbulento según el caso, y se evalúa el valor del factor de fricción. Entonces, es necesario calcular el número de Reynolds.

Cálculo del número de Reynolds:

$$Re = D_T * V * \rho_{\text{aire}} / \mu_{\text{aire}}$$

Donde:

D_T : Diámetro de la tubería

V : Velocidad del aire

ρ_{aire} : Densidad del aire

μ_{aire} Viscosidad del aire

El número de Reynolds es adimensional, por lo que las unidades de las variables deben ser consistentes.

Una vez calculado el factor de fricción es posible evaluar las pérdidas de presión en tuberías y accesorios.

- Para tubería horizontal:

$$P_h = 0,269 * f * V^2 / D$$

Donde:

P_h es la caída de presión en pulgadas por 100 ft de tubería horizontal

V [=] ft / seg

D [=] pulgadas

- Para tubería vertical se considera el doble de la caída de presión para tubería horizontal:

$$P_v = 2 * P_h = 0,538 * f * V^2 / D$$

Donde:

P_v es la caída de presión en pulgadas por 100 ft de tubería vertical

- La caída de presión a través del ciclón se evaluó con base en la velocidad de entrada y tomando 3 cabezas de velocidad para el diseño (Ecuación 5):

$$P_C = 3 * \left[\frac{V}{66,8} \right]^2$$

Donde

P_C : Perdida de presión a través del ciclón en pulgadas de agua

V [=] ft / seg

- Perdidas por aceleración del material

$$P_{cal} = 2,25 * R_C * P_V * N_a$$

Donde

P_{cal} : Caída de presión por aceleración de la cal, en cabezas de velocidad de entrada

R_C : Relación de carga = peso de la cal / peso del aire transportado

P_V = Cabeza de velocidad de transporte

N_a = Número de aceleraciones que sufre el material durante el transporte

$$R_C = \frac{\text{peso de la cal}}{\text{peso del aire transportado}}$$

$$P_v = (V/66,8)^2$$

- Caída de presión total para el sistema aire:

$$P_{S \text{ (aire)}} = P_h + P_v + P_a + P_c + P_{cal}$$

Donde

$P_{S \text{ (aire)}}$ es la caída total de presión para el sistema aire

- Caída de presión para el sistema aire polvo:

$$P_{S \text{ (aire-cal)}} = F * P_{S \text{ (aire)}}$$

Donde

$P_{S \text{ (aire-cal)}}$: caída de presión para la mezcla aire-cal

K: constante adimensional dependiente de la velocidad⁹, K=1,15 para V 35 ft/seg

F: factor adimensional de fricción de la mezcla cal-aire

$$F = \frac{R_c}{K} + 1$$

7. FILTROS DE MANGAS

Pocas veces se dispone de datos suficientes para permitir los cálculos de diseño de estos filtros. El intervalo de valores de K_d que se puede encontrar en la práctica se muestra en la figura 4, en la que las determinaciones experimentales disponibles de k_d , informadas en la literatura para una variedad de polvos, se grafican contra el diámetro de la partícula. En la mayor parte de los casos no se informan los datos precisos del diámetro de partícula y las curvas representan el intervalo estimado del diámetro de partícula incluido⁴.

FIGURA 4

Factores de resistencia para capas de polvo

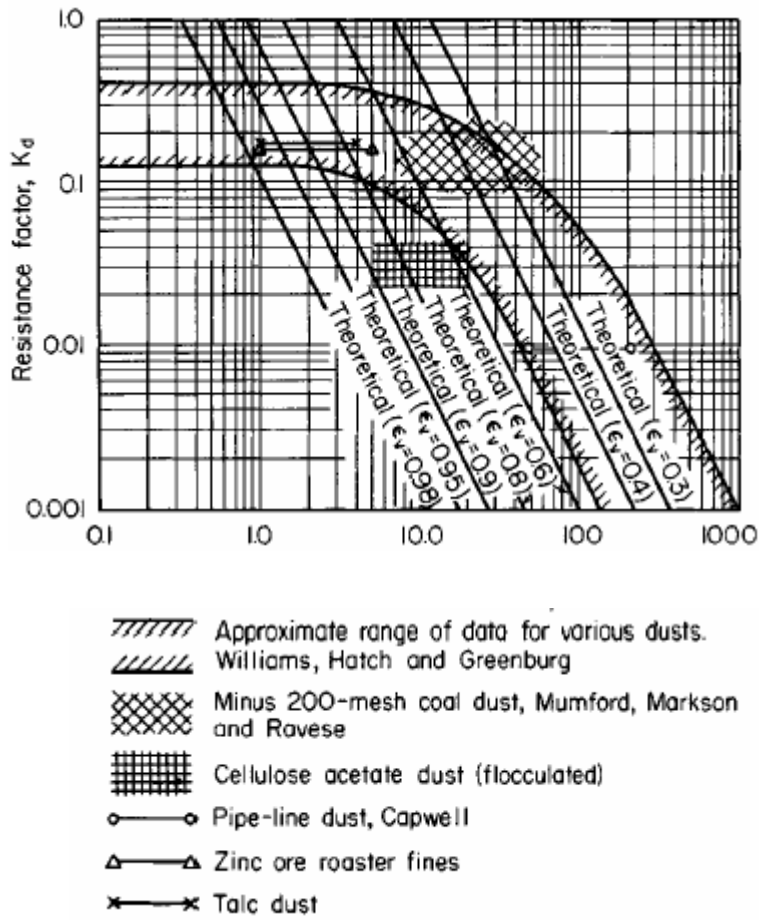


Tabla 14

Ventajas y desventajas del uso de filtros de mangas⁴

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia de remoción de partículas, hasta %99,8	Altas áreas de filtración
Caída de presión y consumo moderado	Limitación para temperaturas o humedades altas
Reutilización del material captado	Alto costo de la tela.
	Costo de mantenimiento elevado

Tabla 15
Características de los materiales en los filtros de mangas⁴

Material de diseño	Temperatura máxima de servicio (°C)	Resistencia de abrasión	Resistencia a ácidos	Resistencia a álcalis	Resistencia a la tensión
Fibra de vidrio	600	M	E	M	E
Teflón	400	A	E	E	B
Dacrón	275	E	B	B	E
Acrílico	260	B	B	A	B
Rayón	200	B	M	A	-
Polipropileno	200	E	E	-	E
Nylon	200	E	M	B	E
Algodón	180	B	M	E	B
Acetatos	160	B	M	M	-
Polietileno	160	B	B	B	E
Lana	215	-	B	M	Húmeda: E Seca: M

Calidad: Excelente (E), Buena (B), Aceptable (A), Mala (M)

8. LIMPIADORES HÚMEDOS

Existen diferentes equipos de este tipo, según su operación, entre los cuales se encuentran: limpiador por atomizado, centrífugo, de choque, de lecho flotante, dinámico, de chorro, de boquilla sumergida y limpiador venturi.

8.1. LIMPIADOR POR ATOMIZADO

Son también conocidos como torres compactas de atomizado, en los cuales el líquido limpiante atomizado en la parte superior de la torre cae por acción de la gravedad a través de una contracorriente de gas sucio. Tienen gran eficiencia y poca caída de presión. Poseen gran capacidad de carga y son utilizados principalmente para la remoción de partículas gruesas.

8.2. LIMPIADOR CENTRÍFUGO

El líquido es atomizado dentro de la unidad y mezclado con el vértice ascendente de gas sucio. Por acción del impacto e intercepción se mezclan las gotas y el polvo los cuales por fuerza centrífuga son acelerados hacia las paredes realizándose la separación y recolección.

Hay varios tipos de limpiadores centrífugos según la manera de formación de las gotas y del ascenso ciclónico del gas. Los atomizadores pueden disponerse axialmente, para dirigir las gotas en dirección radial, o circunferencialmente para una atomización tangencial. Son muy utilizados para recuperación de partículas de tamaño micrónico resultantes de procesos de desintegración mecánico.

8.3. LIMPIADOR DE CHOQUE

El chorro de gas sucio es dirigido a través de placas perforadas para hacerlo chocar contra placas deflectoras. La velocidad del gas hace actuar a las placas perforadas como atomizadores. Las partículas más grandes son colectadas por eliminadores de niebla y retiradas junto a los sólidos colectados por el líquido de sobre flujo de las placas de choque.

8.4. LIMPIADOR DE LECHO FLOTANTE

El empaquetado humedecido flotante proporciona una superficie de choque que evita la reentrada de polvo. El líquido es el medio eliminante de polvo transportado en forma de escurrimiento o solución. El empaquetamiento puede ser fijo o flotante.

8.5. LIMPIADOR DINÁMICO

El líquido limpiante es dividido mecánicamente para la formación de gotas, las cuales por impacto e inercia logran la colección del polvo. El más simple atomiza el agua en la sección del ventilador mientras el bastidor e impulsor húmedos evitan la reentrada de polvo. Requiere gran consumo de energía pero tiene buena eficiencia para partículas finas.

8.6. LIMPIADOR DE CHORRO

El flujo de agua al pasar por un eyector aspira el aire sucio y lo atomiza para la recolección del polvo. Así, el polvo y las gotas de agua son separados del gas en una cámara de sedimentación ayudada por deflectores.

8.7. LIMPIADOR DE BOQUILLA SUMERGIDA

El gas que pasa a través de una boquilla u orificio es limpiado por el líquido atomizado para lograr mayor eficiencia de colección. Estas gotas son removidas en una cámara separadora ayudada por deflectores. Este tipo de colector incluye limpiadores que atomizan totalmente el líquido mediante la energía cinética del gas, al igual que limpiadores en los cuales el gas solo pasa a través de un atomizado formado mecánicamente. Puede manejar cargas de polvo considerablemente grandes con el uso de un colector mecánico de polvo.

8.8. LIMPIADOR VENTURI

El agua es introducida en el ventura para atomizarla mediante la alta velocidad del chorro de gas. La diferencia de velocidades relativas entre el polvo y las gotas produce una mayor eficiencia por choque. La recolección es ayudada por condensación, si el gas está saturado, en la garganta del ventura ya que las partículas sólidas sirven como núcleo de condensación. Para lograr altas eficiencias se requiere gran consumo de potencia de entrada. Puede diseñarse para grandes caídas de presión en recolección de partículas finas.

9. PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

No tienen límite respecto a la temperatura del choro de gas pues se puede diseñar para un rango entre -70 y 1000 °F, los efectos de la corrosión son mínimos y trabajan con caídas de presión muy bajas. Tienen la desventaja de disminuir su eficiencia en presencia de materiales poco conductores y con gases explosivos.

9.1. TIPO PLACA

El gas ionizado entre un electrodo de alto voltaje y placas colectoras conectadas a tierra hace que las partículas se carguen iónicamente y se adhieran a las placas colectoras de carga contraria. Son removidas por vibración periódica o por lavado. Es usado en recolección de polvo seco y admite grandes flujos de de gas.

9.2. TIPO TUBO

Tiene el mismo principio d separación del tipo placa pero los electrodos de descarga son suspendidos en una series de tubos contenidos en un casco cilíndrico sobre una placa colectora. Son utilizados para remover de líquidos o fangos partículas o nubes de partículas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 Santiago Arciniegas Chayree Lucero y Ruiz Vega Onelia Patricia. 1992. Diseño de un horno y un intercambiador de calor gas-sólido para el tratamiento térmico de la caliza en la producción de cal viva. Tesis de Grado Universidad Industrial de Santander, Facultad de ciencias Físico-Químicas: Departamento de Ingeniería Química.

2 Othmer Kira. 1967. Encyclopedia of Chemical Technology. Volume 4. Jhon Wiley and sons Inc., USA: 2 edition.

3 Santos Amado Carlos. 1979. Diseño de una planta para producir cal de alto grado de pureza. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Ingeniería Mecánica.

4 Perry Robert H., Green Don, Maloney James O. 1999. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill, USA: Séptima edición.

5 Geankoplis Christie J. 1998. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Compañía Editorial Continental, México: Tercera edición.

6 McCabe Warren, Smith Julian and Harriott Peter. 1998. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Mcgraw-Hill, España: Cuarta edición.

7 Stanley Walas. 1990. Chemical Process Equipment: Selection and Desing. Butterworth-Heinemann, USA: Segunda edición.

8 Baasel William. 1974. Preliminary Chemical Engineering Plant Design. Elsevier, USA: Segunda edición.

9 Corredor Hernández Jaime y Vélez Laguado Víctor Manuel. 1995. Cálculo y diseño de ciclones industriales: montaje de un prototipo. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Ingeniería Mecánica.

10 Semrau K. 1984. Chemical Engineers Handbook: Gas solid separation-cyclones. McGraw-Hill, New York. Paginas: 20.77-20.121.

11 Borda Pulido Ricardo. 1998. Diseño y construcción de transportador neumático para cascarilla de arroz con sistema de filtración renovable. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Ingeniería Mecánica.

12 Zenz F. 1982. Encyclopedia of Chemical Processing and Design: Cyclones. Dekker, New York: Vol. 14, Paginas 82-97.

13 Koch W. and Licht W. 1997. New Design Approach Boosts Cyclone Efficiency. Chemical Engineering, 84 (24), pages 80-88.