

**ESTUDIO DE MECANISMOS DE PRODUCCIÓN LIMPIA PARA CONTROLAR
MEDIANTE SEPARACIÓN MECÁNICA EL MATERIAL PARTICULADO PRODUCTO
DE LA COMBUSTIÓN DE CARBON PULVERIZADO TIPO CCTA EN HORNOS TIPO
COLMENA**

MARIBEL MONROY GARCIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

**ESTUDIO DE MECANISMOS DE PRODUCCIÓN LIMPIA PARA CONTROLAR
MEDIANTE SEPARACIÓN MECÁNICA EL MATERIAL PARTICULADO PRODUCTO
DE LA COMBUSTIÓN DE CARBON PULVERIZADO TIPO CCTA EN HORNOS TIPO
COLMENA**

MARIBEL MONROY GARCIA

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

**Director de Proyecto
ING. JORGE LUIS GROSSO VARGAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2006**

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero JORGE LUIS GROSSO VARGAS, Director del proyecto, por su orientación y colaboración en la realización de este trabajo.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por la formación y alta calidad académica que me brindó.

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A DIOS por todos los dones que me ha dado en la vida, por iluminar mi camino y permitirme cumplir mis sueños.

A mi mami, quien me ha enseñado las cosas importantes en la vida, gracias a su gran ejemplo, infinito amor y dedicación hoy soy quien soy.

A mi papá, por su gran amor y por hacer de mí una mujer fuerte y responsable.

A mis hermanos, por su apoyo incondicional y su intachable ejemplo de vida.

A María, por existir y alegrarme cada día, por ser mi fuente de inspiración.

A Andrés, mi novio por su amor y comprensión. Por que considero que es quien mas cree en mí, siempre me ha dado lo mejor de sí, esperando solo que sea feliz.

A Freddy mi ángel de la guarda, por enseñarme que todo es posible, si se hace con amor.

A mis amigos, por su cariño, su compañía en esta etapa de mi vida y porque estoy segura que todos los que siempre han estado ahí, apoyándome y creyendo en todas mis ideas, por absurdas que parecieran, seguirán enseñándome a crecer y a ser una mejor persona cada día.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	
1. ASPECTOS GENERALES	2
1.1. CONTAMINANTES POR PARTICULAS	2
1.1.1. Tipos de partículas	2
1.1.1.1. Diámetro de partículas	2
1.1.1.2. Partículas suspendidas totales	3
1.1.1.3. Partículas con diámetro menor a 10 micrómetros	3
1.1.1.4. Partículas con diámetro menor a 2.5 micrómetros	3
1.1.2. Distribución y fuentes de material particulado	3
1.1.3. Material particulado en la industria del ladrillo	4
1.1.4. Norma actual	5
1.1.5. Combustible CCTA	6
2. PROCESO DE COMBUSTION EN HORNOS COLMENA	7
2.1. DESCRIPCIÓN DEL HORNO COLMENA	7
3. TECNOLOGIAS DE CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO	10
3.1. DESCRIPCION DE LOS CAPTADORES DE POLVO	11
3.1.1. Cámara de sedimentación	13
3.1.2. Ciclón	14
3.1.3. Precipitador electrostático	14
3.1.4. Filtros de mangas	14
3.1.4.1. Limpieza por sacudida	16
3.1.4.2. Limpieza por aire inverso	16
3.1.4.3. Limpieza por pulse jet	17
3.2. METODOLOGIA PARA LA SELECCIÓN Y EL DISEÑO DEL EQUIPO	17
4. DISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS CON LIMPIEZA	

POR AIRE INVERSO	20
4.1. PARTES PRINCIPALES DEL FILTRO DE MANGAS	20
4.1.1. Cámara de aire sucio con sistema de soportación, difusor y descarga de material particulado	20
4.1.2. Cámara de aire limpio	20
4.1.3. Mangas filtrantes	21
4.2. CALCULO DEL FILTRO DE MANGAS CON LIMPIEZA POR AIRE INVERSO	21
4.2.1. Balance de masa	21
4.2.1.1. Cálculo del oxígeno requerido	23
4.2.1.2. Cálculo del Oxígeno que entra	23
4.2.1.3. Cálculo de los gases de combustión	24
4.2.2. Cálculo del filtro de mangas	26
4.2.2.1. Cálculo del área neta de filtración	27
4.2.2.2. Selección del tipo de tela y dimensiones	27
4.2.2.3. Cálculo del número de mangas	27
4.2.2.4. Calculo del número de compartimientos	28
4.2.2.5. Cálculo del ventilador	28
CONCLUSIONES	31
RECOMENDACIONES	32
BIBLIOGRAFIA	33
ANEXOS	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Emisión de contaminantes por uso de energéticos regiones y casos especiales	5
Tabla 2. Características de los diferentes colectores	17
Tabla 3. Composición másica de CCTA	22
Tabla 4. Calor suministrado al horno colmena por el carbón	22
Tabla 5. Oxígeno teórico	23
Tabla 6. Aire requerido	23
Tabla 7. Gases de combustión	24
Tabla 8. Balance por elementos	24
Tabla 9. Composición gas orsat	25
Tabla 10. Gas orsat	25
Tabla 11. Datos de entrada	26
Tabla 12. Numero de compartimiento vs. Área neta	28
Tabla 13. Datos de cálculo del ventilador	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Horno colmena	7
Figura 2. Partes del horno colmena	7
Figura 3. Diagrama cargue de hornillas	8
Figura 4. Inyección CCTA	8
Figura 5. Planos del horno colmena	9
Figura 6. Implementación de CCTA	9
Figura 7. Mecanismos de deposición de polvo	11
Figura 8. Curvas de eficiencia fraccional de los dispositivos convencionales Para el control de la contaminación del aire	12
Figura 9. Cámara de sedimentación	13
Figura 10. Ciclón	13
Figura 11. Precipitador electrostático	14
Figura 12. Filtros de mangas	14
Figura 13. Filtración	15
Figura 14. Filtro de mangas aire inverso	16
Figura 15. Etapas de selección del equipo	18
Figura 16. Partes constitutivas del filtro de mangas	21
Figura 17. Balance de masa	26
Figura 18. Planos del filtro de mangas	30

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DECRETO 02 /82	33
ANEXO B. Tipos de fibras y sus propiedades	39
ANEXO C. Relaciones gas a tela ($\text{ft}^3/\text{min}/\text{ft}^2$)	40
ANEXO D. Curva característica del ventilador	41

RESUMEN

TITULO: "ESTUDIO DE MECANISMOS DE PRODUCCIÓN LIMPIA PARA CONTROLAR MEDIANTE SEPARACIÓN MECÁNICA EL MATERIAL PARTICULADO PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN DE CARBON PULVERIZADO TIPO CCTA EN HORNOS TIPO COLMENA"*

AUTOR: MONROY GARCIA, Maribel**

PALABRAS CLAVES: Contaminación, Aire, Emisión, Filtro, Material Particulado, CCTA.

CONTENIDO:

El proceso de combustión en hornos colmena genera gran cantidad de emisiones de material particulado, debido al uso de combustibles sólidos como el carbón. Estas emisiones son enviadas a la atmósfera sin ningún tipo de tratamiento de limpieza, generando un impacto ambiental importante, el cual debe ser reducido mediante la implementación de nuevas tecnologías que permitan mejorar el proceso de producción.

En el presente trabajo, se evaluaron técnicamente los diferentes tratamientos de depuración de gases por vía seca, los cuales utilizan la separación mecánica como principio de operación. Se seleccionó la alternativa que mas se ajustaba al proceso, teniendo en cuenta las normas ambientales vigentes, siendo este el filtro de tela. Para el diseño del filtro de tela, fue necesario estudiar el proceso de operación del horno colmena, con el fin de establecer las características principales del proceso como; temperatura, cantidad de material particulado emitido, tipo de emisión y caudal de gas a limpiar. Además se hizo un análisis del tipo de tela o fibra que podría soportar estas condiciones abrasivas de operación, siendo la fibra de vidrio la seleccionada. Posteriormente se dimensiono el filtro de tela.

Finalmente, se realizaron las conclusiones y las recomendaciones a partir de los resultados obtenidos en este proyecto, con el fin de que sistemas como éstos, sean implementados en la industria, contribuyendo de esta forma a la realización de procesos de producción limpia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química.
Director: Jorge Luis Grosso Vargas

ABSTRACT

TITLE: “STUDY OF MECHANISMS OF CLEAN PRODUCTION TO CONTROL THROUGH MECHANICAL SEPARATION THE PARTICULATED MATERIAL PRODUCT OF THE COMBUSTION OF PULVERIZED COAL TYPE CCTA IN FURNACES TYPE BEEHIVE”*

AUTHOR: MONROY GARCIA, Maribel **

KEY WORDS: Contamination, Air, Emission, Filter, Particulated Material, CCTA.

CONTENT:

The process of combustion in furnaces beehive generates great amount of emissions of particulated material, due to the solids combustibles use like the coal. These emissions are sent to the atmosphere without type of cleaning treatment, having generated an important environmental impact, which must be reduced through the implementation of new technologies that allow to improve the production process.

In the present work, were evaluated technically the different treatments from gas purification by dry route, which uses the mechanical separation like operation principle. The alternative was selected that but adjusted to the process, considering the effective environmental norms, being this, the fabric filter. For the design of the fabric filter, it was necessary to study the process of operation of the furnace beehive, with the purpose of establishing the basic characteristics of the process like; temperature, amount of emitted particulated material, type of emission and gas volume to clean. In addition an analysis became of the type of fabric or fiber that could support these abrasive conditions of operation, being the fiber glass the selected one. Later It was determine the proportions the fabric filter.

Finally, the conclusions and the recommendations were made from the results obtained in this project, in order that systems like these, are implemented in the industry, contributing of this form to the accomplishment of processes of clean production.

* Grade Project

** Faculty of Physico-Chemical Sciences, School of Chemical Engineering.
Director: Jorge Luis Grosso Vargas.

INTRODUCCION

En el proceso de fabricación de cerámica se utilizan hornos tipo colmena alimentados con carbón, los cuales tiene un importante impacto ambiental y social debido a la generación de contaminantes atmosféricos como: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Hidrocarburos (HC), Carbones e inquemados, Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x), material particulado; los cuales afectan principalmente el bienestar de la comunidad. Los principales efectos del material particulado en la salud, que causan preocupación, incluyen: el agravamiento de afecciones cardiovasculares ya existentes, la alteración de los sistemas de defensa del organismo, daños al tejido pulmonar, carcinogénesis y mortalidad prematura. [1]

Para reducir los impactos ambientales generados por el uso del carbón, se deben buscar alternativas económica y técnicamente viables que permitan optimizar los procesos de producción, cumpliendo con las normatividades ambientales establecidas. Enmarcado dentro del proyecto de carbones de Santander [21], se diseño un sistema para el control de las emisiones de material particulado, aplicado a hornos colmena que utilizan combustible tipo CCTA como fuente de energía.

En el presente documento se presenta la selección y diseño de un sistema de depuración de gases de combustión en la producción de ladrillos en hornos colmena, en cumplimiento de los requerimientos antes mencionados. El desarrollo del documento se realiza de la siguiente forma: en el primer capítulo se trataran generalidades acerca del material particulado y del combustible CCTA; en el segundo capítulo se realizara una breve descripción del proceso de combustión, en el tercer capitulo se estudiarán y analizarán los equipos existentes para depuración de aire y se seleccionará el más adecuado, por último, se diseñará el equipo seleccionado.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. CONTAMINANTE POR PARTICULAS

Se consideran partículas los materiales sólidos o líquidos en el aire que pueden resultar de procesos naturales como la acción de los vientos sobre los suelos erosionados, los incendios forestales, el desprendimiento de polen de la vegetación y hasta erupciones volcánicas; pero también provienen de acciones de los seres humanos, principalmente los procesos de manejo de materiales, y los procesos de combustión [24]. Además de las partículas que se emiten directamente al ambiente existen otras que resultan de la transformación química y la condensación de vapores en la atmósfera [18]. El material particulado incluye entonces las partículas sólidas y los rocíos líquidos en el aire, y posiblemente es uno de los contaminantes más importante por la multiplicidad de fuentes y sus efectos sobre la salud.

1.1.1 Tipos de partículas. Las partículas de interés son aquellas que están disponibles para que los seres humanos las inhalen, o sea aquellas que permanecen suspendidas en la atmósfera durante periodos relativamente largos, lo cual depende principalmente de su tamaño [24]. El tamaño de las partículas se define por su diámetro aerodinámico que es el diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm^3 (agua) que se comporta de la misma manera que la partícula en cuestión.[18]

1.1.1.1. Diámetro de partículas. Las partículas con un diámetro menor de 0.1 micrómetros (μm) se mantienen en suspensión durante periodos muy largos debido a la interacción de fuerzas moleculares que las mantiene en constante movimiento y flotando en el aire. Las partículas con un diámetro mayor a $20 \mu\text{m}$,

tiene velocidades de sedimentación relativamente grandes, las cuales se eliminan rápidamente por gravedad y otros procesos de inercia. Las partículas con diámetro mayor a $100\ \mu\text{m}$ se sedimentan con extremada rapidez y no se consideran entonces parte de las partículas suspendidas [24].

1.1.1.2. Partículas suspendidas totales. Bajo esta denominación se agrupan todas las partículas que permanecen suspendidas en el aire. Los procesos de manejo de materiales tales como plantas de procesamiento de agregados para construcción, o el polvo levantado por vehículos y vientos de las calles, tienden a producir partículas en el rango catalogado como partículas gruesas con diámetros mayores de 2.5 o $10\ \mu\text{m}$. Durante la respiración humana las partículas gruesas quedan en una alta proporción atrapadas por los pelos nasales o en las mucosas húmedas del aparato respiratorio superior [20].

1.1.1.3. Partículas con diámetro menor a 10 micrómetros. Hacia 1987 estudios de epidemiología en los Estados Unidos mostraron que las partículas con diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) penetraban mas profundamente en el sistema respiratorio humano es decir en la parte torácico. Se mostró que la respiración por la boca y buconasal resulta en la ingestión de partículas de diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$, y cuando la respiración es solo por la nariz las partículas que llegan a la cavidad toraxica son básicamente aquellas de tamaño menor a $1\ \mu\text{m}$. Estas partículas menores de $10\ \mu\text{m}$ representan entonces la fracción respirable de las partículas suspendidas totales y son entonces susceptibles a causar efectos a la salud [1].

1.1.1.4 Partículas con diámetro menor a 2.5 micrómetros. Las partículas con diámetro menor de $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) son producidas principalmente en la combustión de combustibles fósiles, tanto en motores vehiculares como grandes equipos en generación térmica y en equipos industriales como calderas y hornos

[20]. Otras partículas en este rango de tamaño no son emitidas directamente sino que se forman como producto de reacciones químicas y procesos físicos [18].

1.1.2 Distribución y fuentes del material particulado. Las partículas presentes en la atmósfera en el intervalo por debajo de $1\mu\text{m}$, se producen por condensación, mientras que las partículas mayores son el resultado, o bien de la trituración o la combustión. Los procesos de molienda en seco son rara vez eficientes en la producción de partículas menores de pocos micrómetros. La combustión puede producir cuatro tipos diferentes de partículas. Se forman por los modos siguientes:

- ❖ El calor puede vaporizar materiales que se condensan posteriormente, produciendo partículas entre 0.1 y $1\mu\text{m}$.
- ❖ Las reacciones químicas del proceso de la combustión pueden producir partículas de cúmulos moleculares inestables de corta duración por debajo de aproximadamente $0.1\mu\text{m}$.
- ❖ Los procesos mecánicos pueden liberar cenizas o partículas de combustible de $1\mu\text{m}$ o mayores.
- ❖ Si intervienen aspersiones de combustibles líquidos, puede que se escape directamente una ceniza muy fina.
- ❖ La combustión parcial de los combustibles fósiles puede producir hollín.

Afortunadamente, con la operación de dispositivos de control, más del 90 por ciento de estas emisiones potenciales se remueven en último término antes de su descarga a la atmósfera [24].

1.1.3. Material Particulado en la Industria del Ladrillo. La Tabla 1. Resume las emisiones de contaminantes de la industria ladrillera en las cinco regiones y se comparan con el nivel de producción en cada región. La comparación de los porcentajes de participación de emisiones en la producción, calculados aquí como la relación entre las emisiones y la producción (entregadas en toneladas), muestra

que la generación relativa más baja de monóxido de carbono (CO) se presenta en los casos especiales. Esto obedece a que en esas empresas se tienen mejores procesos, materias primas y temperaturas de operación y una adecuada tecnología. Mientras menor es la emisión de CO, mayor es la eficiencia en la combustión y, por tanto, menor el derroche de energía en los humos de escape. De igual manera, es menor la emisión de material particulado a la atmósfera.

Por su parte, la región Suroccidente tiene, en promedio, el proceso de combustión más ineficiente del país, debido a que tiene un carbón de calidad inferior al de la meseta cundiboyacense [25].

Tabla 1. Emisión de Contaminantes por Uso de Energéticos Regiones y Casos Especiales

	Suroccidente		Noroccidente		Oriente-Atlántico		Centro		Casos Especiales	
	Ton/mes	Emisión	Ton/mes	Emisión	Ton/mes	Emisión	Ton/mes	Emisión	Ton/mes	Emisión
Producción	16.500		79.732		36720		166.175		59.725	
Emisión CO	377	0.0228	768	0.0096	339	0.0092	644	0.0039	122	0.0020
Emisión SO ₂	10	0.0006	105	0.0013	90	0.0024	189	0.0011	75	0.0013
Emisión No _x	10	0.0006	30	0.0004	12	0.0003	36	0.0002	13	0.0002
Emisión de Partí.	153	0.0093	675	0.0085	204	0.0055	717	0.0043	121	0.0020

Fuente: Determinación de la Eficiencia Energética del Subsector Industrial de Ladrillo, Vidrio y Cerámica. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Octubre, 2001.

1.1.4. Norma Actual

La norma vigente en Colombia sobre material particulado en el aire, está contenida en el Decreto 02 de 1982. Los límites establecidos se dan para la

concentración de partículas suspendidas totales. El Decreto 02 estableció un límite máximo para concentración de partículas en suspensión que corresponde al total del material particulado en suspensión recogido durante 24 horas en el filtro de un muestreador de alto volumen [6]. En el **anexo A**. Se enuncia la norma de emisión de material particulado para este tipo de industrias; y algunas referencias legislativas y técnicas sobre atmósfera y espacio aéreo.

1.1.5. Combustible CCTA. Carbón-Combustóleo-Tensoactivo-Agua, mezcla emulsionada de baja viscosidad, alto contenido calórico, que puede ser transportada por tubería, cuya combustión es prácticamente completa; debido a que el carbón esta en micropartículas atrapadas por gotas de combustóleo. Los niveles de contaminantes tipo CO (monóxido de carbono) NOx (óxidos de nitrógeno) son menores o similares a las producidas por quemas con otros combustibles. Para el SOx (óxido de azufre) su producción depende del contenido de azufre en el carbón o en el combustóleo.

Las mezclas Carbón-Combustóleo-Tensoactivo-Agua (CCTA) por ser de fácil manejo, transporte y combustión minimizan el impacto ambiental que normalmente conlleva el uso del carbón como fuente de energía [12].

2. PROCESO DE COMBUSTION EN HORNOS COLMENA

2.1. DESCRIPCION DEL HORNO COLMENA.

Los hornos colmena son diseñados para la cocción de materiales especiales, que requieran altas temperaturas como: tejas, ladrillos, tabletas vitrificadas, tubos, entre otros. La principal ventaja de este tipo de horno es que el combustible y los residuos de combustión no entran en contacto con el producto (ver figura 1) [2].



Figura 1. Horno colmena
Fotos cortesía Ladrillera



Figura. 2 Partes del horno colmena

Son hornos cerrados, intermitentes en donde, la alimentación de material estructural seco se realiza por dos puertas laterales. La alimentación del carbón se realiza por unas hornillas (8 a 12) ubicadas en la pared del horno. Actualmente el combustible utilizado es carbón. Éste es distribuido en puntos intermedios entre hornillas como se observa en la figura 3. Luego es alimentado a las parrillas que se encuentran en las hornillas, y posteriormente se enciende. La llama se eleva contra el muro, llega hasta la bóveda, atravesando los productos de arriba hacia abajo, debido al tiro (depresión) y luego sale por el ducto que comunica a la chimenea que se encuentra en el centro de la base del horno.

En este proceso de combustión, la mayor emisión de material particulado se presenta en el momento de remover el carbón dentro de la hornilla y/o avivar el carbón para realizar la alimentación. También se presenta baja eficiencia en la combustión, debido a los excesos de aire superiores lo que conllevan a un mayor consumo de carbón para calentar aire innecesario [2].

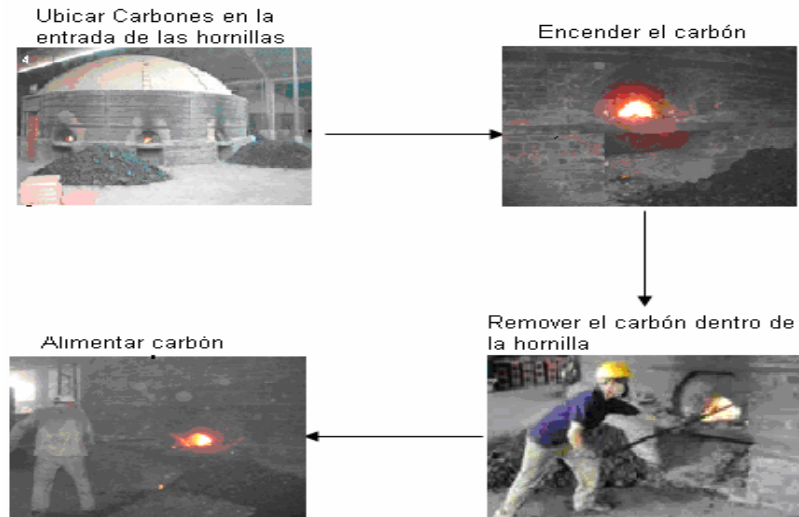


Figura 3. Quema de combustible actual

La implementación del combustible CCTA, trae varias ventajas, se evita la etapa del cargue de hornillas, se disminuyen los costos de mano de obra, se mejora la eficiencia de combustión y de esta manera se disminuye la producción de material particulado y el consumo de combustible, mediante la implementación de quemadores. En este caso el cargue del combustible sería más eficiente.



Figura 4. Quema con implementación de CCTA

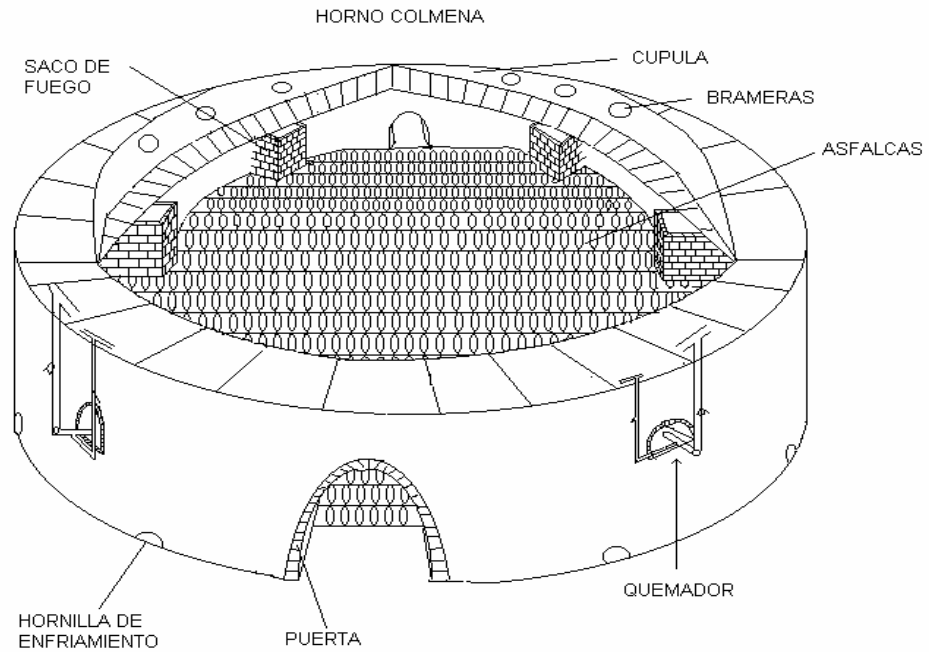


Figura 5. Plano del horno colmena

En la siguiente figura se esquematiza el proceso de preparación de la CCTA y su adecuación al proceso del horno colmena.

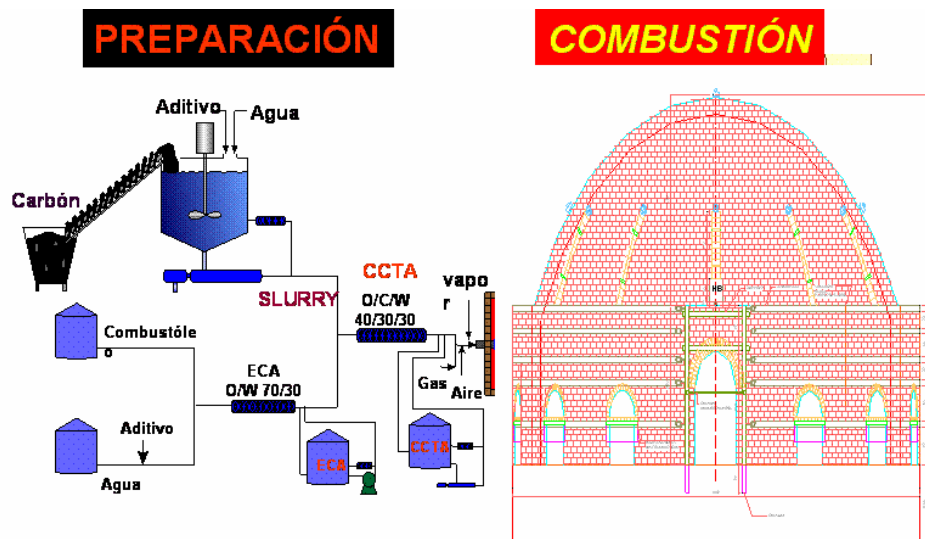


Figura 6. Implementación de la CCTA

3. TECNOLOGÍAS DE CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO

Los depuradores de aire son equipos que eliminan los contaminantes de una corriente de aire o gas. Existe una amplia gama de diseños capaces de cumplir los más variados requisitos de depuración del aire. El grado de eficacia necesario, la cantidad y características de los contaminantes que deben ser eliminados de la corriente gaseosa y las condiciones de ésta, influyen en la selección del equipo para una aplicación concreta [24]. Además, también se debe tener en cuenta la protección contra los riesgos de incendio y explosión.

Las operaciones básicas en la recolección de polvo por medio de cualquier dispositivo son:

- ❖ La separación de las partículas transportadas por el gas de la corriente gaseosa por deposición sobre una superficie de recolección.
- ❖ La retención del depósito sobre la superficie.
- ❖ La eliminación del depósito recolectado sobre la superficie para su recuperación o desecho.

El paso de separación requiere:

- ❖ La aplicación de una fuerza que produzca un movimiento diferencial de la partícula con relación al gas.
- ❖ Un tiempo suficiente de retención del gas para que la partícula emigre hasta la superficie de recolección. Los principales mecanismos de la deposición de aerosoles que se aplican en los recolectores de polvo son:

- Deposición por gravedad.
- Intercepción en la línea de flujo.

- Deposición por inercia.
- Deposición por difusión.
- Deposición electrostática.

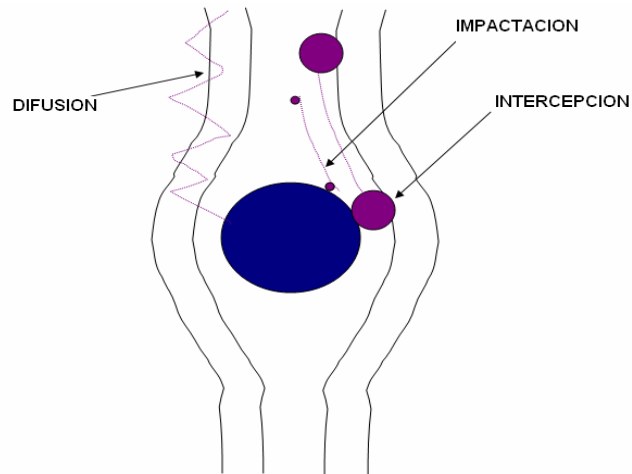


Figura 7. Mecanismos de deposición de polvo.

En la mayor parte del equipo de recolección de polvo se utiliza más de un mecanismo de recolección y en algunos casos el mecanismo de control puede cambiar cuando el recolector se opera en un intervalo amplio de condiciones; en consecuencia, los recolectores se clasifican en forma más conveniente por su tipo en vez de por el mecanismo de recolección con el que operan [18].

3.1 DESCRIPCION DE LOS CAPTADORES DE POLVO.

Para seleccionar el equipo es necesario conocer los diferentes tipos de colección, así como su operación y eficiencia de recolección.

En la Figura 8. Se comparan las eficiencias del equipo convencional para el control de la contaminación del aire con eliminación de partículas. Estas curvas de eficiencia en porcentaje indican que los equipos son menos eficientes en la eliminación de partículas con un tamaño que varía entre 0.1 y 1.0 μm .

En los depuradores en húmedo y los filtros de tela se pueden eliminar en forma eficiente partículas pequeñas ($0.1 \mu\text{m}$) gracias a la difusión browniana [9]. Cuando más pequeña sea la partícula, más intenso será su movimiento browniano y más fácil su recolección mediante fuerzas de difusión. Las partículas mayores ($>1\mu\text{m}$) se recolectan principalmente por impacto y la eficiencia de eliminación se incrementa en forma proporcional al tamaño de partícula. El punto mínimo de la curva de porcentaje de eficiencia para depuradores y filtros se presenta en el intervalo de transición entre la eliminación por movimiento browniano y la realizada por impacto.

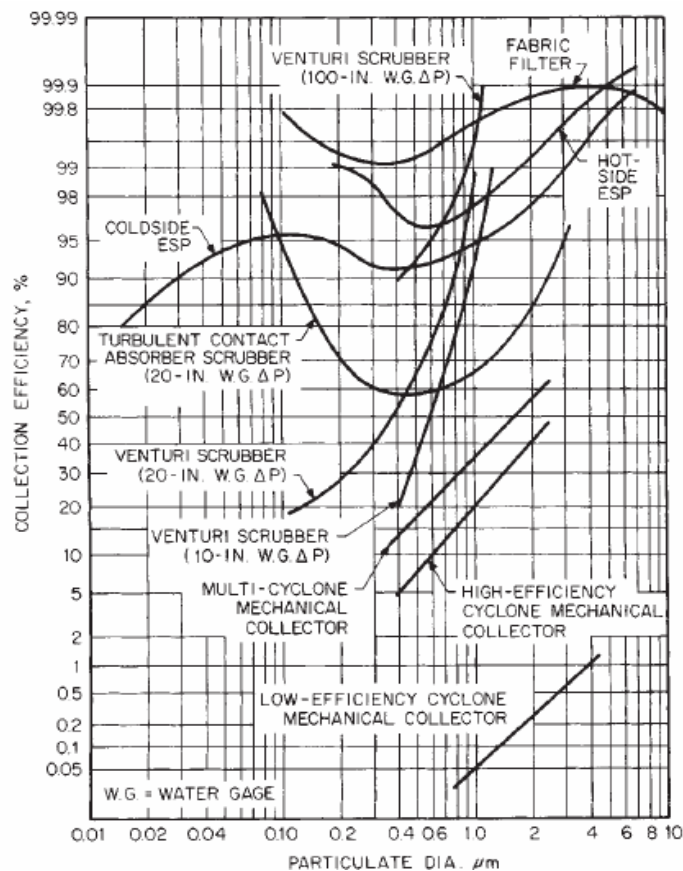


Figura 8. Curvas de eficiencia fraccional de los dispositivos convencionales para el control de la contaminación del aire.

Fuente. Manual del Ingeniero Químico.

En general, la industria tiende a utilizar cuando es posible, filtros de bolsas para el control de las emisiones de partículas. Los filtros de bolsas proporcionan una eficiencia de recolección muy elevada, son sistemas de recolección en seco y relativamente fáciles de operar y mantener, un aspecto importante para el éxito del diseño del equipo de control. Otra ventaja de estos equipos es que la corriente de gas limpio que sale del filtro de bolsas se puede regresar al proceso, con lo que se reducen los requerimientos de aire de repuesto y calentamiento [9].

Existen varios sistemas, algunos por vía húmeda y otros por vía seca, siendo este último el más usado y por lo tanto el que se tratará. Los principales por vía seca son:

3.1.1 Cámara de sedimentación. La corriente se alimenta a una cámara donde pierde velocidad y dirección debido a las dimensiones de ésta, estos cambios ocasionan que las partículas grandes se separen de la corriente de aire y por medio de la gravedad se depositen en la parte inferior de donde son removidos después [10]. Ver figura 9.

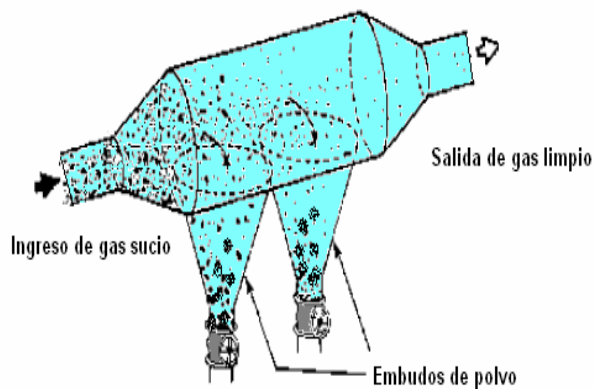


Figura 9. Cámara de sedimentación.



Figura 10. Ciclón

3.1.2. Ciclones. La corriente de aire sucio se alimenta en forma tangencial por la parte superior de una sección cilíndrica y se hace circular en espiral formando un vórtice que en su giro hace que la fuerza centrífuga accione las partículas proyectándolas contra las paredes del colector, separando el polvo que se descarga por la parte inferior y el aire limpio sale por la superior [11]. Ver figura 10.

3.1.3. Precipitador Electrostático. Este equipo para separar utiliza la fuerza eléctrica producida por la atracción de las partículas cargadas. Consta de unas placa emisoras que producen electrones libre, éstos forman una corona o campo de cargas negativas las cuales son atraídas por las partículas ionizándolas y en ésta forma son a su vez atraídas por las placas colectoras que tienen carga positiva, [10]. Ver figura 11.



Figura 11. Precipitador electrostático



Figura 12. Filtros de mangas

3.1.4 Filtros de Mangas. Son recolectores en los que el polvo se elimina de la corriente de gas, al pasar el gas cargado de polvo a través de una tela de cualquier tipo (p. Ej., una tela tejida, fieltro o una membrana porosa). Una unidad

de filtro de tela consiste en uno o más compartimientos separados que contienen filas de bolsas de tela en forma de tubos. El gas cargado de partículas pasa hacia arriba a lo largo de la superficie de las bolsas, después radialmente a través de la tela. Las partículas son retenidas corriente arriba en la superficie de las bolsas, y la corriente de gas limpio se descarga a la atmósfera. El filtro es operado cíclicamente, alternando entre periodos relativamente largos de filtración y cortos períodos de limpieza. Los filtros de tela colectan partículas finas con eficiencias generalmente superiores a 99 o 99.9%. La capa de polvo o torta de polvo, recogida en la tela es la principal responsable de esta alta eficiencia.

La torta es una barrera con poros tortuosos que atrapan las partículas mientras éstas viajan a través de la torta. Las limitaciones son impuestas por las características del gas (temperatura) y las características de las partículas que afectan la tela o su operación. Para su limpieza existen diversos métodos [10]. En la figura 13 se muestra el sistema de filtración.

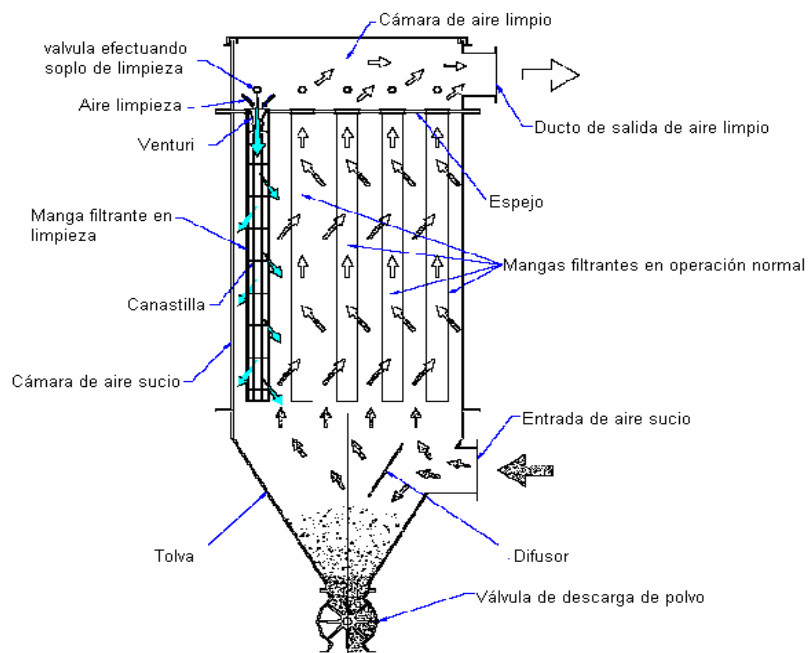


Figura 13. Filtración

3.1.4.1 Limpieza por Sacudida. En la limpieza por sacudida, usada con flujo del gas de adentro hacia fuera, la transferencia de energía se logra suspendiendo las bolsas a un gancho o a un marco impulsado por un motor que oscila. La tela se mueve hacia fuera desde el centro de la bolsa durante la acción de la onda. Cuando la tela alcanza el límite de su expansión, el polvo tiene la suficiente inercia para rasgarse de la tela y descender hacia la tolva. [10].

3.1.4.2 Limpieza por aire-inverso. En la limpieza por aire-inverso, el flujo del gas a las bolsas se para en el compartimiento que es limpiado y el flujo de aire inverso (en el exterior) se dirige a través de las bolsas. Esta suave inversión del flujo del gas derrumba las bolsas hacia sus líneas centrales, que hace separar la torta de la superficie de la tela. La fuente del aire-inverso es generalmente un ventilador separado del sistema capaz de proveer el aire limpio, seco para uno o dos compartimientos a una razón de gas-tela alta o más alta que el flujo de gas [11].

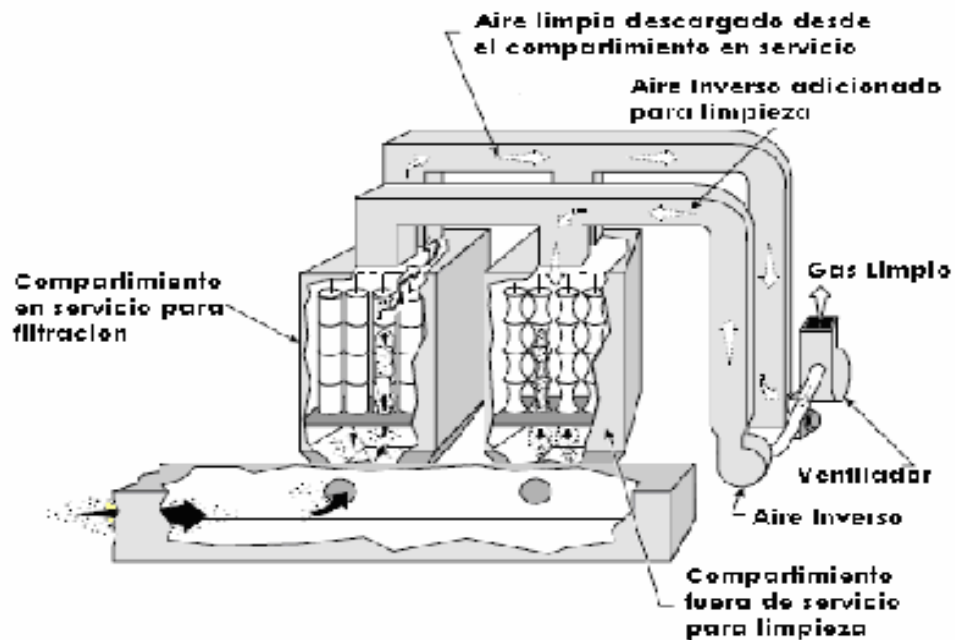


Figura 14. Filtro de mangas con limpieza por aire inverso

3.1.4.3 Limpieza por Pulse-Jet. El sacudido se lleva a cabo mediante la inyección de un pulso de aire comprimido de 70 a 100 lb/pul² por la parte superior dirigido al interior de la bolsa, este produce una onda de choque en el interior de la bolsa que hace que se desprenda el polvo. El aire que se escapa a través del bolso lleva el polvo separado lejos de la superficie de la tela. En los pulse-jet, sin embargo, filtrando el gas los flujos son opuestos en la dirección en comparación con los filtros por sacudida y los filtros por aire-inverso (es decir, exterior-interior) [10].

En la Tabla 2. Se presenta un resumen de las principales características de los colectores presentados.

Tabla 2. Características de los diferentes colectores

EQUIPO	%η	ESPACIO REQUER.	CAPACIDAD TIPICA	Δp (in H2O)	COSTO DE INVERSION	COSTO DE OPERACION	REQUERIM. DE MANTENIM.	T °C
FILTRO DE MANGAS	99-95	MEDIO	1-6 ft ³ /min./ft ² área de tela	4-6	BAJO	ALTO	ALTO	260-290
CICLON	85-95	GRANDE	2,500-3,500 ft ³ /min./ft ² área de entrada	3-5	BAJO	BAJO	BAJO	> 540
CAMARA ASENTAMIENTO	30-40	GRANDE	15-25 ft ³ /min/ft ³ volumen de envoltura	0.2-0.5	BAJO	BAJO	BAJO	> 540
PRECIPITADOR ELECTROSTATICO	90-98	PEQUEÑO	2-8 ft ³ /min/ft ² área colectoras del electrodo	0.2-0.5	ALTO	BAJO	BAJO	> 538

3.2 METODOLOGIA PARA LA SELECCIÓN Y EL DISEÑO DEL EQUIPO

En el siguiente diagrama se resume las etapas previas a la selección del equipo de captación de polvo. [20]

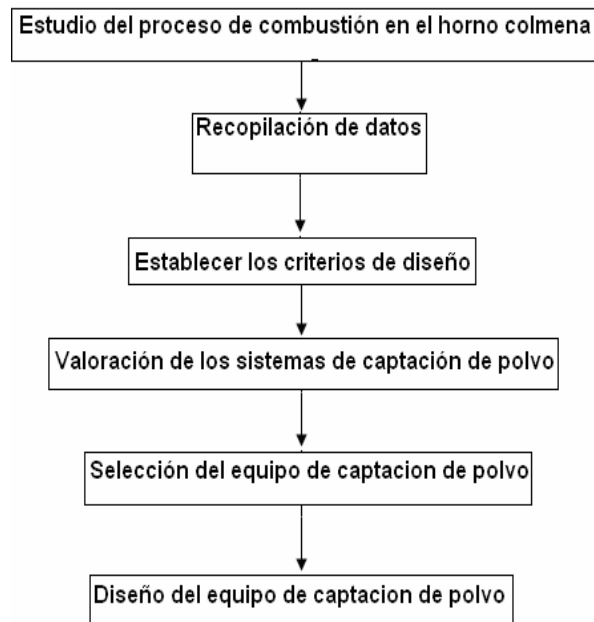


Figura 15. Etapas para la selección del equipo

En este proceso el material particulado es producto de la combustión en el horno colmena. El polvo es diluido en la corriente de gases de combustión y evacuado por la chimenea, para luego ser sometido al proceso mediante el cual el gas será limpiado. Las razones principales para implementar este equipo de limpieza son; cumplir con la exigencia ambiental establecida en el Decreto 02/82 específicamente en el artículo 70, y recuperar la corriente de gases depurados la cual puede ser reutilizada en el precalentamiento del horno.

Los factores a considerar en la selección de un equipo de captación de polvo son; tamaño de partícula, eficiencia de recolección, características de la corriente gaseosa y características del contaminante (concentración y tipo de partículas) [20]. Analizando estos factores en el horno colmena, se observa que el tamaño de

partícula está por debajo de 10 μm , luego se necesita un captador con alta eficiencia de recolección para partículas finas. Respecto a la corriente gaseosa se puede decir que esta compuesta por: CO_2 , SO_x , NO_x y material particulado. La temperatura promedio en el conducto de la chimenea es 260°C .

De acuerdo a lo anterior y a las características de las partículas, sus efectos en la salud y la cantidad de partículas emitidas en la industria del ladrillo; se selecciona el mejor depurador de polvo que garantice que todo el gas emitido cumpla con las normas.

Se descarta la cámara de sedimentación por su baja eficiencia, a pesar de su bajo costo, pues como se mencionó anteriormente, este es uno de los factores más importantes en la selección del equipo. En el caso del ciclón, éste presenta como desventaja que deja pasar las partículas más finas, siendo estas las que se presentan con más frecuencia en la operación de hornos colmena, por lo que su eficiencia disminuye con este factor. El precipitador electrostático presenta variadas desventajas como son, entre otras, los altos costos de instalación, requiere mucho espacio para su instalación debido a su gran tamaño, es limitado para bajas concentraciones de polvo, etc. Además de lo anterior saldría muy costoso por el flujo de gases tan pequeño.

En cuanto a los filtros de mangas de acuerdo a lo que se observa en la tabla 2, es el que presenta mayor eficiencia de recolección para partículas finas, su operación es sencilla, no requiere mucho espacio para su instalación y los costos de inversión son bajos. En cuanto a los costos de operación y mantenimiento se pueden disminuir implementando el sistema de mangas snap band y el mecanismo de limpieza por aire inverso.

4. DISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS CON LIMPIEZA POR AIRE INVERSO

4.1 PARTES PRINCIPALES DEL FILTRO DE MANGAS

Una vez seleccionado el filtro de mangas con limpieza por aire inverso como el más conveniente para operar en este proceso se profundizará más en sus componentes, funcionamiento y diseño. Las partes principales de un filtro son: cámara de aire sucio, (sistema de soportación, difusor y descarga de material particulado), cámara de aire limpio y mangas filtrantes. [10]

4.1.1 Cámara de aire sucio con sistema de soportación, difusor y descarga de material particulado. Por esta cámara entra el material sucio, en la parte inferior se diseña una tolva piramidal con descargue de material particulado por medio de válvula rotativa. Esta unida por la parte superior a la cámara de aire limpio con flanges abridados y separada por la lamina portamangas o espejo.

4.1.2 Cámara de aire limpio. Por esta cámara sale el aire limpio después de haber sido depurado en las mangas filtrantes. En su interior contiene la lámina portamangas, además de las mangas filtrantes que se construyen en el material seleccionado de acuerdo a las exigencias. También se encuentran las canastillas, que constituyen la estructura interna de las mangas y evitan que estas se colapsen. La canastilla tiene en la parte superior una entrada con vénturi para multiplicación de aire de limpieza. Tiene además la puerta de acceso, toma para la salida de aire a la atmósfera, pasarela con barandal de seguridad y escalera. En la figura 16 se observan las diferentes partes del filtro.

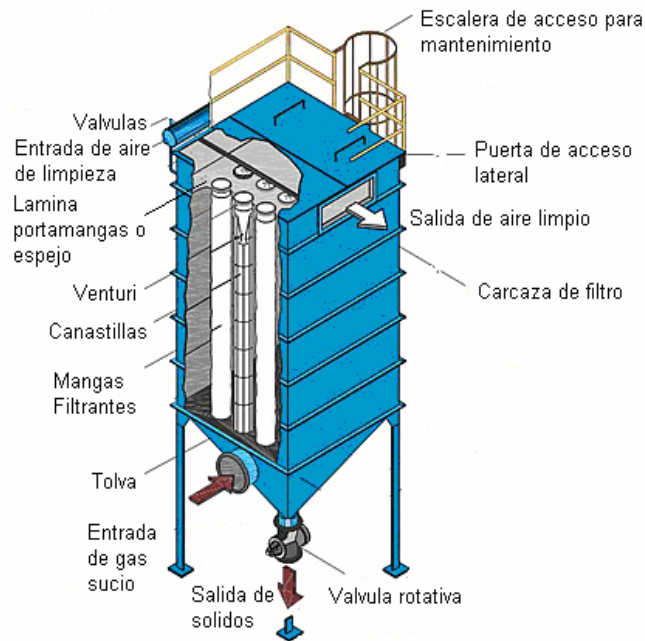


Figura 16. Partes constitutivas del filtro de mangas

4.1.3 Mangas Filtrantes. Son bolsas cocidas en forma de talega, en la boca tienen un fleje en acero, que al expandirse hace sello en la lámina portamangas; por lo que este tipo de mangas se denomina de fijación Snap Band. La selección de la tela se hace basándose en las propiedades de ésta, cada tela tiene una composición química diferente, por lo tanto su comportamiento varía de una a otra. En el Anexo B esta la tabla con los tipos de fibras y sus propiedades.

4.2 CALCULOS DEL FILTRO DE MANGA CON LIMPIEZA POR AIRE INVERSO

4.2.1 Balance de masa. Las principales características técnicas de la CCTA se describen a continuación:

Tabla 3. Composición másica de la CCTA

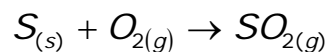
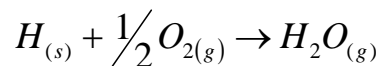
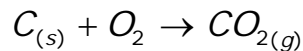
PROPIEDADES DE LA CCTA	
Poder calorífico (KJ/Kg)	25.968,0
Densidad (Kg/m ³)	1.060,5
Viscosidad (cp)	210 – 240
Tamaño partícula(μm)	13 – 14,2
COMPOSICIÓN CCTA	
Componente	Composición (% P/ P)
Carbono	58.01
Hidrógeno	5.56
Oxígeno	2.26
Nitrógeno	0.74
Humedad	30
Azufre	0.74
Cenizas	2.64
Total	100

La base de cálculo para el balance de materia se establece de acuerdo a: la energía aportada por el carbón en el seguimiento de cocción (460.524.709,40 KJ) [2], cuyo valor dividido entre el poder calorífico de la CCTA da como resultado la masa del combustible, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Calor suministrado al horno colmena por el carbón

Peso promedio 1 palada	3.8 Kg
Poder calorífico del carbón	28.243 KJ/Kg
Tiempo de quema	56 horas
Numero de paladas	4291
Consumo de carbón	16305.8 Kg
Calor añadido	460524709.40 KJ
BASE DE CALCULO CCTA (Kg/h)	430

Las reacciones estequiométricas para la combustión de la CCTA son:



Las cuales corresponden a las reacciones estequiométricas completas para la formación de productos finales como el agua (H₂O), dióxidos de carbono (CO₂) y de azufre (SO₂).

4.2.1.1 Cálculo del oxígeno requerido. Es el oxígeno mínimo necesario para las reacciones sin tener en cuenta el oxígeno que se encuentra presente en el combustible (ver Tabla 5).

Tabla 5. Oxígeno teórico

	REACCION	Kg/h	PESO MOL. (Kg/Kmol)	Kg mol/h	O ₂ Requerido (Kg mol/h)
C	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	249.43	12	20.78691667	20.78691667
H	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	23.908	2,02	11.83564356	5.917821782
O	-----	9.718	32	0.3036875	0.3036875
N	-----	3.397	28	-----	-----
S	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	3.182	32	0.0994375	0.0994375
OXIGENO REQUERIDO/TEORICO (Kgmol/h)					26.50048845

4.2.1.2 Cálculo del O₂ que entra. El porcentaje de exceso de aire recomendado para combustibles líquidos oscila entre 20 y 25%, por lo tanto, para este caso se trabaja con un 25 %, porque el combustible contiene carbón pulverizado. En la tabla 6 se pueden observar los requerimientos de aire.

$$\% \text{Aire} \cdot \text{en} \cdot \text{exceso} = \frac{O_2 \text{ entrando} \cdot \text{al} \cdot \text{proceso} - O_2 \text{ teórico} \cdot \text{requerido}}{O_2 \text{ teórico} \cdot \text{requerido}}$$

Tabla 6. Aire requerido

COMPONENTE	FRACCION MOLAR	Kg mol/h	PESO MOLE. Kg/Kg mol	Kg/h
N ₂	0,79	124.6153921	28	3489.230979
O ₂	0,21	33.12561056	32	1060.019538
FLUJO DE AIRE		157.7410027		4549.250517

4.2.1.3 Cálculo de los gases de combustión. Se calculan de acuerdo a las reacciones antes mencionadas. El agua (H₂O) que sale en los gases es la sumatoria del agua proveniente del aire, del combustible y la formada en la combustión. El nitrógeno (N₂) que sale en los gases de combustión es la sumatoria del proveniente del aire y del combustible. El oxígeno (O₂) que sale en los gases de combustión es el que no reacciona en la combustión de la CCTA (ver la tabla 7).

Tabla 7. Gases de combustión

COMPONENTE	Kg mol/h	PESO MOLE. (Kg/Kg mol)	(Kg/h)	(% P/ P)
CO ₂	20.78691667	44	914.6243333	18.41156603
SO ₂	0.0994375	64	6.364	0.12810856
H ₂ O	19.00231023	18	342.0415842	6.885363731
N ₂	124.7367135	28	3492.627979	70.30728171
O ₂	6.625122112	32	212.0039076	4.267679966
FLUJO MASICO P (Kg/h)			4967.661804	100

En las tablas 8, 9 y 10, se presenta el balance por elementos, la composición del gas orsat y las características del gas orsat; para de esta manera definir el flujo volumétrico, el cual será el caudal de diseño para el filtro de mangas.

Tabla 8. Balance por elementos

COMPONENTE	ENTRA		SALE
	F(Kg mol/h)	A (Kg mol/h)	(Kg mol/h)
Carbono	20.78691667	0	20.78691667
Nitrógeno	0.242642857	249.2307842	249.4734271
Oxígeno	7.774041667	66.25122112	74.02526279
Hidrógeno	38.0515873	0	38.00462046
Azufre	0.0994375	0	0.0994375

Tabla 9. Composición gas orsat

GAS DE COMBUSTION	(Kg mol/h)	COMPOSICION MOLAR	FRACCION MOLAR
CO ₂	20.78691667	13.65330957	0.136533096
N ₂	124.7367135	81.92985	0.8192985
O ₂	6.625122112	4.351527673	0.043515277
SO ₂	0.0994375	0.065312763	0.000653128
TOTAL	152.2481898	100	1

Tabla 10. Gas Orsat

GAS DE ORSAT	
Peso molecular gas orsat (kg/kmol)	30.38210323
Presión (Pa)	96850,70132
Temperatura (k)	533.15
CTE gas ideal (Pa*m ³ /kmol*k)	8314
Densidad gas de orsat (Kg/m ³)	0.663836566
Flujo volumétrico gas orsat (m ³ /h)	647.7497952

En la figura 17, se esquematiza el balance de masa en el horno colmena y el balance de masa en el filtro de mangas considerando: la eficiencia de recolección del 99.95% y que de las cenizas formadas en el horno colmena aproximadamente el 9% es arrastrado por los gases.

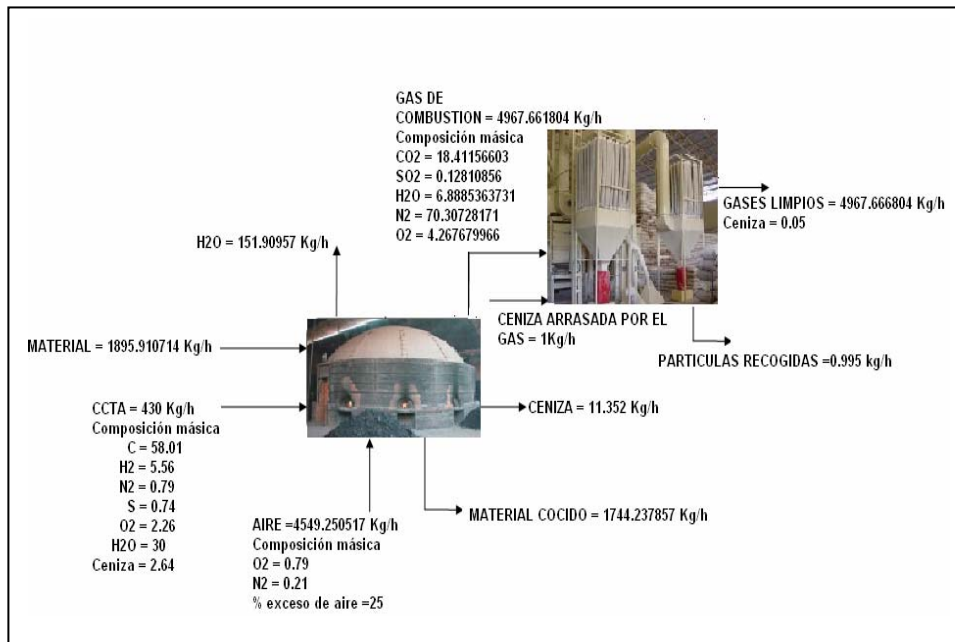


Figura 17. Balance de masa

4.2.2 Calculo del filtro de mangas. En la tabla 11 se establecen las variables necesarias para el diseño del filtro.

Tabla 11. Datos de entrada

DATOS DE ENTRADA	UNIDADES
Caudal requerido (ft ³ /min)	381,2511356
Concentración de partículas (g/ft ³)[22]	0.004
Temperatura promedio en la chimenea (°C)	260
Diámetro de partícula (µm)	5
Relación Gas a Tela (ft ³ /min/m ²) [10]	1.5
Diámetro de la manga (m)- (in)	(0.12) -(4.7244095)
Longitud de la manga (m) – (in)	(2) - (78.7401575)
Caída de presión del filtro (in H ₂ O)	5

En el caso del filtro de mangas con limpieza por aire inverso, la relación gas a tela se toma teniendo en cuenta la tabla en el Anexo C. Se toma $1.5 \text{ ft}^3/\text{min}/\text{ft}^2$.

4.2.2.1. Cálculo del área neta de filtración. El área neta de filtración es igual:

$$A_c = \frac{Q}{V}$$

Donde,

A_c = Área neta de filtración (ft^2)

Q = Caudal de gas a tratar ($\text{ft}^3/\text{min.}$)

V = Velocidad de Filtración o Relación gas-tela ($\text{ft}^3/\text{min}/\text{ft}^2$.)

Para el horno tipo colmena tenemos:

$$A_c = 254.1674237 \text{ ft}^2 = 23.61292633 \text{ m}^2$$

4.2.2.2. Selección del tipo de tela y dimensión de la manga Del Anexo B se selecciona el tipo de tela de acuerdo a la temperatura que está puede soportar. En este caso se escoge la fibra de vidrio.

4.2.2.3 Cálculo del número de mangas.

$$N_{Mangas} = \frac{A_c}{A_{Manga}} = 32$$

Para limpiar este flujo de gases son necesarias, 32 mangas.

4.2.2.4. Calculo del número de compartimientos. De acuerdo con la tabla 12. Se seleccionó el número de compartimientos teniendo en cuenta el área neta de filtración, para este caso el número de compartimientos es de: 2.

Tabla 12. No. De Compartimientos vs. Área Neta (ft²)

No. De compartimientos	Área neta, ft ²
2	1-4000
3	4001-12000
4-5	12001-25000
6-7	25001-40000
8-10	40001-60000
11-13	60001-80000
14-16	80001-110000
17-20	110001-150000

Adapted from Cooper and Alley, 2002

4.2.2.5. Calculo del Ventilador. El ventilador se utiliza para succionar la mezcla de aire y contaminante a través del filtro. Proporciona el caudal necesario para desarrollar las velocidades de captura en el ducto de la chimenea, como la presión necesaria para compensar la caída de presión. Se selecciono un ventilador centrífugo, con rotor de aspas planas inclinadas hacia atrás [23].

Tabla 13. Datos calculo de ventilador

Q (ft ³ /min.)	381,2511356
T (°C)[22]	260
Densidad ρ (lb/ft ³)	0.0414
Velocidad (ft/min)	3600
P _{estática} (in H ₂ O) [23]	0.25
Factor de corrección F[1]	1096

$$P_T = P_{estática} + P_v$$

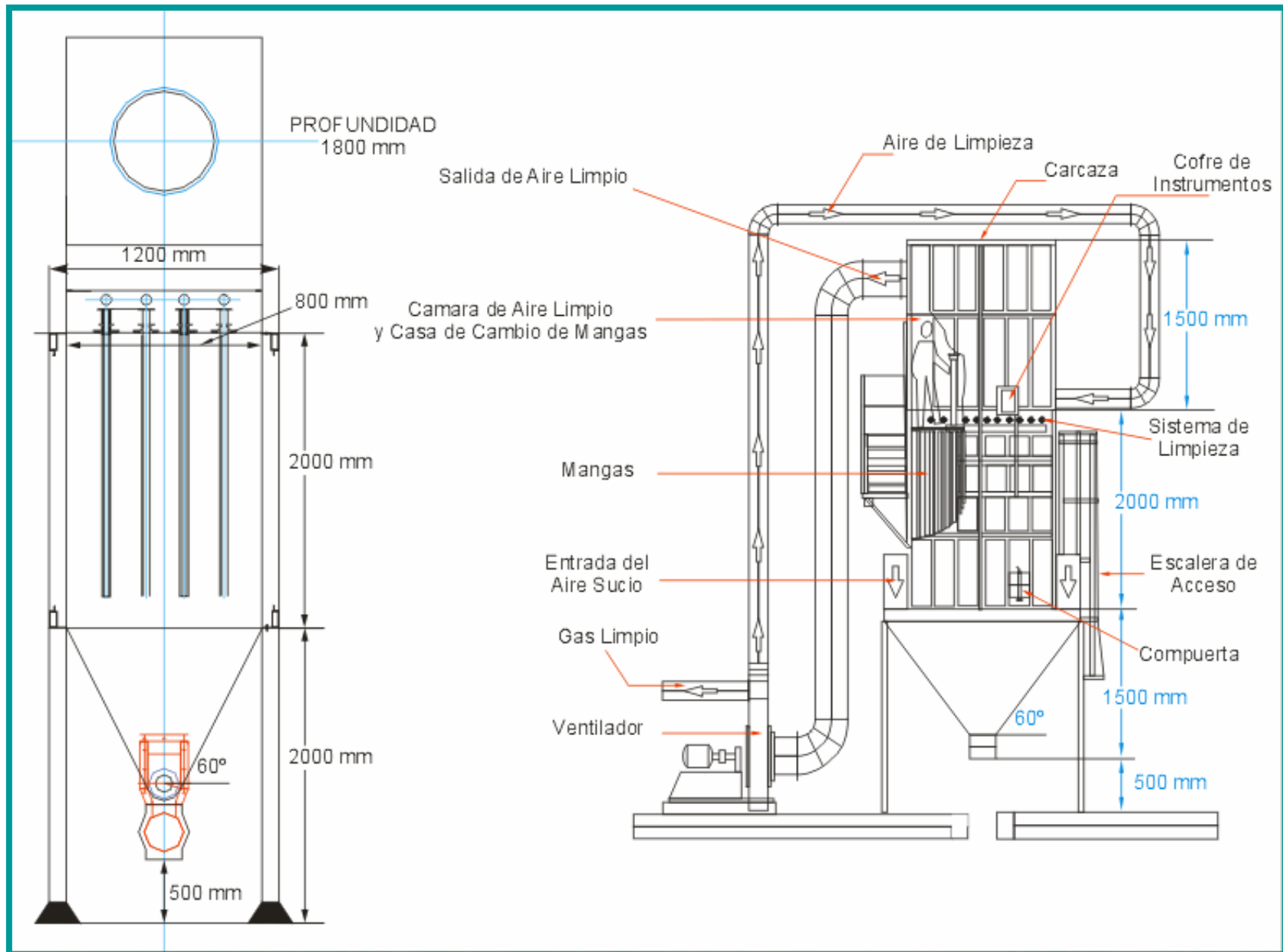
$$P_v = \left(\frac{V}{F} \right)^2 * \rho$$

$$P_{Total} = 0.70 \text{ in H}_2\text{O} = 18 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Con la presión total calculada y el caudal de aire a manejar se selecciono el ventilador cuya curva característica se presenta en el anexo D, de donde se tiene los siguientes datos de diseño.

- ❖ Eficiencia del ventilador 68%
- ❖ Velocidad especifica 1705 rpm
- ❖ Potencia del motor 0.07 hp

En la Figura 18. Se muestra el plano del filtro de mangas con sus respectivas dimensiones.



CONCLUSIONES

- La implementación de la dimensión ambiental en la operación de hornos colmena trae consigo ventajas sociales y económicas a largo plazo, pues mejora la calidad de vida de los habitantes de la región, reduce costos de transporte de carbón y permite a las empresas aumentar su competitividad y cumplir con las normatividades ambientales.
- La optimización del proceso de combustión, mediante el uso del combustible CCTA, en la medida en la que se mejora la eficiencia de combustión y la implementación de los filtros de mangas, minimiza el impacto ambiental de las emisiones de material particulado que normalmente conlleva el uso de carbón en hornos colmena.
- Entre las diferentes tecnologías de captación de material particulado se selecciono el filtro de mangas como la mejor opción, por su alta eficiencia de recolección en partículas finas ($PM < 2.5 \mu m$) y su sencilla operación.
- La instalación del filtro de mangas favorece el ahorro de energía ya que se recircula la corriente de gas, opera a bajas presiones y reduce la emisión de material particulado en valores tan altos como 99.95%.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación del filtro de mangas por su alta eficiencia de recolección, su sencilla operación y por que es buen candidato para recolectar las cenizas volantes de los carbones bajos en azufre o las cenizas volantes que contengan niveles altos de carbón sin quemar.
- Se podría implementar un sistema de enfriamiento de los gases de combustión, para mejorar la operación del filtro de mangas, pues esto permitiría la utilización de otro tipo de tela y a su vez, daría más vida útil a las mismas.
- La depuración de los gases de combustión debe ser completa, por tanto se debe incluir un mecanismo de limpieza de las emisiones de SO_x ya que todos los combustibles poseen cierto contenido de azufre; este sistema se debe colocar a continuación del filtro de mangas.
- Se debe considerar el montaje del equipo a escala piloto, para comprobar la efectiva recolección del material particulado de manera experimental.
- Se recomienda hacer un análisis económico para demostrar la viabilidad del proyecto, así como ya se observo la viabilidad técnica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALLEY E. Roberts & Associates, Inc. Manual de control de la contaminación del aire. México: McGraw – Hill, 2001. Tomo 1. p2.5, 2.19-2.21. Tomo 2. p 18.20-18.25, 19.1-19.7, 19.11-19.15.
- [2] BUSTOS GOMEZ Ana Cecilia Y GUEVARA LIZCANO Elsy Yadira. Evaluación comparativa técnica, económica y ambiental de hornos colmena utilizando como combustible carbón, fuel oil, gas natural y el nuevo combustible tipo CCTA. San José de Cúcuta, 2006. Trabajo de grado (Ingeniero de Producción Industrial). Universidad Francisco de Paula Santander. Facultad de Ingenierías.
- [3] CASTRO MORA, Javier. Operación y mantenimiento de calderas. Bogotá: Unidad de publicaciones Universidad Nacional, 2002. 245 p.
- [4] CORREA Luis Fernando. Balance de materia en procesos de ingeniería química y metalúrgica. Bucaramanga: 1997. 324 p.
- [5] DECRETO 2811 DE 1974. Por el cual se dicta el código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente.
- [6] DECRETO 02 DE 1982. En este decreto se incluyen especificaciones sobre las normas, límites y restricciones de la calidad del aire para fuentes fijas.
- [7] DECRETO 948 DE 1995. Este Decreto tiene por objeto definir el marco de las acciones y los mecanismos administrativos de que disponen las autoridades ambientales.
- [8] DE NEVERS, Noel. Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw-Hill, México 1995. p 183-188, 226-262, 285.

[9] EPA, 1998, U.S. EPA. Documento de técnicas de control de materia particulada fina proveniente de fuentes estacionarias. EPA-452/R-97-001, octubre 1998.

[10] EPA, 2002, U S. EPA. Manual de costos de control de contaminación del aire. Sexta edición. EPA 452/B-02-002, junio 2002.

[11] EPA, CICA. Hoja de datos de control. Tecnología de control de contaminantes del aire. EPA-452/f-03-061. pàg 1-4 .

[12] GROSSO, VARGAS Jorge Luis. On-line and/or batch process for production of fuel mixtures consisting of coal/asphaltenes, fuel oil/heavy crude oil, surfactant and water (CCTA), and the obtained products. United States patent. 5902359.

[13] HIMMELBLAU, David M. Principios básicos y cálculos en Ingeniería Química. 6 ed. México: Prentice Hall, 1997. p. 642 – 647, 657 – 658, 661 – 669.

[14] HOUGEN, O. A. WATSON, K. M. y RAGATZ, R. A. Principios de los procesos químicos: Balances de materia y energía. España: Reverté, 1974. v. 1. p.205 – 209, 248 – 295.

[15] LEY 23 DE 1973. Tiene como fin la prevención y el control de la contaminación del medio ambiente.

[16] LEY 09 DE 1979. Establece las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar u mejorar las condiciones necesarias en lo que se relaciona a la salud humana.

[17] PABON LATORRE, Ranses Eduardo y PATIÑO, Lennin. Estudio de la operación de hornos colmena utilizando combustible líquido en la empresa Fortres en Ureña Estado Táchira Venezuela. San José de Cúcuta, 2001, 122 p. Trabajo

de grado (Tecnólogo Químico). Universidad Francisco de Paula Santander. Facultad de Ingenierías.

[18] PERRY, Robert H., GREEN, Don W. y MALONEY, James O. Manual del Ingeniero Químico. México: Mc Graw Hill, 1992. p. 20.87-20.99, 20.110-20.119.

[19] RESOLUCIÓN 898 DE 1995. Por la cual se regulan los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial.

[20] ROSS, R D. La industria y la contaminación del aire. 1ed. México: Diana, 1974. p 274-278, 316-348, 380-420.

[21] SELECCIÓN DE CARBONES PARA LA APLICACIÓN DEL COMBUSTIBLE TIPO CCTA EN HORNOS DE CERAMICA DENTRO DE ESQUEMAS DE PRODUCCION LIMPIA Y USO RACIONAL DE ENERGIA-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ, SANTANDER Y NORTE DE SANTANDER.

[22] SGS. Estudios de Emisiones Atmosféricas de la Ladrillera CasaBlanca S.A. 2006.

[23] VALENCIA J. Hugo A. Dinámica de los fluidos aplicada a la ingeniería química. Bucaramanga, publicaciones UIS, 283 p.

[24] WARK, Keneth et al. Contaminación del Aire. Origen y Control. Limusa Noriega Editores. Cuarta edición México, 1997. p 18-22, 194-204, 233-251, 270-277, 281-292, 300-304.

[25] UPME. Determinación de la eficiencia energética del subsector industrial de ladrillo, vidrio y cerámica, octubre 2001

ANEXO A DECRETO 02 /82

A continuación se enuncia la norma de emisión de material particulado para las industrias diferentes a las reguladas en los artículos 48, 54, 62 y 66 del decreto 02 de 1982 (Calderas a base de Carbón, Industria del cemento, industrias metalúrgicas, Plantas productoras de asfalto), en la cual está incluida la industria productora de ladrillo.

Artículo 70: Normas de Emisión para Otras Industrias. Las industrias distintas de las específicamente reguladas en los artículos 48, 54, 62 y 66 del decreto 02 de 1982 , no podrán emitir al aire ambiente, partículas en cantidades superiores a las señaladas en las siguientes normas de emisión:

Tabla A1. Norma de Emisión para otras industrias

Producción horaria en toneladas de producto terminado	Zona Rural Kilos/hora	Zona Urbana Kilos/hora	Altura de referencia (mts).
0.1	3.01	1.50	15
0.5	5.96	2.98	15
1.0	8.00	4.00	15
2.0	14.67	7.33	15
3.0	20.92	10.46	15
4.0	26.91	13.45	15
5.0	32.71	16.36	15
10.0	60.00	30.00	20
20.0	79.82	41.21	20
30.0	94.32	49.62	25
40.0	106.17	56.60	25
50.0	116.39	62.70	30
100.0	154.91	86.20	35
200.0	205.93	118.30	40
300	243.33	142.42	50
400	273.92	162.50	60
500 o más	300.27	180.00	70

Parágrafo 1: La norma de emisión a que se refiere el presente artículo, está señalada en kilos de partículas por hora.

Parágrafo 2: Los valores están indicados para ubicación de fuentes a nivel del mar y para alturas del punto de descarga iguales a la ALTURA DE REFERENCIA señalada. Cuando la fuente esté ubicada a una altitud diferente a la del nivel del mar, los valores señalados se deberán multiplicar por el factor K, indicado en el artículo 42 (Se encuentra al final de este anexo).

Parágrafo 3: Cuando la altura del punto de descarga sea diferente a la ALTURA DE REFERENCIA, pero igual o superior a la ALTURA MINIMA CORRESPONDIENTE, los valores de la norma de emisión señalada en el presente artículo, deberán ser corregidos adicionando cuando sea mayor, o restando cuando sea menor, una cantidad E , por cada metro de aumento o disminución que tenga el punto de descarga. Los valores de corrección E y la ALTURA MINIMA del punto de descarga, se indican en el artículo 74.

Artículo 71: Interpolación de los diferentes valores de normas de emisión en otras industrias. La interpolación de los diferentes valores de las normas de emisión, está señalada por las siguientes ecuaciones, para las zonas indicadas:

Tabla A2 Ecuaciones para interpolación de valores de la norma de emisión.

Máxima emisión permisible de partículas (kilos/Ton)		Máxima producción horaria (Ton/día)
a. Zona Rural		
E = 3.0		P < 0.1
E = 8	P0.425	0.1 < P < 1.0
E = 8	P0.875	1.0 < P < 10.0
E = 23.26	P0.4116	10 < P < 500
b. Zona Urbana		
E = 1.5		P < 0.1
E = 4.0	P0.425	0.1 < P < 1.0
E = 4.0	P0.875	1.0 < P < 10.0
E = 10.45	P0.4116	10 < P < 500

E = Máxima emisión permisible de partículas, expresada en kilos por hora.

P = Máxima producción horaria.

Artículo 72: Excepciones al cumplimiento de las normas de emisión en otras industrias. El Ministerio de Salud establecerá los períodos durante los cuales no es obligatorio, para las industrias a que se refiere el artículo 70 del Decreto 02 de 1982, el cumplimiento, de las normas de emisión de partículas.

Artículo 73: Responsables de las emisiones en las industrias no reguladas en los artículos anteriores. Los propietarios de industrias distintas de las específicamente reguladas en los artículos 48, 54, 62 y 66 del presente Decreto, que emitan al aire partículas en cantidades superiores a las señaladas en el presente Decreto, serán responsables de tales emisiones.

Artículo 74: Factores de corrección de las normas de emisión para otras industrias. Los factores de corrección de las normas de emisión para otras industrias distintas de las específicamente reguladas en los artículos 48, 54, 62 y 66 de este Decreto, con puntos de descarga cuya altura sea diferente a la ALTURA DE REFERENCIA, son los siguientes:

Tabla A3. Factores de corrección para normas de emisión para otras industrias

Producción horaria en toneladas de producto terminado	Reducción o adición por cada metro de aumento o disminución de altura de emisión (ΔE).		Altura mínima del punto de descarga (Mts.)
	Zona Rural Kg/hr.	Zona Urbana Kg./hr.	
0.1 – 5.0			15
5.0 – 20.0			20
30.0	3.8	2.80	20
40.0	4.2	3.20	20
50.0	4.7	3.50	25
100.0	6.2	4.60	30
200.0	8.2	6.20	35
300.0	4.9	3.60	40
400.0	3.7	2.70	45
500.0	3.0	2.25	50

Artículo 75: Ecuación para calcular la descarga permisible en otras industrias. Para calcular la descarga permisible de partículas emitidas por las fuentes fijas a que se refiere el artículo 70 modificada por el factor E , se aplicará la siguiente ecuación:

$$E1 = E + (\Delta h \times \Delta E)$$

Parágrafo: Para los efectos de la ecuación a que se refiere el presente artículo, adóptense las siguientes convenciones:

E1: Emisión permisible corregida, para otras industrias con un punto de descarga de altura h , diferente a la ALTURA DE REFERENCIA.

E: Emisión permisible señalada en el artículo 70 modificada por altitud sobre el nivel del mar, si es del caso.

Δh : Diferencia en metros, entre la ALTURA DE REFERENCIA y la altura del punto de descarga.

ΔE : Factor de corrección dado en el artículo 74.

Artículo 42: Factores de modificación. Señálense los siguientes factores de modificación de emisiones para fuentes fijas artificiales localizadas a diferentes altitudes sobre el nivel del mar:

Tabla A4 Factores de modificación K

Altura sobre el nivel del mar (metros)	Factor de modificación (K)
500	0.969
750	0.954
1.000	0.939
1.250	0.923
1.500	0.908
1750	0.893
2.000	0.878
2.250	0.862
2.500	0.847

Artículo 43: Fórmula para aplicar el factor de modificación. Cuando la fuente fija artificial esté ubicada a una altitud diferente de la del nivel del mar o de las señaladas en el artículo anterior, la norma de emisión en las condiciones de referencia, se deberá modificar multiplicándola por un factor K, aplicando para los efectos la siguiente fórmula:

$$K = \frac{pbh}{760+0.4H}$$

Parágrafo: Para la aplicación de la fórmula a que se refiere el presente artículo establécense las siguientes convenciones:

K = Factor de modificación por altitud.

pbh = Presión barométrica del lugar; en milímetros de mercurio.

H = Altitud sobre el nivel del mar, en miles de metros.

Referencias Legislativas y Técnicas sobre atmósfera y espacio aéreo. A continuación se enuncian los decretos y resoluciones sobre aire y medio ambiente, como complemento de la norma mencionada anteriormente y con el fin de ampliar más la información en lo que respecta a normatividad de contaminación atmosférica.

- ❖ Decreto 2811 de 1974: Código de Recursos Naturales: Artículos 73-76.
- ❖ Decreto 02 de 1982: Especificaciones sobre las normas, límites y restricciones de la calidad del aire para fuentes fijas.
- ❖ Decreto 2206 de 1983: Reglamenta el Capítulo XVI del Decreto 02/82.
- ❖ Resolución 031194 de 1983 MINSALUD.
- ❖ Resolución 019622 de 1985 MINSALUD.
- ❖ Resolución 02308 de 1986 MINSALUD: Procedimiento para el análisis de calidad del aire.
- ❖ Ley 30 de 1990: Aprueba el Convenio de Viena sobre la capa de Ozono.
- ❖ Decreto 948 de 1995: Reglamenta la ley 99 sobre contaminación atmosférica.
- ❖ Resolución 0898 de 1995 AMB: Reglamenta el Decreto 948 de 1995 sobre calidad de combustibles.
- ❖ Ley 23 de 1973: Prevención y control de la contaminación del medio ambiente.
- ❖ Ley 09 de 1979: Procedimientos y medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos.
- ❖ Ley 99 de 1993: Se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE.

ANEXO B. Tipos de fibras y sus propiedades [10]

Tela	Temperatura °F ^b	Resistencia al Ácido	Resistencia a los Alcalíes	Abrasión Flex
Algodón	180	Deficiente	Muy Buena	Muy Buena
Creslan ^c	250	Buena en ácidos minerales	Buena en alcalí débil	Buena a Muy Buena
Dacron ^d	275	Buena en la mayoría de los ácidos minerales, se disuelve parcialmente en H ₂ SO ₄ concentrado	Buena en alcalí débil, Mediana en alcalí fuerte	Muy Buena
Dynel ^e	160	Poco efecto aún en concentración alta	Poco efecto aún en concentración alta	Mediana a Buena
Fiberglas ^f	500	Mediana a Buena	Mediana a Buena	Mediana
Filtron ^e	270	Buena a Excelente	Buena	Buena a Muy Buena
Membrana de	Depende del forro	Depende del forro	Depende del forro	Mediana
Nextel ^g	1400	Muy buena	Buena	Buena
Nomex ^d	375	Mediana	Excelente a temperatura baja	Excelente
Nylon ^d	200	Mediana	Excelente	Excelente
Orlon ^d	260	Buena a Excelente en ácidos minerales	Mediana a Buena en alcalíes débiles	Buena
P84 ^h	475	Buena	Buena	Buena
Polipropileno	200	Excelente	Excelente	Excelente
Ryton ⁱ	375	Excelente	Excelente	Buena
Teflón ^d	450	Inerte excepto al fluoro	Inerte excepto al trifluoruro, el cloro y los metales alcalinos derretidos	Mediana
Lana	200	Muy buena	Deficiente	Mediana a Buena

ANEXO C. Relaciones gas a tela (ft³/min/ft²) [10]

Polvo	Agitador/Tela Tejada Aire a la Inversa/Tela Tejada	Chorro a Pulso/Tela de Felpa Aire a la Inversa/Tela de Felpa
Oxido de Aluminio (Alúmina)	2.5	8
Asbesto	3.0	10
Bauxita	2.5	8
Carbón Negro	1.5	5
Carbón	2.5	8
Cacao, Chocolate	2.8	12
Arcilla	2.5	9
Cemento	2.0	8
Cosméticos	1.5	10
Residuo de Esmalte	2.5	9
Alimento de Ganado, Granos	3.5	14
Feldspar	2.2	9
Fertilizante	3.0	8
Harina	3.0	12
Ceniza Flotante	2.5	5
Grafito	2.0	5
Yeso	2.0	10
Mineral de Hierro	3.0	11
Oxido Férrico	2.5	7
Sulfato Férrico	2.0	6
Oxido de Plomo	2.0	6
Polvo de Piel	3.5	12
Cal	2.5	10
Piedra Caliza	2.7	8
Mica	2.7	9
Pigmentos de Pintura	2.5	7
Papel	3.5	10
Plásticos	2.5	7
Quarzo	2.8	9
Polvo de Piedra	3.0	9
Arena	2.5	10
Aserrín (Madera)	3.5	12
Sílice	2.5	7
Loza	3.5	12
Detergentes, Jabón	2.0	5
Especies	2.7	10
Almidón	3.0	8
Azúcar	2.0	13
Talco	2.5	5
Tabaco	3.5	
Oxido de Zinc	2.0	

^aReferencia[1]

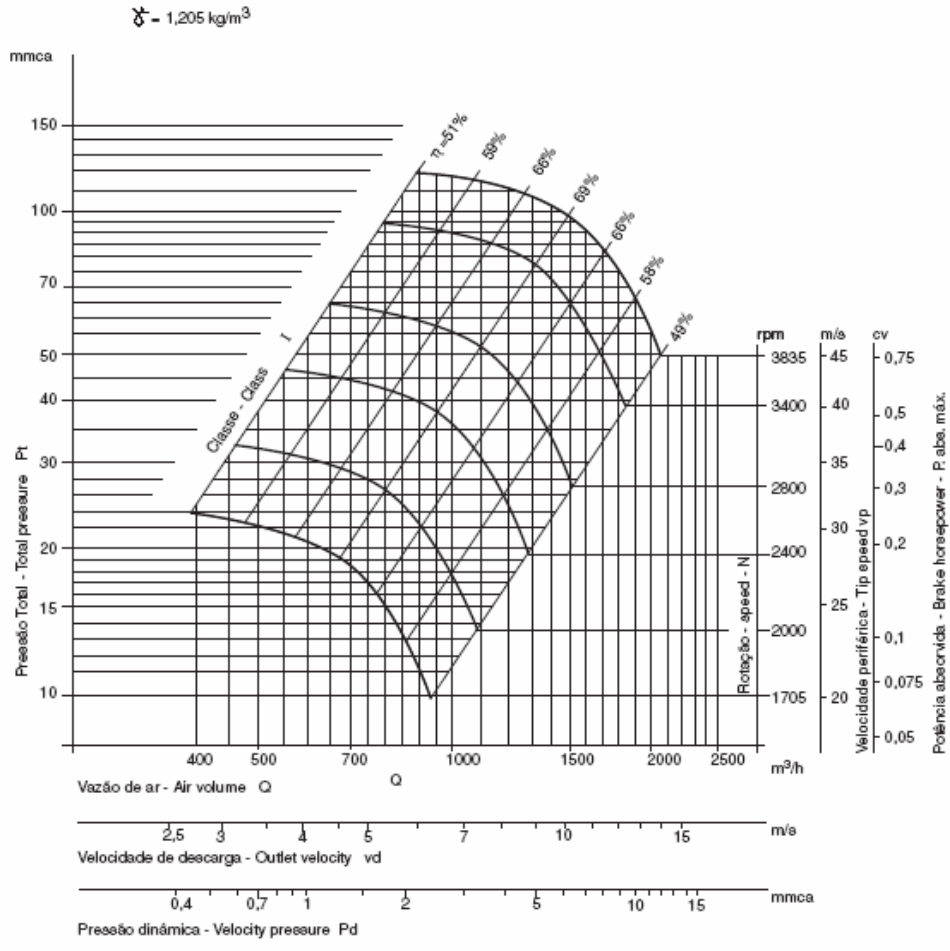
^bValores de diseño generalmente seguros; su aplicación requiere la consideración del tamaño de las partículas y cargado de grano.

ANEXO D. Curva característica del ventilador

RLS 224



O desempenho mostrado é para instalação tipo B - aspiração livre / descarga dutada (ANSI/AMCA Standard 210-85 figura 7). Os dados de desempenho não incluem os efeitos ocasionados por restrições, obstáculos ou acessórios colocados no fluxo de ar. A potência absorvida (cv) não inclui as perdas da transmissão.



Diâmetro do rotor Impeller diameter	D = 224 mm		ϕ = 224 mm	
			A = 0,039 m ²	
Momento de inércia Moment of inertia	GD ² = 0,015 kg.m ²		BxC = 180 x 224 mm	
			A = 0,040 m ²	