



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**Análisis Económico de la Captación de Polvo
con Precipitadores Electrostáticos en la
Industria del Cemento.**

Joaquín Godínez Hernández

INGENIERO QUÍMICO

MEXICO, D. F.

1977



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ANEXO 1



CLAS. TESIS
A. Q.
FECHA 1977
PROC. 177

... de la ...
...
...



QUIMICA

...

...

Jurado Asignado originalmente:

Presidente : Prof. Ramón Vilchis Zimbrón.

Vocal : Prof. Eduardo Rojo y De Regil.

Secretario : Profra. Graciela Martínez Ortiz.

1er. Suplente: Prof. Jorge Mencarini Peniche.

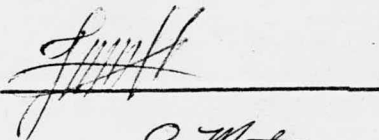
2do. Suplente: Prof. Arturo Morales Collantes.

Sitio donde se desarrolló el tema:

Cementos Tolteca S.A. , Div. Tolteca Hgo.

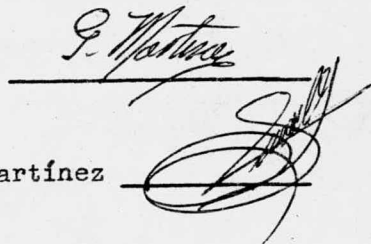
Sustentante:

Joaquín Godínez Hernández



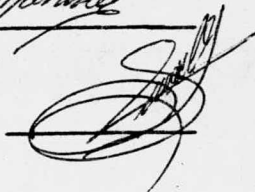
Asesor del tema:

Profra. Graciela Martínez Ortiz



Supervisor Técnico:

I.Q. Francisco Javier Sánchez Martínez



Como muestra de cariño y
agradecimiento para mis-
padres:

Sr. Leopoldo Godínez O., y
Sra. Leonila Hernández de Godínez

por su ayuda y comprensión

A mis hermanos:

ELFEGO, ALICIA, SALVADOR,
AGRICOL, MA. ENCARNACION,
LEOPOLDO v ALEJANDRA,

por su completo apoyo.

A:
CEMENTOS TOLTECA

y a su personal por las
facilidades brindadas.

Y a todas aquellas personas
que de alguna forma intervi-
nieron en mi formación pro-
fesional.

INDICE

	Página
<u>INTRODUCCION</u>	1
<u>CAPITULO I</u> DESCRIPCION DEL PROCESO	4
I.1 Cemento Portland vía Húmeda	4
I.2 Cemento Blanco vía - Seca	13
<u>CAPITULO II</u> EQUIPOS DE RECOLECCION	19
II.1 Mecanismos y caracte rísticas generales	20
II.2 Especificaciones pa ra la selección de - un colector de polvo	22
II.3 Separación por grave dad	24
II.4 Separación por iner cia	28
II.5 Separación por fil - tración	35
II.6 Separación por lava do	40
II.7 Separación por preci pitación electrostá tica	48
II.8 Separación por preci pitación térmica	48
II.9 Separación por aglo meración sónica	49
<u>CAPITULO III</u> PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS	51
III.1 Descripción y tipos de precipitadores	52
III.2 Operación	65
III.2.1 Fundamentos - teóricos	65
III.2.2 Principios de operación	80

III.2.3	Manejo del --- precipitador	90
III.2.4	Problemas comu nes	92
III.3	Aplicaciones; ventajas y desventajas	94

CAPITULO IV ANALISIS ECONOMICO 97

IV.1	Proceso Vfa Húmeda	100
IV.1.1	Costos Fijos	100
IV.1.2	Costos Varia- bles	117
IV.1.3	Distribución de costos por grupo	138
IV.1.4	Consumos uni- tarios	141
IV.2	Proceso Vfa Seca	143
IV.2.1	Costos Fijos	143
IV.2.2	Costos Varia bles	155
IV.2.3	Distribución de costos por grupo	161
IV.2.4	Consumos uni- tarios	163
IV.3	Aprovechamiento del - polvo	165
IV.3.1	Proceso Vfa - Húmeda	165
IV.3.2	Proceso Vfa - Seca	174

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 179

CAPITULO VI BIBLIOGRAFIA 183

I N T R O D U C C I O N

El precipitador electrostático, eléctrico o electrofiltro, fué inventado en 1910 por Frederic Gardner Cottrel mientras era instructor en la Universidad de California. Precipitadores eléctricos han sido aplicados a una gran variedad de problemas de limpieza de gases con eficiencia de colección tan altas como 99.9% a capacidades hasta 115,000 m³/min y a temperaturas hasta de 540°C. En 1970 había más de 5,000 instalaciones en E. U. limpiando 20 millones de m³/min de gas, originado en termoeléctricas, incineradores e industria, una inversión en limpieza de aire mayor de 12,000 millones de pesos.

Un precipitador eléctrico separa partículas de material provenientes de una corriente de gases, primero cargando el polvo usando un voltaje negativo de alrededor de

50,000 V, precipitandolo sobre electrodos colectores aterrizados, después bajando el polvo aglomerado a una tolva. A pesar de los altos voltajes usados, el consumo de energía es bajo y su pérdida de tiro es 1.27 cm de agua, la más baja de todos los colectores de alta eficiencia. ✓

La industria cementera emplea ampliamente precipitadores eléctricos en la limpieza de los gases provenientes de los hornos rotatorios, por sus ventajosas características frente a otros equipos de captación de polvo. ✓

✗ El tener un equipo de limpieza de gases implica gastos en materiales, energía y personal que incrementan los costos de producción. Pero.... ¿Cuánto y cómo se gasta en estos Equipos? ✗

✗ Es objetivo de este trabajo contestar esas preguntas y establecer cual de los dos procesos de fabricar cemento (Vfa Humeda y Vfa Seca) es mejor, desde este punto de vista. ✗

C A P I T U L O . I

DESCRIPCION DEL PROCESO

DESCRIPCION DEL PROCESO

1.1

CEMENTO PORTLAND POR VIA HUMEDA

Existen 6 operaciones bien definidas en la fabricación de cemento por este método:

1. Cantera de piedra caliza
2. Cantera de arcilla
3. Preparación de crudo
4. Producción de clinker
5. Acabado
6. Envase

1. Cantera de piedra caliza. Los trabajos que aquí se efectúan son:

- a) Explotación

b) Trituración

c) Transporte a planta

El método desarrollado en la explotación es a cielo abierto, por bancos; las "tronadas" que se llevan a cabo son con cargas de dinamita, colocadas en cada uno de los barrenos practicados.

La barrenación se hace con perforadoras neumáticas en forma vertical y horizontal, con profundidades hasta de 25 m.

Después de efectuada la "tronada", el material es colocado en vehículos especiales con la ayuda de palas mecánicas, para ser trasladado a la primera etapa de trituración.

La piedra caliza, en grandes trozos, es descargada en una trituradora de pilón giratorio, entrando de un tamaño desde 1.50 m hasta 0.5 m, siendo reducida a una medida de 0.25 m.

La segunda etapa, se hace en una trituradora de cono giratorio, que produce un material de 0.06 m a 0.03 m, para ser enviado a la fábrica.

El acarreo se realiza con equipo de tracción en algunos casos; en esta fábrica se emplea una gigantesca banda transportadora de 3 km de longitud, que deposita el material para la tercera etapa de trituración en la que entra la caliza también a una trituradora de cono para disminuir más el tamaño de la piedra hasta 0.02 m.

De esta última reducción de tamaño, la caliza se transporta hacia los depósitos de materia prima, quedando en condiciones de poderse alimentar a los molinos de crudo.

2. Cantera de arcilla. El desarrollo es semejante al anterior; habiendo una subdivisión que es la siguiente:

- a) Explotación
- b) Trituración
- c) Molienda
- d) Envío a la fábrica

La explotación se realiza practicando barrenos manualmente, que alcanzan profundidades hasta 5 m, suficiente para llevar a cabo las "tronadas", usando también el

sistema de "bancos".

Después el material se transporta a una trituradora de martillos para alimentarlo a los molinos de arcilla.

El desleimiento se efectúa en dos molinos lavadores de tipo chileno. Al entrar el material aquí se le adiciona un cierto volúmen de agua, que al hacer contacto con la arcilla forma una pasta, la que se despide con una fuerza centrífuga contra la cara de tamices, mediante un sistema de viguetas, "vientos", y rastras colocados en una forma circular, pendiendo de una flecha que gira excéntricamente a gran velocidad.

El material desleido por impacto, sale hacia una fosa para de aquí ser enviado a la fábrica por un sistema de bombas con descarga en los mezcladores de arcilla.

3. Preparación de crudo. Cuando la piedra caliza y la arcilla están en condiciones de poderse utilizar, se procede a la preparación de crudo, mezclando porcentajes convenientes de cada una de las materias primas.

Para esta operación se cuenta con cinco molinos de crudo, cuatro para alimentarlos con piedra caliza y uno para arcilla.

El tipo de molinos empleados es el de bolas de acero-cromo ó acero-manganeso, con un emplacado en su interior para protección de la coraza; actuando a su vez como elevadores del material y de la carga.

Tienen sub-divisiones, generalmente dos ó tres, - practicadas con diagramas ranurados pra permitir el paso del producto triturado, a medida que recorren los diferentes compartimientos.

Cada uno de estos compartimientos tiene su carga diferente con bolas de 8.89 cm hasta 2.54 cm. de diámetro.

Los molinos de bolas comunmente se soportan en muñones axiales huecos, a través de los que se alimenta la materia prima al cilindro, del cual se descarga el producto.

La dosificación se hace en la siguiente forma:

La piedra caliza se alimenta mediante básculas dosificadoras adicionándole a la cantidad de agua necesaria y la arcilla se regula a través de una válvula controladora de flujo.

El producto, de los cinco molinos se mezcla en una fosa común, para formar lo que se conoce como "crudo".

Este crudo es bombeado a unos tanques almacenadores de pasta, contando para la homogeneización con un sistema de agitación neumático. Aquí el Laboratorio hace su muestreo y determina si el tanque está dentro de las especificaciones establecidas por la fábrica, como son: CARBONATO, FINURA Y HUMEDAD.

Reuniendo estas condiciones el producto se bombea a otro sistema de tanques, para otra homogeneización y también, si necesita alguna corrección la pasta, se hace en este paso. De aquí el crudo se deposita en unos tanques mezcladores, también con agitación neumática; para alimentarse posteriormente con bombas centrífugas a los hornos rotatorios.

4. Producción de clinker. Este proceso se desarrolla en hornos rotatorios; que tienen la forma de grandes cilindros de acero y están provistos de quemadores especiales para petróleo crudo o para gas, y forrados interiormente de tabique refractario para resistir las elevadas temperaturas, las cuales alcanzan hasta 1450°C que son necesarios para calcinar el material crudo y obtener el cemento portland.

Las dimensiones varían desde 2 hasta 5 m de diámetro y desde 25 hasta 130 m de longitud.

Sus producciones fluctúan entre 80 a 2,000 ton por día de clínker cada uno.

Los hornos tienen una inclinación como de un 4% con relación a la horizontal, y la mezcla cruda se alimenta por la parte superior donde la temperatura es aproximadamente de 300°C; conforme desciende encuentra temperaturas más elevadas, hasta alcanzar 1450°C cerca del extremo inferior, donde descarga en un estado de semi-fusión o pastoso que hace posible la formación de aglomerados esféricos aproximadamente de 1 a 6 cm de diámetro, designados con el nombre de "clínker".

Este clínker al salir del horno está al rojo blanco, pasa a un enfriador provisto de una parrilla inclinada, constituida por una serie de placas metálicas alternadas, fijas y móviles mediante un excéntrico, que provocan la circulación del material.

Esta parrilla va encerrada en una caja forrada de tabique refractario, que la envuelve completamente. El aire necesario para enfriar el clínker proviene de un ventilador

dor, el cual es inyectado en el espacio comprendido entre el fondo de la caja y la parrilla o sea por debajo de la misma. El aire pasa por las rendijas de la parrilla, atraviesa la capa de clínker que transporta la misma, el cual le cede calor, se enfría y se descarga a la salida a una temperatura inferior a 100°C.

Las partículas grandes son desmenuzadas por una trituradora de martillos. Una cortina de cadenas impide la proyección del clínker hacia la parte alta del enfriador.

El aire caliente, a 550-650°C, entra al horno como aire secundario, con lo cual el calor del clínker es aprovechado en la combustión.

El clínker se transporta a los depósitos para de aquí ser alimentado mediante el auxilio de una grúa viajera, a cada una de las tolvas de los cinco molinos de cemento.

Usualmente, en los hornos de proceso húmedo, la primera sección de la alimentación está constituida por un sistema de cadenas soldadas a la coraza, actuando como una zona de pre-calentamiento para recuperar calor y hacer el sistema térmico más eficiente.

5. Acabado. Es la etapa final para la obtención del cemento portland. Esta operación se realiza en molinos de bolas similares a los antes descritos para la producción del material crudo.

Cuentan además con un colector de polvo auxiliar en el buen funcionamiento del molino.

El clínker se alimenta mediante básculas dosificadoras; así como también el yeso; esta regulación es controlada por el Laboratorio, en los porcentajes convenientes de cada material, para obtener un producto de buena calidad.

Una correcta adición de yeso regula el fraguado del cemento Portland, sube su resistencia y reduce su contracción por resecamiento del cemento, impidiendo la rápida formación de compuestos que dificultan su más completa hidratación y endurecimiento.

El material finamente molido, al salir de los molinos de cemento se conduce a los silos de almacenamiento; -

para de aquí ser distribuido al mercado.

6. Envase. El trabajo que desarrolla este departamento, consiste en despachar el cemento ya sea a granel o en sacos.

Estos sacos se llenan mediante una envasadora automática; con un sistema neumático se efectúa el llenado de cada uno de ellos con su contenido normal de 50 kg; la envasadora cuenta con doce básculas.

El cemento ya envasado se distribuye a los consumidores; por medio de furgones de ferrocarril o de camiones - que lo transportan a las diferentes construcciones.

En la Figura No. D.1 se muestra un diagrama del proceso de fabricación del Cemento Portland.

I.2 CEMENTO BLANCO POR VIA SECA

Al igual que el proceso del cemento portland por Vía Húmeda, se distinguen 6 operaciones en su fabricación:

1. Cantera de piedra caliza (alto carbonato)

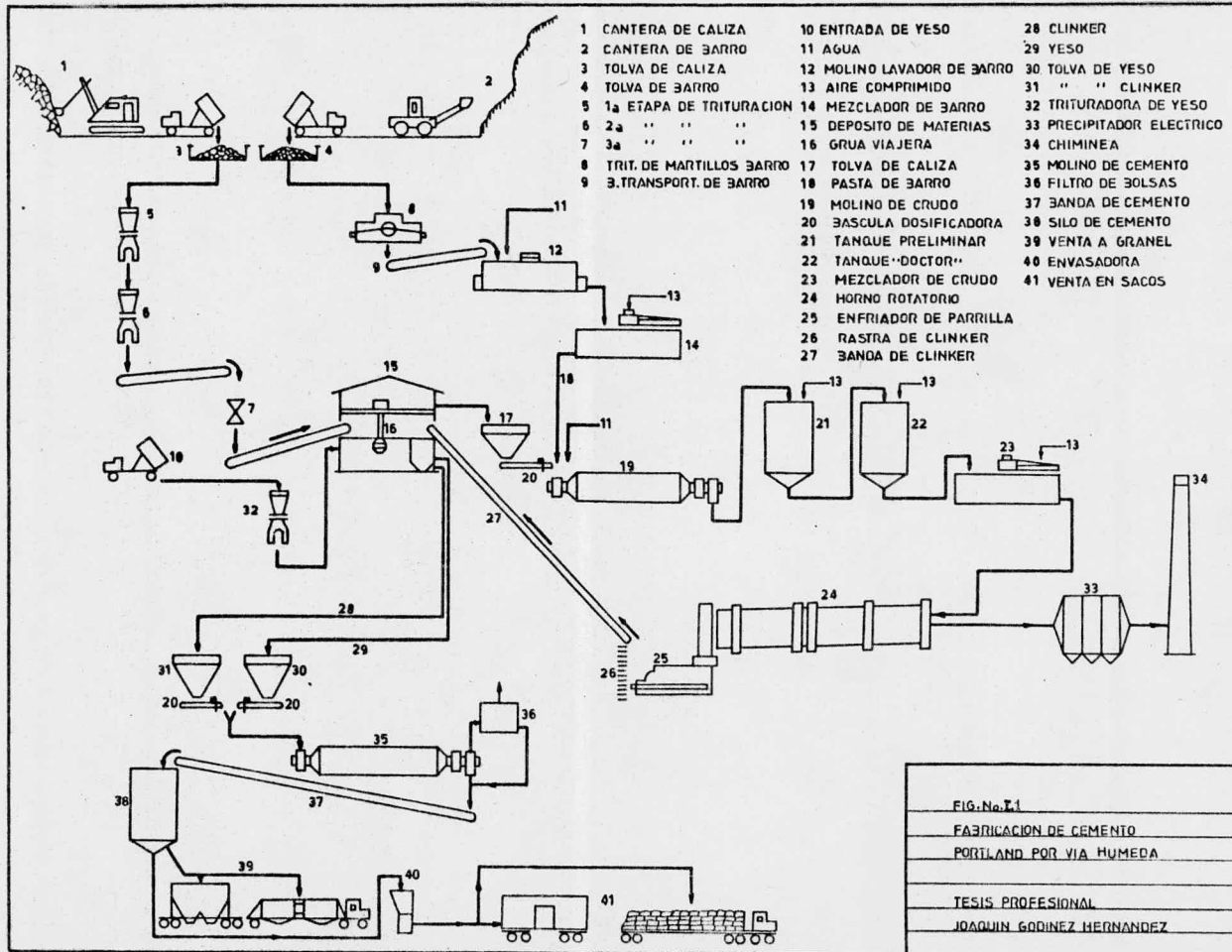


FIG. No. 1.1
 FABRICACION DE CEMENTO
 PORTLAND POR VIA HUMEDA
 TESIS PROFESIONAL
 JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

2. Cantera de arcilla (caolín)
3. Preparación de crudo
4. Producción de clínker
5. Acabado
6. Envase

De estas 6 operaciones, solamente describo 3 y 4, ya que las restantes son iguales a las del proceso Vía Húmeda.

3. Preparación de crudo. El crudo empleado no es pasta, sino un polvo fino.

El caolín y la caliza en grava se introducen a un molino de bolas, en la proporción adecuada, por medio de básculas dosificadoras instaladas en el molino. Un calentador eléctrico inyecta aire caliente en la entrada del molino - para secar los materiales a molienda.

El molino tiene 2 compartimientos, en uno hace una primera molienda (entrada), descarga por la parte central-

hacia un elevador de cangilones que lleva el material a un separador mecánico, en donde finos y gruesos se separan. - Los primeros se envían al silo de homogeneización con una bomba neumática, los segundos al otro compartimiento del molino para terminar de molerse.

Una cicloneta y un colector de bolsas en el circuito de aire del molino complementan la operación.

Al salir del molino, el "crudo" es analizado por el laboratorio de Control de Calidad, para mantener dentro de especificaciones este material.

Con el resultado del Laboratorio, el material se envía al silo de homogeneización, de ahí se pasa al silo de almacenamiento; desde donde una báscula dosificadora y una bomba neumática lo llevan al equipo de calcinación.

4. Preparación de clínker. La preparación de clínker en este proceso se realiza en un horno rotatorio, provisto de un precalentador de suspensión tipo HUMBOLT.

Este precalentador consta de 4 etapas, formadas por secciones, lo que permite un excelente intercambio de calor

y mayor producción con un horno corto, en comparación a los hornos de Vía Húmeda.

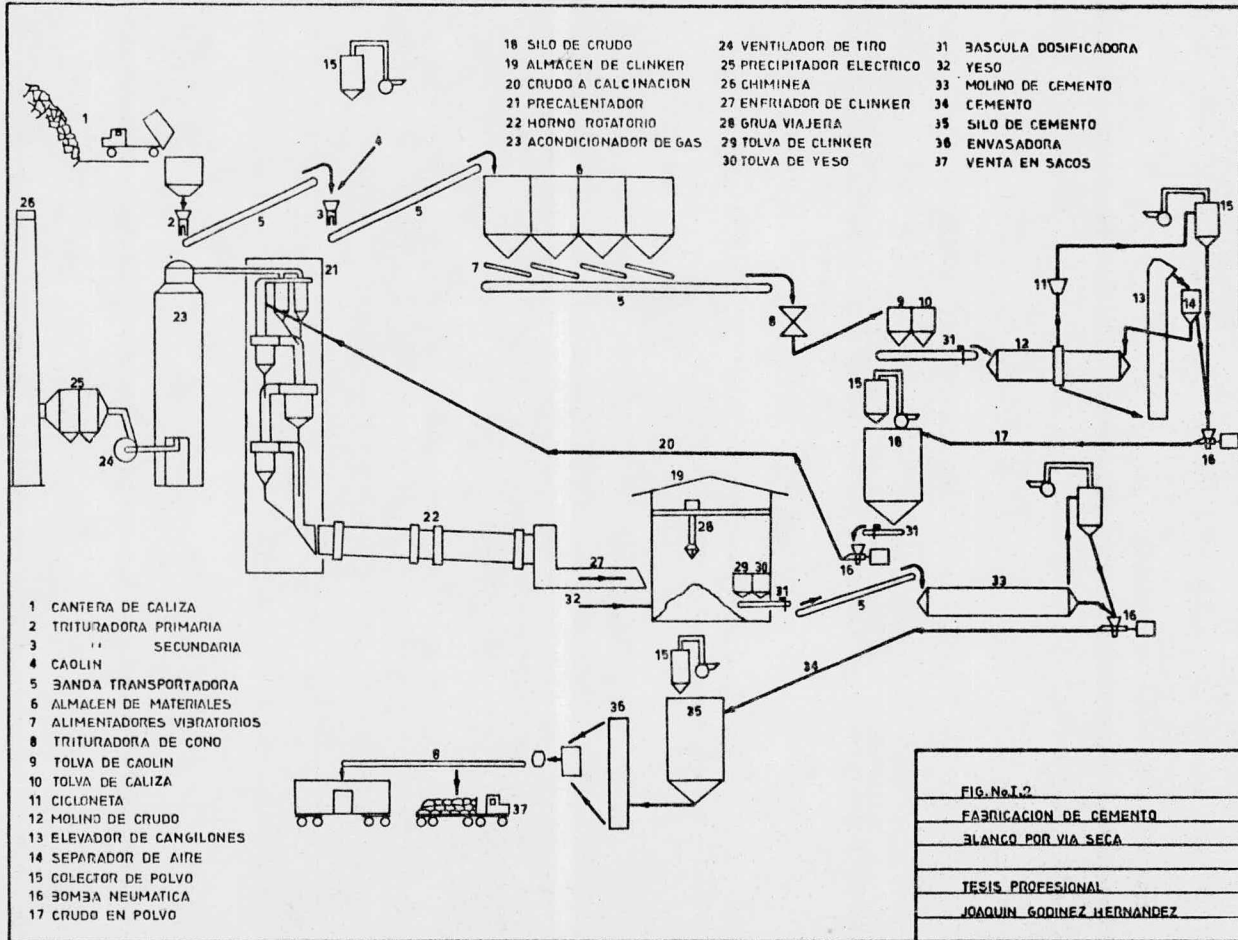
El crudo en polvo, entra al precalentador y conforme avanza elimina agua, se precalienta e inicia la descarbonatación, llegando al horno con temperatura entre 800-1100°C donde termina la descarbonatación, se hace la calcinación y se forma el clínker.

Este clínker se enfría al salir del horno y se almacena para después pasar al molino de cemento.

No son marcadas las diferencias entre hornos para Vía Húmeda y para Vía Seca, salvo la longitud y el tipo de forro de refractario.

En la figura I.2 se muestra el Proceso de Fabricación de Cemento Blanco Vía Seca.

Referencias: 1,4.



C A P I T U L O I I

EQUIPOS DE RECOLECCION

EQUIPOS DE RECOLECCION

II.1 MECANISMOS Y CARACTERISTICAS GENERALES

La limpieza de gases puede llevarse a cabo por me -
dio de los siguientes mecanismos:

1. Sedimentación por gravedad
2. Deposición inercial
3. Filtración
4. Lavado
5. Precipitación electrostática
6. Precipitación térmica
7. Aglomeración sónica

X - Los 5 primeros son ampliamente usados en la indus -
tria, los 2 últimos no tienen aplicaciones comerciales pa
ra recolección.

El equipo para limpieza de polvos debe satisfacer es tos requisitos:

- a) La concentración de dispersoides en el gas limpio ha de ser menor que el máximo permitido pre-determinado por una Dependencia del gobierno.
- b) La maquinaria debe conservar, mientras dure, su eficiencia de limpieza.
- c) La eficiencia de limpieza debe ser poco variable en todo el ciclo diario de operación.
- d) La eficiencia no debe afectarse apreciablemente por la velocidad del gas o la concentración de polvos en el gas de entrada.
- e) El equipo no debe necesitar interrupciones para limpieza durante su operación, la limpieza del gas y la eliminación del polvo han de ser automáticos.
- f) El mantenimiento normal y la eliminación del polvo no han de ocasionar un problema nuevo.
- g) El equipo debe satisfacer las condiciones ordina-

rias de bajo costo, durabilidad, costo de mantenimiento bajo y mínimo espacio.

Al resultado obtenido con un separador de polvos se le denomina rendimiento de separación y se expresa generalmente por la relación de peso del polvo captado, al polvo que entra en el aparato.

El rendimiento no es en sí mismo una característica específica del separador, pues depende tanto de las condiciones de funcionamiento del aparato como de las propiedades físicas del polvo que se maneja.

II.2 ESPECIFICACIONES PARA LA SELECCION DE UN COLECTOR DE POLVO.

Para seleccionar adecuadamente un equipo de limpieza de gas, se requieren cuatro puntos básicos.

- La carga de polvo en el gas
- El tamaño de partículas
- El flujo de gas
- La velocidad de emisión permisible

Otros factores que deben considerarse antes de la se

lección final, se dan en la tabla II.1.

TABLA II.1

Datos requeridos para la selección de Equipo.

Características de las Partículas.

1. Distribución del tamaño de partícula
2. Concentración, valores promedio y extremos
3. Densidad de las partículas (y viscosidad)
4. Densidad de la masa gaseosa
5. Contenido de humedad
6. Resistividad eléctrica y propiedades sónicas
7. Características de manipulación
 - Erosión
 - Abrasión
 - Floculación
 - Adhesividad
8. Composición
9. Valor de recolección
10. Límites de flamabilidad o explosión
11. Límites de toxicidad
12. Solubilidad

Características del Gas.

1. Velocidad de flujo. Valores promedios y extremos
2. Presión
3. Temperatura
4. Contenido de humedad. Vapores condensables
5. Composición y reactividad
6. Propiedades corrosivas

Fuente.

1. Emisión deseada de contaminante en el gas limpio
2. Método de disposición o recolección del contaminante colectado.

II.3 SEDIMENTACION POR GRAVEDAD

Cámara de Sedimentación. Es el equipo más sencillo - de todos, consiste en una cámara, en donde al reducir la - velocidad de una corriente de gas cargado con polvo, las - partículas se depositan debido a la acción de la gravedad. Figura No. II.1.

La velocidad del gas dentro de la cámara no será más

de 3.5 m/seg para evitar rearrastré del material depositado; la caída de presión es baja, entre 0.5-1.3 cm de agua y es debido principalmente a pérdidas en entrada y salida. Pueden colectarse solamente partículas mayores de 43 m.

Suponiendo alta turbulencia en relación a la velocidad de sedimentación de la partícula de polvo, el rendimiento o eficiencia de este equipo lo dá la ecuación II.1.

$$N = \frac{V_t}{H_s} \frac{L_s}{V_s} = \frac{V_t}{q} \frac{B_s L_s}{q}; \quad (N \leq 1.0) \quad (II.1)$$

Donde:

N = Rendimiento de separación

V_t = Velocidad de sedimentación de partícula, cm/seg

L_s = Longitud de la cámara, cm

V_s = Velocidad media del gas, cm/seg

q = Flujo o gasto de la corriente gaseosa, cm³/seg

B_s = Ancho de la cámara, cm

H_s = Velocidad media del gas, cm/seg

Para un gasto de gas, el rendimiento de separación depende de la sección horizontal total de la cámara y es independiente de la altura.

Por eso es importante la distribución horizontal del

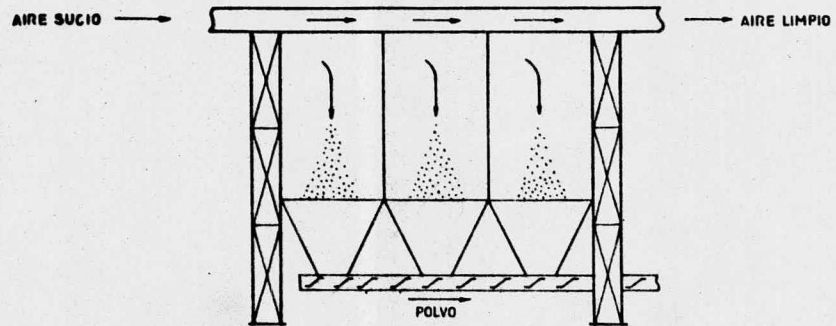


FIG. No. II.1

CAMARA DE SEDIMENTACION

TESIS PROFESIONAL

JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

gas, no importando la vertical. Para distribuir horizontalmente el gas, se emplean aletas-gufo, pantallas distribuidoras o placas perforadas; las placas horizontales dispuestas como anaqueles dentro de la cámara mejoran la separación, de acuerdo a la ecuación II.2.

$$N = \frac{N_s V_t B_s L_s}{q} ; \quad N \leq 1.0 \quad (\text{II.2})$$

en la que:

N = Rendimiento de separación

V_t = Velocidad de sedimentación de partículas, cm/seg

B_s = Ancho de la cámara, cm

L_s = Longitud de la cámara, cm

q = Gasto de la corriente de gas, cm^3/seg

N_s = Número de anaqueles paralelos a la corriente gaseosa

El principal uso de este artefacto es para limpieza previa de corrientes gaseosas con el fin de evitar desgaste por abrasión en equipos posteriores.

El espacio requerido y la baja eficiencia son sus desventajas; poco mantenimiento y bajo costo sus ventajas.

II.4 SEPARACION POR INERCIA

Ciclón. El más común de los separadores centrífugos o inerciales. El principio de operación se basa en la tendencia de las partículas de polvo a mantener su dirección cuando la corriente de gas la cambia.

El separador de ciclón simple, consta de un cilindro con una entrada tangencial y un cono invertido unido a la base, como en la Figura No. II.2. Los gases sucios entran al ciclón por la entrada tangencial, la que imparte un movimiento en espiral al gas.

Las partículas de polvo en virtud de su inercia, son lanzadas hacia la pared exterior del separador desde la cual son conducidas a un receptor, retenidas contra la pared por la velocidad del gas. Los polvos colectados son extraídos por una válvula rotatoria, gusanillo o cualquier otro medio.

Flujo ó circulación. En un ciclón, la trayectoria de los gases forma un doble torbellino, primero hacia abajo - en espiral en la parte exterior y después hacia arriba en la parte interior.

Cuando entran los gases en el ciclón, su velocidad -

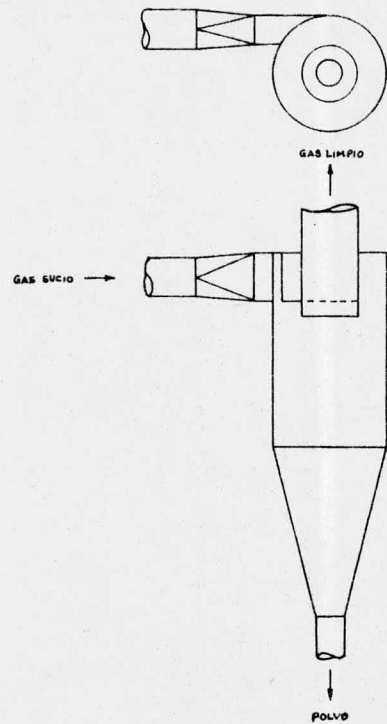


FIG. No. II.2.
SEPARADOR DE CICLON.

TESIS PROFESIONAL
JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

se redistribuye, de modo que su componente tangencial au -
 menta cuando disminuye el radio ($Vel \propto r^{-n}$). La velocidad -
 tangencial en espiral puede ser varias veces mayor que la -
 velocidad media de entrada de los gases. Las unidades co -
 mercials manejan volúmenes de gas en el rango de 1 - 1000
 m^3/min en amplio rango de temperatura.

Caída de presión. Es baja, entre 1.3 - 5.0 cm de a -
 gua para colectores simples y entre 5.0 - 15.0 cm de agua -
 para ciclones de alta eficiencia.

La caída de presión en un ciclón y las pérdidas por -
 rozamiento, está en función de la carga de velocidad basa -
 da en el área inmediata a la entrada del ciclón. La carga -
 de velocidad en la entrada dada en cm de agua, está relacio -
 nada con la velocidad media de entrada de los gases y su -
 densidad, por la ecuación II.3.

$$hvi = 0.00512 \rho Ve^2 . \quad (II.3)$$

donde:

hvi = Carga de velocidad a la entrada del ciclón, cm
 de agua

Ve = Velocidad media de entrada del gas, m/seg

ρ = Densidad del fluido (gas), kg/cm^3

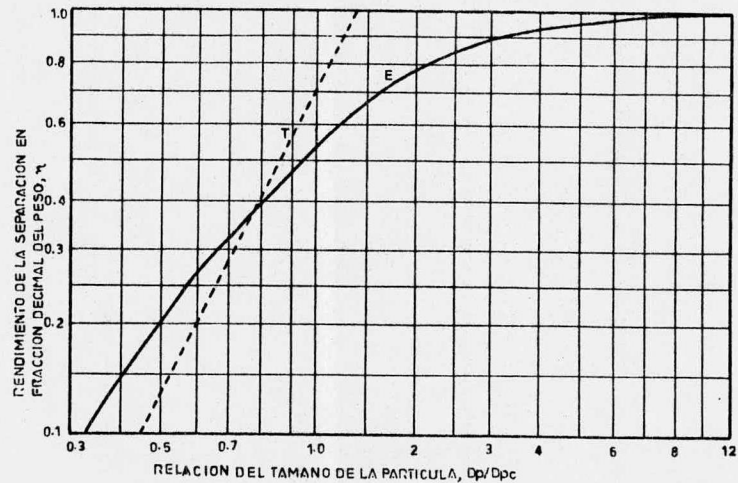


FIG. No. II.3.

RENDIMIENTO DE SEPARACION
DEL CICLON.

E EXPERIMENTAL ; T TEORICA

TESIS PROFESIONAL

JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

La pérdida por rozamiento es una medida directa de la presión estática y de la potencia que debe desarrollar el ventilador, y está relacionada con la caída de presión por la ecuación II.4.

$$F_{ev} = \Delta P_{ev} + 1 - \left(\frac{4A_c}{\pi D_e^2} \right)^2 \quad (II.4.)$$

aquí:

F_{ev} = Pérdida por rozamiento del ciclón, cm de agua.

ΔP_{ev} = Caída de presión, cm de agua.

A_c = Área de la entrada del ciclón, cm^2

D_e = Diámetro del ducto de salida del ciclón, cm

Rendimiento de separación. La Figura No. II.3. dá el rendimiento probable de separación para un tamaño de partícula dado, expresado por una relación al tamaño de corte - D_{pc} . Definiéndose D_{pc} por la ecuación II.5.

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu B_c}{2\pi N_e V_c(\rho_s - \rho)}} \quad (II.5)$$

D_{pc} = Tamaño de corte, correspondiente a 50% eficiencia fraccional, cm

μ = Viscosidad del fluido, Poise

B_c = Ancho del conducto rectangular de entrada al ciclón, cm

N_e = Velocidad media de entrada en el ciclón, cm/seg

ρ_s = Densidad de los sólidos, g/cm³

ρ = Densidad del fluido, g/cm³

Puesto que los polvos comprenden partículas de diferentes tamaños, el rendimiento total de separación es la suma de los rendimientos para cada tamaño de partícula, si se conoce la distribución de tamaños de las partículas, puede calcularse gráficamente el rendimiento total de separación, transportando valores de η y ϕ correspondientes al mismo tamaño de partícula, como ordenadas y abscisas respectivamente, sobre papel gráfico aritmético, como en la Figura No. II.4. El rendimiento total de separación se da la ordenada media de la curva.

Aplicación. Los ciclones se emplean para separar los sólidos y líquidos de gases, y sólidos de líquidos. Pueden trabajar a temperaturas tan altas como 1000°C y presiones tan grandes como 500 atm. La mejor separación la realizan partículas sólidas de diámetro entre 10 - 200 micras. Su eficiencia varía entre 50 - 90% y depende del tamaño de partícula y de su densidad.

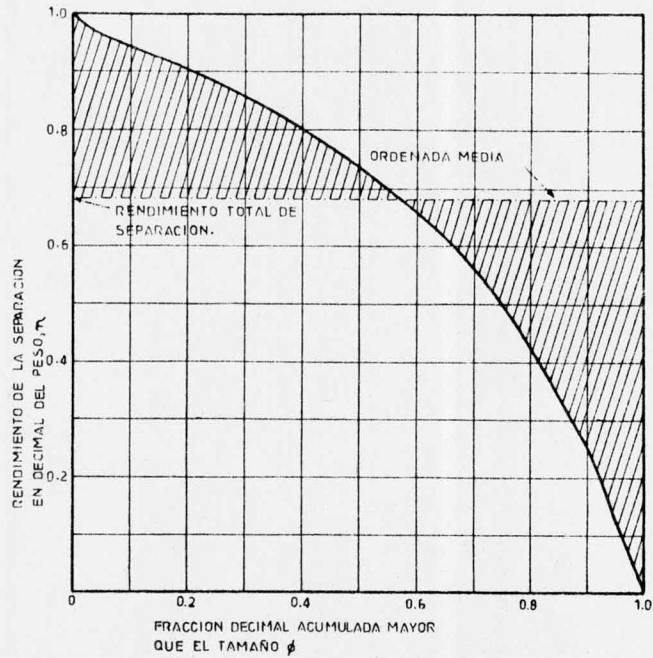


FIG. No. IV.4.

CALCULO DEL RENDIMIENTO

TOTAL DE SEPARACION.

TESIS PROFESIONAL

JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

II.5 SEPARACION POR FILTRACION

Colectores de Tela. La filtración es uno de los métodos más empleados en remover partículas sólidas de los gases. En los colectores de tela, se pasan los gases cargados de polvo por un tejido que retiene el polvo y deja pasar los gases.

Cuando los gases sucios pasan por vez primera por la tela, el rendimiento de separación será bajo, hasta que se hayan separado suficientes partículas para formar una capa previa en los poros del tejido. Esta disposición inicial de polvo se produce por intercepción y choque sobre las fibras de la tela y, por sedimentación y movimiento Browniano en los poros de la tela. Ya formada esta capa, el rendimiento de separación será de ordinario alto (99%).

Los filtros de tela se usan en forma de sacos tubulares, ó como tela envolvente estirada sobre una pantalla metálica. Una cámara de sacos, Figura No. II.5.

En las condiciones de operación prácticas, la caída a través de la tela se expresa por la ecuación II.6.

$$\Delta P_i = K_c \mu c V_f \quad (II.6).$$

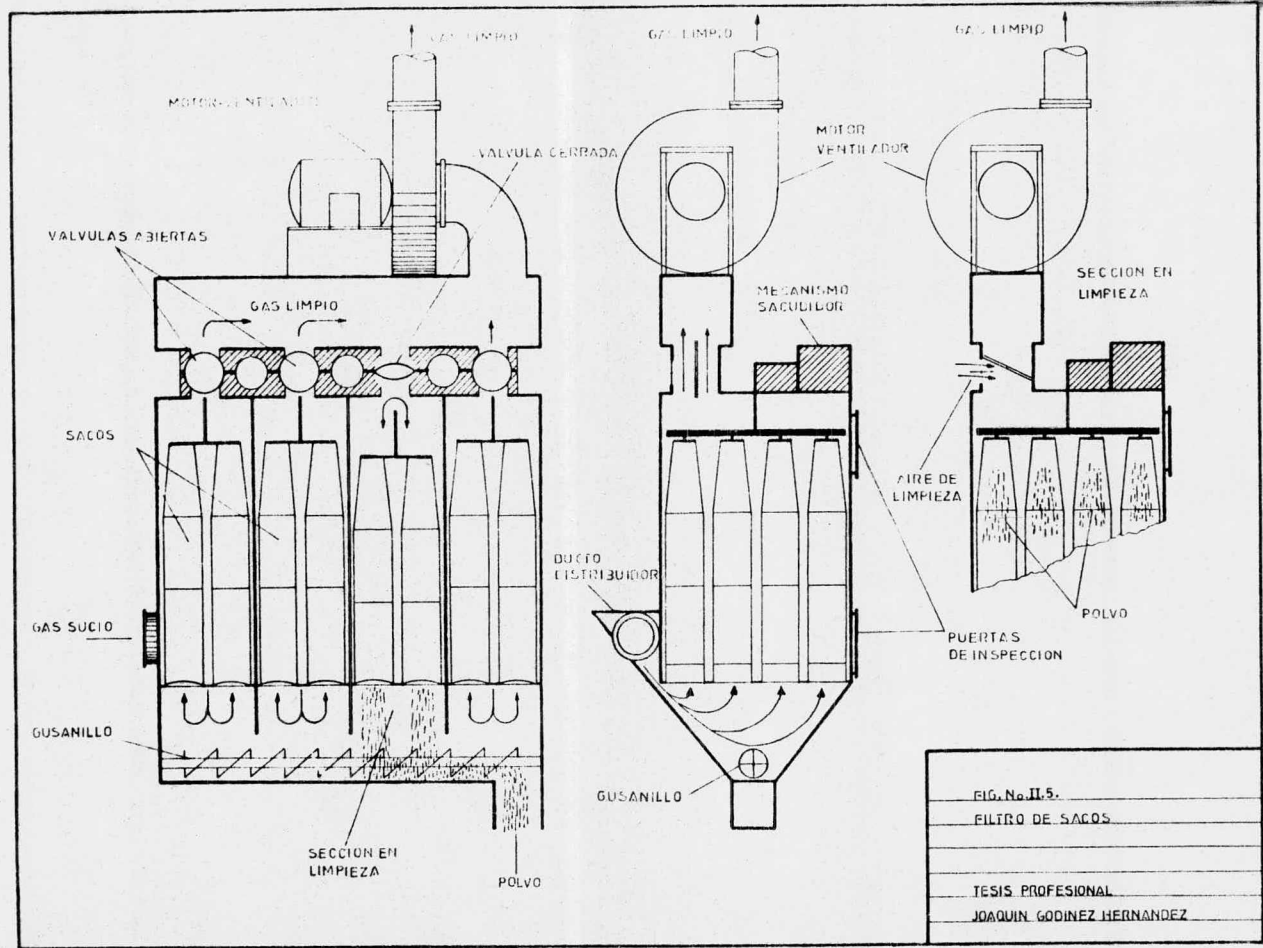


FIG. No II.5.
 FILTRO DE SACOS

TESIS PROFESIONAL
 JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

Donde:

K_c = Constante dependiente de la tela, $\text{cm H}_2\text{O}/(\text{cP}) \cdot (\text{m}/\text{min})$

ΔP_i = Caída de presión, cm de agua

μ_c = Viscosidad del fluido, cP

V_f = Velocidad superficial del gas, m/min

En la Tabla II.2 se dan valores de K_c para varias telas. Cuando los poros de la tela se llenan de polvo, el valor de K_c , puede ser más de 10 veces el de la tela limpia. Si la capa de polvo depositada sobre la tela tiene espesor superior a 1.6 mm, la caída de presión total a través de la tela cubierta de polvo, será la producida por la capa de polvo, siendo relativamente insignificante la caída de presión por la propia tela.

La caída de presión ocasionada por la capa de polvo, se expresa por la ecuación II.7.

$$\Delta P_i = K_d \mu_c M_s V_f \quad (\text{II.7})$$

La ecuación No. II.8 da el aumento de la caída de presión debido a la acumulación del polvo en el tiempo T_m .

TABLA II.2

FACTORES DE RESISTENCIA PARA TEJIDOS (Kc)

TIPO DE TEJIDO	MATERIAL	DESCRIPCION				Kc.
		HILOS/PULG.	PESO g/m ²	DIAM. DEL HILO mm	TAMAÑO DE PORO. mm.	
OSNABURG LIMPIO	ALGODON	32 x 28	- -	0.51	0.25	4.25
OSNABURG SUCIO	ALGODON	32 x 28	- -	- -	- -	39.98
DRILL	ALGODON	68 x 40	179	0.25	0.25	0.775
SATEN S/PERCHAR	ALGODON	96 x 56	233	0.229	0.178	2.25
SATEN S/PERCHAR	ALGODON	96 x 64	279	0.25	0.127	7.33
SATEN S/PERCHAR	ALGODON	96 x 60	- -	0.305	13.58
SATEN S/PERCHAR	ALGODON	96 x 56	345.8	0.279	0.102	9.33
LANA	LANA	- - -	- - -	- - -	- -	2.08
LANA	LANA	40 x 50	389.8	0.356	- - - -	2.75
SARGA DE JARCIA	NYLON	72 x 196	- - -	0.76	- - - -	13.83
ASBESTO	ASBESTO	- - - -	- - -	- - -	- - -	4.67
ORLON	ORLON	72 x 72	- - -	- - -	- - -	5.5
MALLA	NIQUEL	300 <u>mallas</u> pulg.	- - -	- - -	- - -	1.33
LANA	VIDRIO	32 x 28	- - -	0.762	- - -	13.33
DACRON	DACRON	76 x 78	454.26	- - -	- - -	2.42
TEFLON	TEFLON	76 x 70	294.9	- - -	- - -	11.6

$$\Delta P_i = K_d \mu_c C_d V_f^2 T_m \quad (\text{II.8})$$

siendo para las ecuaciones anteriores:

ΔP_i = Caída de presión, cm de H_2O

K_d = Factor de resistencia,

$$\frac{\text{cm } H_2O}{(\text{cP}) (\text{g/m}^3) (\text{m/min})}$$

M_s = Masa de los sólidos por unidad de área de tela-
g/m²

C_d = Concentración de polvo en la entrada, g/m³

V_f = Velocidad superficial, m/min

T_m = Tiempo, min

En la Figura 20-93 del Manual de Ingeniería Química de Perry, cuarta edición, se encuentran valores de K_d tomados de determinaciones experimentales en función del intervalo estimado del tamaño de partículas.

Los filtros de tela tienen una caída de presión de - 5-15 cm de H_2O y su capacidad es de 0.30 a 2.45 m³/min/m² de tela.

Es fundamental detener la circulación de gas por el-

filtro cuando se sacuden los sacos para permitir que el polvo caiga. En la práctica, esto se hace sin interrumpir el trabajo, realizando la operación por secciones.

Las telas de los filtros, son generalmente de algodón y son usadas ampliamente cuando la temperatura es menor de 88°C y no están presentes gases ácidos. Para otros servicios se emplean lana, fibra de vidrio, asbesto o metal. Las temperaturas máximas de trabajo recomendadas son: 113°C y 343°C respectivamente. Muchas telas de fibras sintéticas, tales como orlón, nylon, rayón, se usan en aplicaciones especiales. Actualmente ya se emplean también tejidos mixtos.

La vida de los sacos varía según la frecuencia con que se sacuden, la naturaleza del polvo y las características del gas.

El principal problema en estos colectores es la ruptura de los sacos.

Aplicación. Ampliamente usados en la industria metalúrgica, en los procesos industriales de alimentos y químicos en conexión con operaciones de molienda y secado.

Las grandes y modernas cámaras, tal como las usadas-

para manipular gases calientes de los hornos de cemento, cal y otras operaciones de calcinación, son una adaptación especial de los filtros de tela.

II.6 SEPARACION POR LAVADO

Torres Lavadoras (Scrubbers). Las torres lavadoras son aparatos en los cuales se emplea un líquido para separar la fase dispersa o dispersoides de los gases, o para facilitar su separación. Como agente separador se emplea por lo general agua, aunque pueden usarse otros líquidos.

Los mecanismos por los cuales un líquido separa la fase dispersa de un gas son:

1. Choque. Cuando un gas cargado de polvo es barrido por gotas de un líquido, las partículas de polvo chocan entre sí, favoreciendo su precipitación en virtud de su mayor masa.
2. Difusión. Las partículas de polvo dispersas entre gotas de líquido en una corriente gaseosa, se depositarán sobre estas últimas por difusión o movimiento-Browniano.
3. Humidificación. La humidificación de un gas por ro-

ciado de un líquido, puede alterar las fuerzas electrostáticas superficiales sobre las partículas suspendidas de polvo, haciéndolas flocular. Los floculos mayores se separan entonces más fácilmente por procedimientos mecánicos. Efecto probable en concentración elevada.

4. Condensación. Si el líquido rociado o pulverizado lleva al gas a su punto de rocío, se producirá una condensación, en la que las partículas de polvo, especialmente las más pequeñas, actuarán como núcleos de condensación. Este aumento en el tamaño efectivo de las partículas, simplificará la separación por procedimientos mecánicos. Este mecanismo es factor importante con gases calientes, en concentraciones pequeñas (2.3 g/m^3).
5. Mojadura. Los agentes mojantes pueden servir para evitar el re-arrastre de las partículas de polvo, una vez que han chocado con ellas gotas de líquido.
6. División del gas. Puede realizarse la separación por los desplazamientos de las partículas, debido a la sedimentación y al movimiento Browniano dentro de la burbuja, actuando el líquido simplemente como una su

perficie receptora.

7. Recogida del polvo. Aparte de los efectos de humidificación o condensación, la acción del líquido consiste en barrer la superficie colectora para evitar el re-arrastré por el agua del polvo ya separado, teniendo lugar la recogida o separación real por una acción mecánica determinada.
8. Precipitación electrostática. Es posible que las gotitas de agua se carguen eléctricamente a consecuencia de la ruptura de las corrientes de agua y el choque sobre las paredes de la torre lavadora.

Este factor puede desempeñar un papel importante en la precipitación del polvo, en casos especiales. Dentro de este tipo de separadores, los más comunes son:

II.6.1 TORRE LAVADORA VENTURI

Figura No. 11.6 En este aparato se introduce agua a baja presión (0.35 Kg/cm² man), en la garganta de un Venturi, en la cual la velocidad del gas varía entre 60-90 m/seg. El agua y el polvo lavados se recogen después en un separador de rociado y ciclón, colocados después del --

Venturi.

La caída de presión en el Venturi y ciclón es del orden de 38 cm de H₂O; el consumo de agua es alrededor de - 0.40 l/min/m³/min de gas manipulado. Se han obtenido rendimientos de separación grandes con polvos muy finos.

II.6.2 TORRES LAVADORAS EMPARADAS

La torre corriente rellena con anillos de cerámica, -losetas, etc., se emplea también para separar polvos. Es probable que su acción sea principalmente la debida al choque contra el relleno, sirviendo el líquido para mantener el polvo lavado y evitar su re-arrastre por los gases. -- Una limitación grave, es la posibilidad de que se produzcan obstrucciones a consecuencia de la acumulación de polvo. En la Figura No. 2.7 se muestra este tipo de torre.

II.6.3 TORRE LAVADORA DE CICLON.

Esta combina el lavado con la acción de ciclón. Un tipo tiene adaptado un pulverizador múltiple vertical central, que tiene toberas para rociar el agua radialmente a la corriente de gas, y están construidas para pulverizarla en gotitas lo más finas posible.

En otros tipos, se obtiene la dispersión del líquido durante su paso por las placas desintegradoras (Ver Figura No. II.8).

En las torres lavadoras de ciclón, las velocidades superficiales son de 1.2 a 2.4 m/seg, y la caída de presión varía entre 5 a 20 cm de agua, mientras que la circulación de agua es de 0.4 a 1.3 l/min/m³/min de gas manejado.

El equipo auxiliar comprende soportes, tanque para el lodo ventilador, bomba y motores.

II.6.4 TORRE LAVADORA POR INERCIA.

En este tipo se utiliza la velocidad del gas para asegurar el contacto con el líquido. Los gases cargados de polvo se someten a un rociado con un líquido, luego pasan por una placa perforada sobre la que se hace circular el líquido.

Encima de cada perforación hay montada una placa de choque. La separación del polvo se produce durante el paso por esta placa.

Las velocidades superficiales en la torre son de 1.8

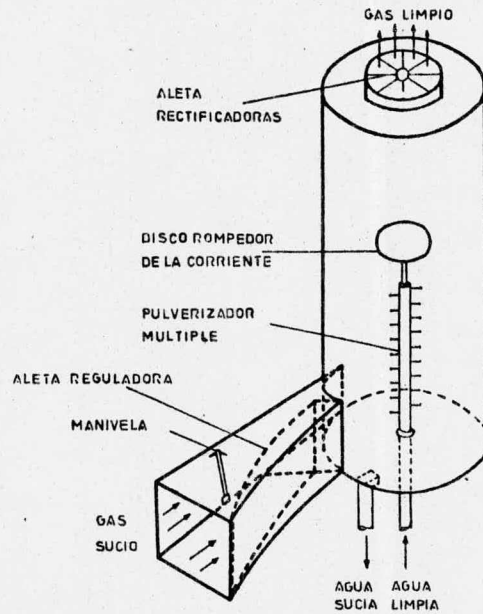


FIG. No. II. 8.
TORRE LAVADORA DE
CICLON
TESIS PROFESIONAL
JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

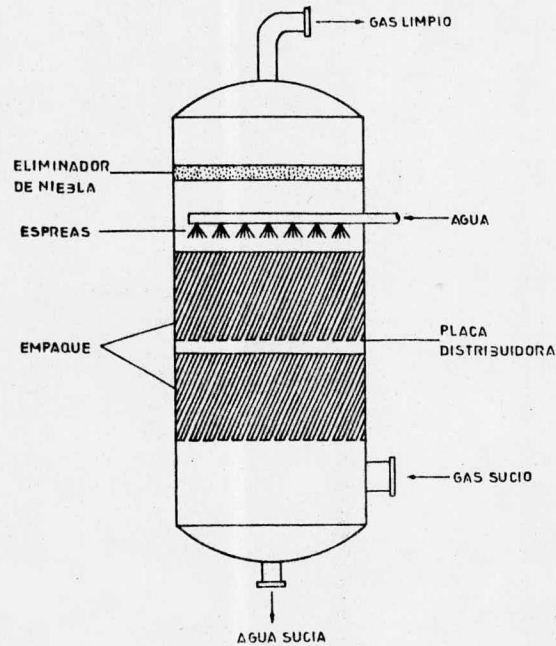


FIG. No. II.7.
TORRE LAVADORA
EMPAcada
TESIS PROFESIONAL
JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

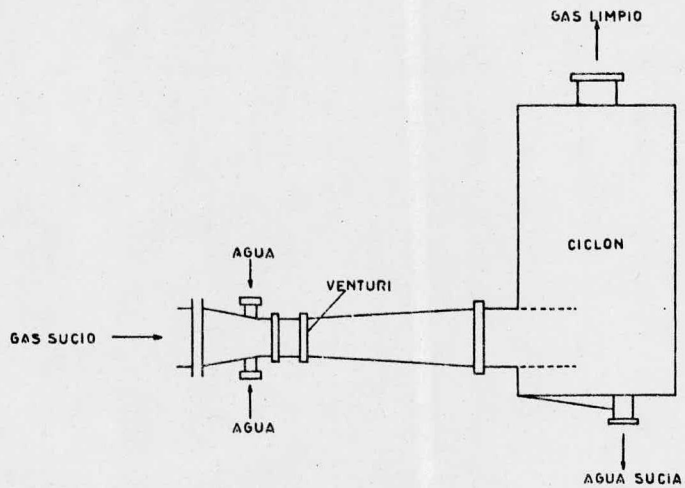


FIG. No. II.6.

TORRE LAVADORA

VENTURI

TESIS PROFESIONAL

JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

a 2.4 m/seg pero las velocidades en los orificios pueden ser de 9.0 a 45.0 m/seg, dando las velocidades mayores los más altos rendimientos de separación y la caída de presión más elevada.

Pueden ponerse varias placas en serie.

II.7 SEPARACION POR PRECIPITACION ELECTROSTATICA

✓ Precipitador Electrostático. En el precipitador -- eléctrico se mantiene una gradiente de potencial en una di -- rección y se establece una corriente eléctrica entre dos - grupos espaciados de electrodos, entre los cuales pasa el gas cargado de polvo que vá a ser tratado. Los gases pa -- san por este potente campo en que hay muchos iones y mu -- chos se están desprendiendo. Al moverse los iones en el - campo eléctrico, se adhieren a las partículas de polvo sus -- pendidas y hacen que éstas se depositen en la superficie - de los electrodos colectores.

II.8 PRECIPITACION TERMICA

Se basa en que los impactos moleculares tienden a re -- peler dispersoides lejos de un cuerpo calentado. En preci -- pitación térmica este principio es utilizado para limpiar-

gas de partículas suspendidas pasándolo a través o sobre una rejilla calentada, a baja velocidad. Aún cuando no ha sido aplicado a colección industrial de polvo, ha tenido éxito para muestreo de polvo en la atmósfera.

II.9 AGLOMERACION SONICA

Vibraciones acústicas de alta intensidad causarán co lidionrd wue provocarán la floculación de vapores y nie -- blas, después de lo cual pueden ser rápidamente colectadas en aparatos convencionales. Hay una frecuencia óptima, ge neralmente en el rango de 1.000 a 10,000 cps, abajo y arri ba del cual no ocurrirá floculación efectiva, dependiendo del tamaño y densidad de la partícula y la viscosidad y -- densidad del medio.

El consumo de potencia para aglomeración de aerosol está normalmente en el rango de 2 a 5 Kw/(1,000 ft³/min) de gas manejado.

Debe ponerse énfasis en que este método de colección -- aún está en etapa de desarrollo, y que existen problemas -- serios en la salud del personal y de vecinos. Aunque en -- principio el Aglomerador Sónico y los sistemas de ciclones son alrededor de 20% más baratos en instalación y opera --

ción que precipitadores electrostáticos de capacidad similar, la necesidad de fuerte aislamiento para sonido eleva el costo considerablemente.

Referencias: 4, 6

C A P I T U L O I I I

P R E C I P I T A D O R E S E L E C T R O S T A T I C O S

PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS

Los precipitadores electrostáticos son aparatos en los cuales se aprovechan fenómenos eléctricos para captar partículas presentes en una corriente de gases, ya sea para recuperar material valioso o para proteger el Medio Ambiente.

III.1 DESCRIPCION Y TIPOS DE PRECIPITADORES.

Existen 2 clases generales de precipitadores electrostáticos:

- De Una Etapa (tipo COTTRELL), en el cual la ionización y colección son combinadas.
- De Dos Etapas, en donde la ionización se hace en una

parte del equipo y la colección en la siguiente.

El tipo de Dos Etapas es poco común en la industria por lo que solo hago mención de él.

El colector industrial más común es el precipitador electrostático (eléctrico) de Una Etapa. En todos los tamaños de las unidades comerciales, el gas sucio es pasado horizontalmente a través de unos pasos de gas, estrechos y verticales; formados por hileras paralelas de electrodos-colectores aterrizadas.

Un dibujo en dos posiciones de un precipitador moderno se muestra en la Figura III.1. Las dimensiones típicas del paso de gas para un precipitador comercial grande (industria cementera) son: 9 in de ancho, 30 ft de alto y 27 ft de largo. La distancia eléctrica, esto es, la distancia entre los electrodos de descarga de alto voltaje y las placas colectoras aterrizadas es la mitad de lo ancho del paso de gas, o sea 4 1/2 in.

Los componentes principales de un precipitador electrostático son:

- Carcaza (incluyendo tolvas).

- Sistema de electrodos de descarga alto voltaje.
- Sistema de electrodos colectores (aterrizado).
- Fuente de alto voltaje.

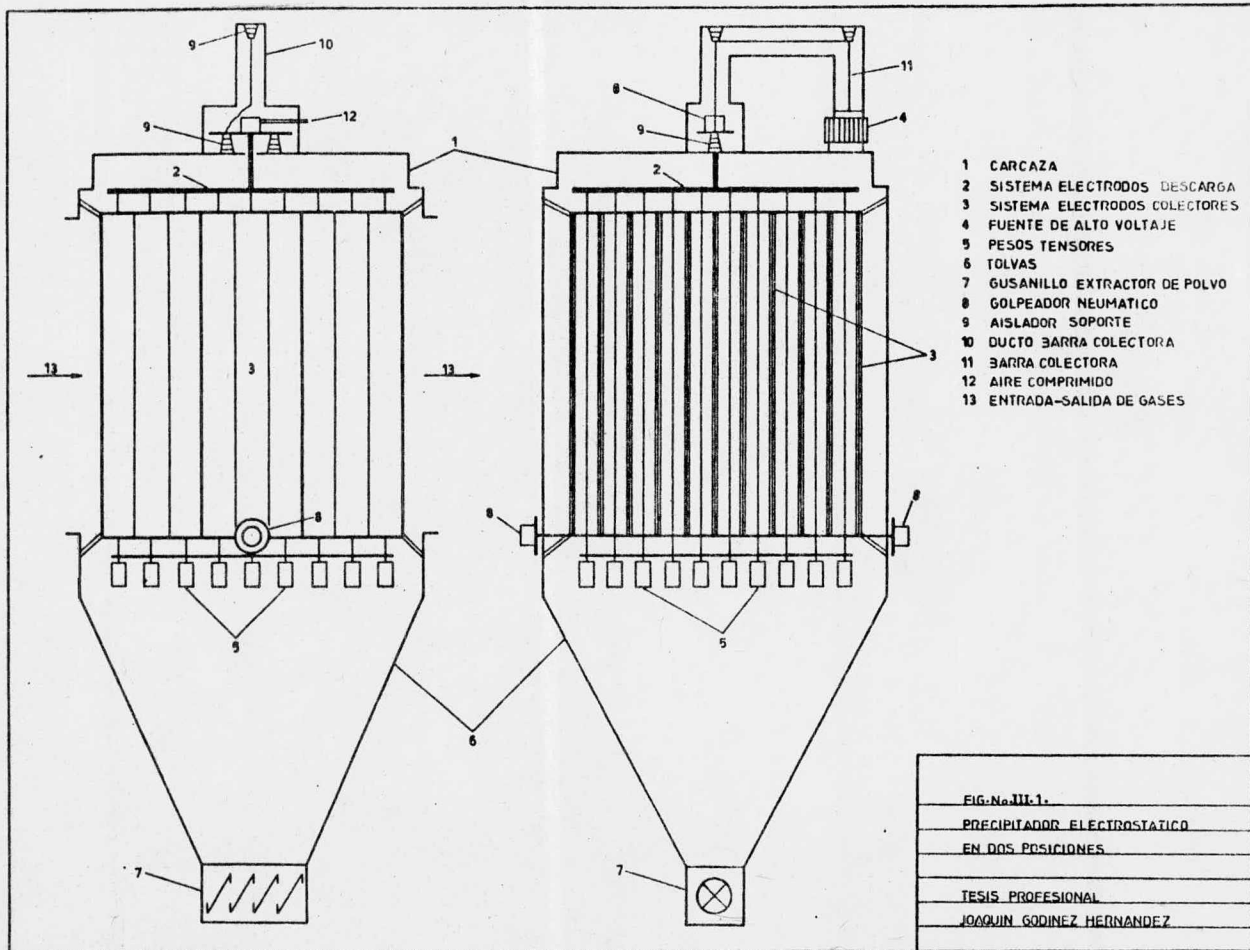
Debido a comodidad de instalación y de acuerdo con el tamaño, los precipitadores son divididos en paquetes (módulos) cómo se ve en la Figura III.2.

- Carcaza (incluyendo tolvas).

La carcaza del precipitador es a prueba del tiempo, construcción rígida, adecuada para instalaciones interiores o exteriores. Se compra fabricada en módulos soldados, del mayor tamaño práctico, solicitado de acuerdo a consideraciones de transporte y montaje.

Las partes mayores de la carcaza incluyen la caja, tolvas, conexiones de entrada y salida, puertas de inspección y cajas de aisladores.

La caja estandar (secciones de pared, secciones finales y secciones del techo) está fabricada con placa de acero templado, soldada, reforzada adecuadamente con columnas.



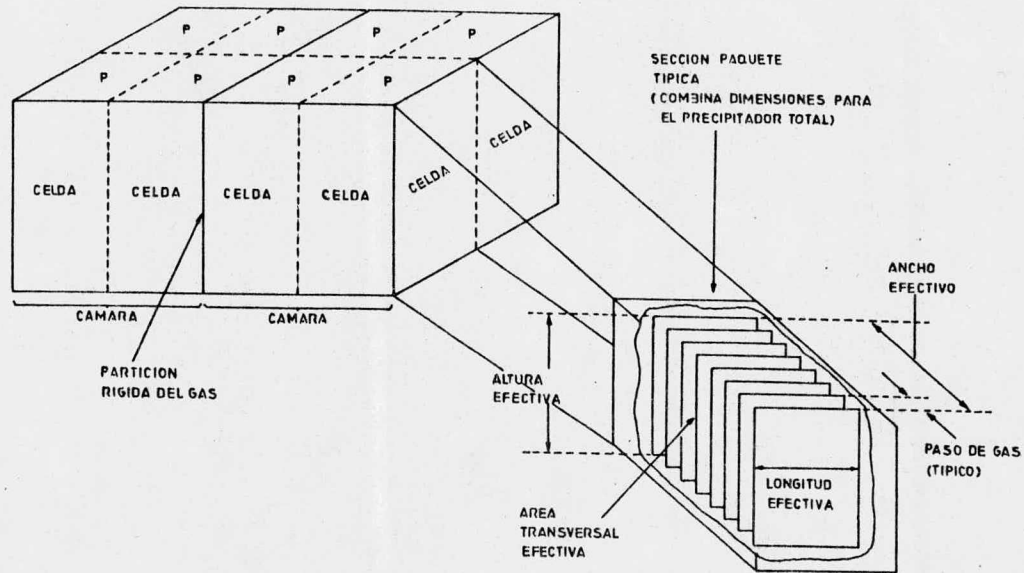


FIG. No. III. 2.
ARREGLO EN PAQUETES
TESIS PROFESIONAL
JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

nas, viguetas y tensores para controlar la máxima presión de diseño, negativa o positiva del gas que está siendo manejado y para aguantar la máxima temperatura de diseño.

Las secciones del techo son diseñadas para soportar los pesos de las partes internas y las montadas sobre el techo y el aislamiento térmico, así como para satisfacer los requerimientos ambientales tales como terremotos, carga de viento, carga de nieve, carga viva, etc.

La integridad del equipo se preserva por puertas de inspección con empaque y cajas de aisladores sellados.

La carcaza y las cajas de aisladores del precipitador forman una cámara continua de acero aterrizada, la cual encierra completamente todos los elementos de alto voltaje, asegurando así al personal y la completa protección eléctrica.

Como la carcaza es hermética al gas y completamente cerrada, el acceso a los elementos de alto voltaje puede llevarse a cabo solamente a través de las aberturas para ese fin.

Todas las aberturas de acceso están equipadas con se

ñales y ganchos de seguridad aterrizados.

Las puertas de acceso rápido están equipadas también con llaves de seguridad entrelazadas con el sistema total de llaves de seguridad del precipitador y su equipo relacionado de alto voltaje.

El ducto del BUS (barra de alto voltaje) proporciona protección eléctrica entre la unidad del transformador-rectificador y el alto voltaje alimentado a través de la caja de aisladores.

- Sistema de electrodos de descarga alto voltaje

Cada precipitador contiene uno o más campos de electrodos de descarga de alto voltaje los cuales son energizados individualmente. Estos campos están aislados eléctricamente del resto del precipitador, arreglados en módulos para aparear los módulos de electrodos colectores, y posicionados de manera que los alambres de descarga cuelguen precisamente a lo largo de las líneas centrales de los pasos de gas, y consiste de las siguientes partes principales:

Ducto del BUS (barra de alto voltaje)

- 1 alimentación a través de un aislador soporte
- 1 aislador del vibrador
- 3 aisladores soporte de tensión
- Reja superior soporte
- Alambres-electrodos de descarga
- Reja inferior de aliniamiento
- Pesos tensores

Los alambres-electrodos de descarga son usualmente de alambre de acero, calibre 12, reforzados en los extremos para asegurar buen contacto eléctrico y para resistir la erosión eléctrica y mecánica.

Un sistema de golpeo independiente conserva el sistema de electrodos de descarga de alto voltaje, continuamente limpio.

- Sistema de electrodos colectores.

Los electrodos colectores estandar planos son láminas de acero rolado en frío, con precisión para asegurar que realmente sean planos, y están colocadas en paneles de electrodos colectores precisos sobre una viga de tamaño adecuado.

Para condiciones de operación especiales, los paneles

les colectores están disponibles en diversas aleaciones de hierro y otros metales resistentes a la corrosión.

Los paneles colectores están agrupados dentro de la carcasa del precipitador para formar módulos de electrodos suspendidos y golpeados independientemente. Los módulos son golpeados periódicamente por medios electromecánicos. Una sección transversal típica de un módulo de electrodos-colectores de cuatro pasos de gas, uno de muchos en un moderno precipitador electrostático, se muestra en la Figura III.3.

- Fuente de alto voltaje.

Paquetes de potencia de alto voltaje con diodo de silicio han sido desarrollados específicamente para las severas condiciones de carga encontradas al suministrar corriente directa de alto voltaje a precipitadores electrostáticos.

Debido a que la máxima eficiencia de colección en la precipitación es dependiente principalmente del voltaje máximo, los paquetes de potencia deben poseer sustancial sobre-capacidad tanto para voltaje como para corriente. En la práctica, el voltaje máximo del precipitador es el más alto nivel que puede ser mantenido sin tener un arco eléc-

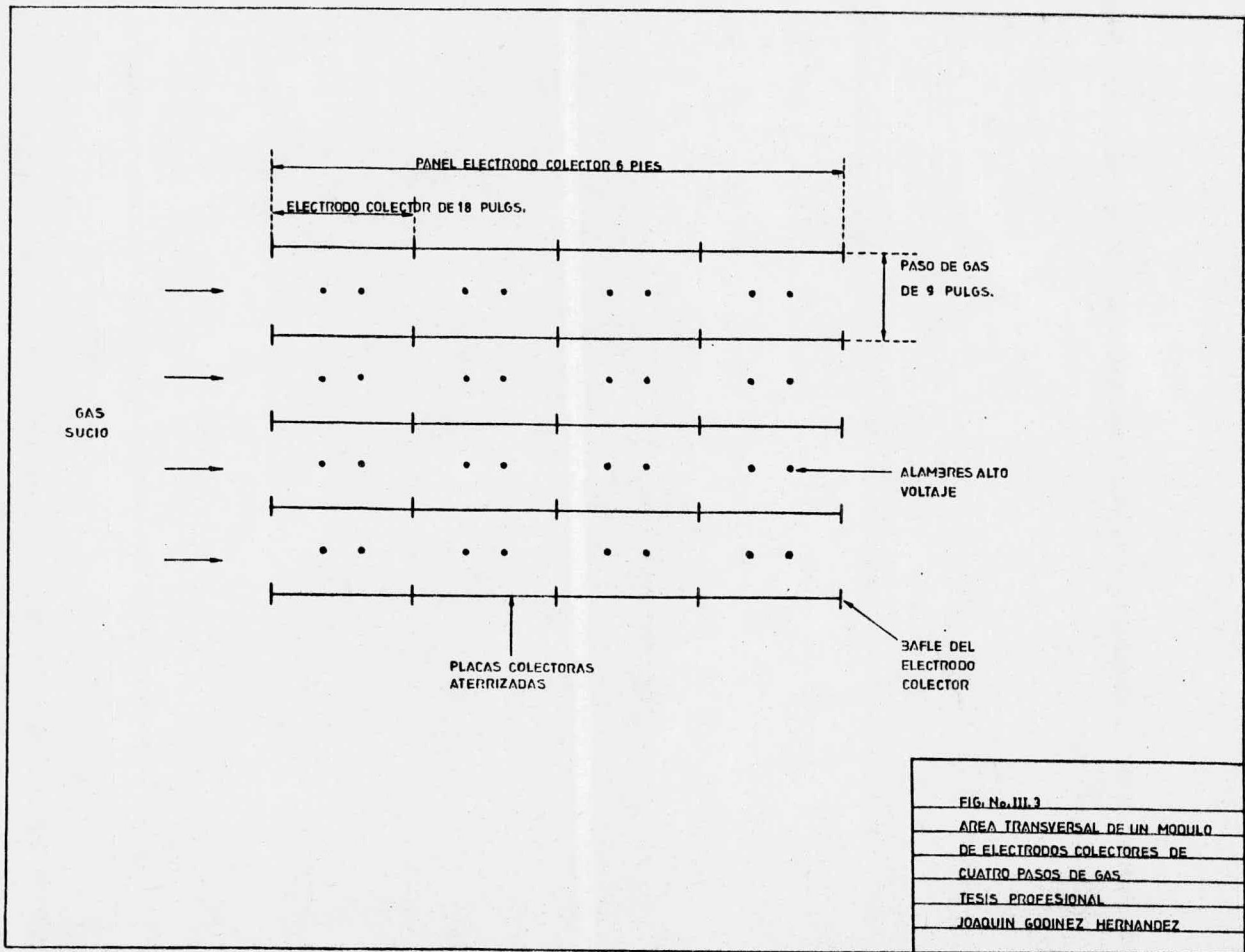


FIG. No. III.3
 AREA TRANSVERSAL DE UN MODULO
 DE ELECTRODOS COLECTORES DE
 CUATRO PASOS DE GAS
 TESIS PROFESIONAL
 JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

trico contínuo (sobre-arco) entre alambre y electrodo co -
lector en uno o más puntos dentro del precipitador.

A causa de que los voltajes de sobre-arco cambian de segundo a segundo como las condiciones de operación varían, los paquetes modernos de potencia están equipados con un sistema de regulación automática de voltaje, el cual continuamente regula el alto voltaje, justo por debajo del so -bre-arco.

Los modernos paquetes de potencia consisten en 3 componentes:

Cabina de control remoto

Reactor saturable

Unidad de transformador-rectificador

La instalación consiste de una base en el lugar, tornillos y líneas de los conductores externos.

El circuito de alto voltaje, como se muestra en la Figura III.4 consiste de los siguientes elementos principales:

Fuente de poder (CA, 3 fases, 440V, 60 Hz)

Reactor saturable para regular la potencia (CA)

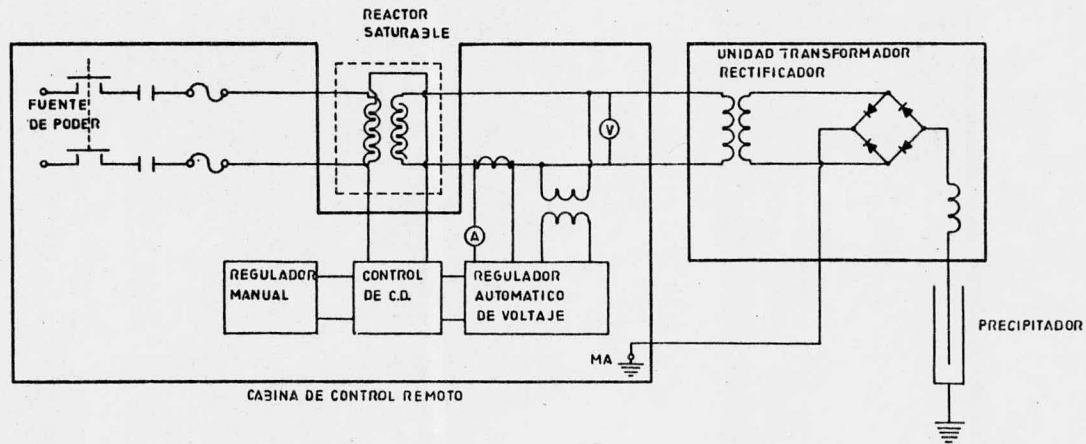


FIG. No. III.4

DIAGRAMA ESQUEMATICO
SIMPLIFICADO

TESIS PROFESIONAL

JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

Transformador-elevador de alto voltaje (CA)

Rectificador para cambiar CA a CD

Los sistemas de electrodos del precipitador complementan el circuito (CD)

La cabina es usualmente localizada en un punto conveniente de control requeridos (excepto el reactor saturable-montado por separado) y los instrumentos necesarios para enviar y controlar la operación de un precipitador electrostático.

La cabina es usualmente localizada en un punto conveniente de control y puede localizarse lejos del precipitador.

Las unidades modernas de transformador-rectificador con diodo de silicio, están especialmente diseñadas para las condiciones severas de carga y atmósferas corrosivas encontradas en el suministro de CD de alto voltaje a precipitadores electrostáticos.

El paquete herméticamente sellado del transformador-rectificador protege y enfría el interior sumergido en aceite o en un líquido aislante no-inflamable como el ASKAREL.

No hay parte móviles que se desgasten. Las unidades no requieren lubricación o tubos de reposición costosos, y el paquete sellado no requiere virtualmente mantenimiento, excepto la rutina de revisión de rigidez dieléctrica del líquido de enfriamiento.

Los principales componentes de una unidad transformador-rectificador incluyen el tanque, el transformador de alto voltaje, cuerpos del rectificador de silicio, arreglados en circuito de puente de onda o doble media onda, el interruptor de alto voltaje y la salida(s) de alto voltaje.

III.2 OPERACION

III.2.1. FUNDAMENTOS TEORICOS

El funcionamiento de los precipitadores electrostáticos descansa en los siguientes puntos teóricos:

- Intensidad del campo
- Potencial e ionización
- Flujo de la corriente
- Carga de las partículas
- Movilidad de las partículas
- Rendimiento de la separación

- Intensidad del campo.

Aunque normalmente se conoce el potencial o voltaje-aplicado, es la INTENSIDAD DEL CAMPO lo que determina el comportamiento de un campo electrostático. Cuando la intensidad de corriente es pequeña, (antes de que se inicie la chispa del efecto CORONA) dichas características están relacionadas por las ecuaciones III.1 y III.2

Para electrodos de placas paralelas:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{B_e} \quad (\text{III.1})$$

donde:

\mathcal{E} = Gradiente de potencial electrostático, stat - volts/cm.

E = Diferencia de potencial electrostático, statovolts

B_e = Espaciamiento entre las placas paralelas, cm.

Para electrodos de cilindros concéntricos:

$$\mathcal{E} = \frac{E}{r \ln(D_t/D_d)} \quad (\text{III.2})$$

aquí:

- \mathcal{E} = Gradiente de potencial electrostático, stat - volts/cm
- E = Diferencia de potencial electrostático, stat - volts
- r = Radio, distancia al eje del precipitador eléctrico, cm.
- D_t = Diámetro interior del tubo colector, cm.
- D_d = Diámetro exterior del electrodo de descarga, - cm.

La intensidad del campo es uniforme entre placas paralelas, y varía en el espacio entre cilindros concéntricos, siendo máxima en la superficie del cilindro central.

En la práctica, el orden de intensidad del campo es de 5 a 20 statvolts/cm (1500 a 6000 V/cm).

En la Figura III.5 se muestra una curva de voltaje en función de la potencia de entrada.

- Potencial e Ionización.

Para ionizar el gas, es necesario superar la resistencia a la ruptura eléctrica del gas (resistividad). EL EFECTO CORONA es una descarga local que no se propaga por sí misma. La chispa es esencialmente una etapa avanzada -

del EFECTO CORONA, en la cual se produce una ruptura completa del gas, a lo largo de una trayectoria dada. Puesto que el EFECTO CORONA representa una ruptura local, sólo puede ocurrir en un campo eléctrico no uniforme.

Para placas paralelas se producirán chispas con una intensidad de campo o una diferencia de potencial dadas por las expresiones EMPIRICAS III.3 y III.4.

$$E_s = E_0 K_\rho \left[1 + \left(\frac{K_0}{K_\rho B_e} \right) \right] \quad (\text{III.3})$$

$$E_s = E_0 K_\rho B_e + K_0 E_0 \quad (\text{III.4})$$

donde:

E_s = Gradiente de potencial electrostático necesario para iniciar la chispa, statvolts/cm.

E_0 = Constante de ruptura eléctrica para el gas, statvolts/cm.

K_ρ = Densidad del gas con relación a su densidad a 0°C y 760 mm Hg.

K_0 = Constante de energía-distancia para la descarga eléctrica en los gases, cm.

B_e = Espaciamiento entre placas, cm.

E_s = Diferencia de potencial electrostático necesario para iniciar las chispas, statvolts.

Para el aire en el intervalo $K_e B_e$ comprendido entre 0.1 y 2.0, $\epsilon_0 = III.2$ y $K_0 = 0.048$ (Thornton - Phil. Mag.- 28 (7) -666-139 dá valores para otros gases).

Para cilindros concéntricos, el EFECTO CORONA se produce en el alambre central, de acuerdo a las ecuaciones - III.5 y III.6

$$E_s = \epsilon_0 K_e \left[1 + \sqrt{\frac{K_0}{K_e D_d}} \right] \quad (III.5)$$

$$E_c = \left(\frac{\epsilon_0 K_e D_d}{2} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{K_0}{K_e D_d}} \right) \ln \left(\frac{D_t}{D_d} \right) \quad (III.6)$$

Para estas ecuaciones:

E_s = Gradiente de potencial electrostático necesario para iniciar la chispa, statvolts/cm

E_c = Diferencia de potencial electrostático, necesario para iniciar la descarga de corona, statvolts.

ϵ_0 = Constante de ruptura eléctrica para el gas, - statvolts/cm

K_g = Densidad del gas, con relación a su densidad a 0°C y 760 mm Hg

K_0 = Constante de energía-distancia para la descarga eléctrica en los gases, cm

D_d = Diámetro exterior del electrodo de descarga, - cm

D_t = Diámetro interior del tubo colector, cm

Para aire son buenos valores:

$$\mathcal{E}_0 = 110$$

$$K_0 = 0.18$$

Los precipitadores operan entre 40,000 y 50,000 volts de potencial a tierra. Este potencial es suficiente para causar billones de electrones que escapan de los alambres y bombardean las moléculas de gas en la región cercana a los alambres. La fuerza de este bombardeo forma iones de gas positivos y negativos cuya presencia es evidenciada por una CORONA AZUL visible:

Los iones responden a la poderosa fuerza electrostática moviéndose hacia los electrodos cargados opuestamente. Los iones positivos de gas regresan al alambre negativo y recuperan sus electrones perdidos; los iones negativos -

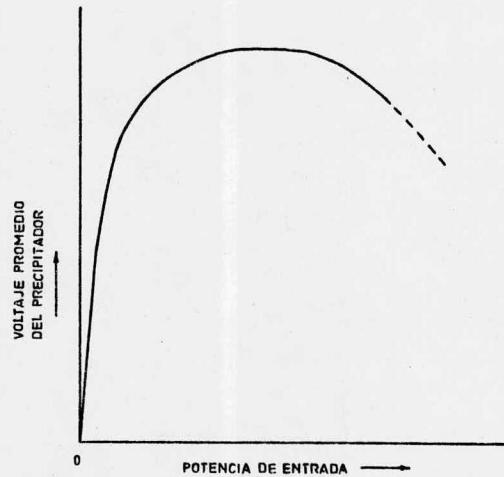


FIG. No. III.5
EFECTO DE LA POTENCIA DE
ENTRADA SOBRE EL VOLTAJE
DEL PRECIPITADOR
TESIS PROFESIONAL
JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

del gas se mueven hacia el electrodo colector aterrizado - (positivo relativamente), inundando de ese modo el paso de gas con billones de iones de gas negativos. El mayor flujo de corriente dentro de un precipitador electrostático - es debido al flujo de iones negativos de gas, de alambres - a placas.

- Flujo de la corriente.

La descarga de Corona vá acompañada de una corriente eléctrica de intensidad pequeña, en tanto que las chispas implican un flujo de gran intensidad que no puede aplicarse a la precipitación eléctrica.

Además de los efectos destructivos sobre el equipo - eléctrico y los electrodos, las chispas ocasionarán un bajo rendimiento de separación, debido a la reducción del - voltaje aplicado, la re-dispersión del polvo depositado y - la canalización de la corriente.

La ecuación III.7 da una buena aproximación de la co rriente en el Efecto Corona.

$$I = \frac{8 \lambda i E (E - E_c)}{D_t^2 \ln(D_t / D_d)} \quad (\text{III.7})$$

Aquí:

I = Intensidad eléctrica por unidad de longitud -
del electrodo, statamp/cm

λ_i = Movilidad iónica, (cm/seg)/(statvolts/cm)

E = Diferencia de potencial electrostático, necesari
o para iniciar la descarga de la Corona, -
statvolts

D_d = Diámetro exterior del electrodo de descarga, -
cm

D_t = Diámetro interior del tubo colector, cm

La magnitud de I en la práctica es de 3×10^3 a -
 3×10^4 statamp/cm (0.001 a 0.01 mA/cm).

La "International Critical Tables", vol. 6, pág. 207
da las movilidades iónicas.

La carga del espacio media está expresada por la e-
cuación III.8

$$\bar{v}_m = \frac{4(E - E_c)}{\pi D_t^2 \epsilon} \quad (\text{III.8})$$

donde:

\bar{v}_m = Densidad de iones, número/cm³

- E = Diferencia de potencial electrostático, stat - volts
- E_c = Diferencia de potencial electrostático, necesario para iniciar la descarga de la Corona, stat volts
- D_t = Diámetro interior del tubo colector, cm
- ϵ = Carga eléctrica elemental (4.8×10^{-10} ues)

Valores de trabajo ϵ_m reales son 10^8 a $10^9/\text{cm}^3$.

En el espacio fuera de la proximidad de la descarga de Corona, la intensidad del campo es sensiblemente constante, y se obtiene un valor medio de la ecuación III.9

$$\mathcal{E} = \sqrt{\frac{2 I}{\lambda i}} \quad (\text{III.9})$$

aplicable si la diferencia de potencial es superior al potencial crítico necesario para la descarga de la CORONA.

A causa de la cantidad de movimiento transferido por los iones gaseosos, que se mueven en el campo eléctrico, a las moléculas gaseosas que lo rodean, se establece una circulación de gases entre los electrodos denominada "VIENTO-ELECTRICO O IONICO". En los precipitadores electrostáticos, la velocidad de tal circulación es de 0.60 m/seg. Como consecuencia de la transferencia de cantidad de movimien

to, la presión en el electrodo colector es poco mayor que en el electrodo de descarga.

- Carga de las partículas.

Son 3 las fuerzas que actúan sobre un ión gaseoso en la proximidad de una partícula: fuerzas atractivas, debido a la intensidad del campo y a la imagen iónica, y fuerzas repulsivas debidas al efecto Coulomb.

Para partículas esféricas de diámetro superior a 1 - micra, la carga final adquirida, la dá la ecuación III.10.

$$N_0 = \frac{\xi \epsilon D_p^2}{4\epsilon} \quad (\text{III.10})$$

siendo:

N_0 = Número de cargas eléctricas elementales adquiridas por una partícula.

$\xi = \left[1 + 2 \frac{(\delta - 1)}{(\delta + 2)} \right]$ varía desde 1 para materiales - cuya constante dieléctrica es 1 hasta 3 para conductores, adimensional.

ϵ = Gradiente de potencial electrostático, stat - volts/cm

D_p = Diámetro de la partícula, cm

ϵ = Carga eléctrica elemental (4.8×10^{-10} ues)

δ = Constante dieléctrica

Para partículas de diámetro menor a 1 micra, la carga final puede aproximarse por la ecuación empírica III.11

$$N_o = 3.4 \times 10^3 D_p T \quad (\text{III.11})$$

Aquí:

D_p = Diámetro de la partícula, cm

T = Temperatura absoluta del gas, °K

- Movilidad de las partículas.

Igualando la fuerza eléctrica que actúa sobre una partícula, a la resistencia debida al rozamiento con el aire, puede expresarse la movilidad de la partícula por la ecuación III.12

$$\lambda_p = \frac{U_e}{E_p} \quad (\text{III.12})$$

donde:

λ_p = Movilidad de la partícula, (cm/seg)/(stat volts/cm)

E_p = Gradiente medio de potencial electrostático en la etapa de separación, statvolts/cm

U_e = Velocidad de migración, cm/seg

La velocidad de migración de una partícula está expresada por la ecuación III.13.

$$U_e = \frac{\xi \epsilon_i E_p r}{6 \pi \mu} \quad (\text{III.13})$$

siendo:

$$\xi = \left[1 + \frac{(\delta - 1)}{(\delta + 2)} \right], \text{ adimensional}$$

ϵ_i = Gradiente efectivo de potencial electrostático, en la etapa de ionización, statvolts/cm

r = Radio de la partícula, cm

μ = Viscosidad del gas, Poise

Sustituyendo en la ecuación III.14

$$\lambda_p = \frac{\xi \epsilon_i r}{6 \pi \mu} \quad (\text{III.14})$$

A mayor voltaje aplicado, son más las partículas atraídas hacia la superficie de colección, sin embargo, está limitado por el voltaje de ruptura del gas. El voltaje del precipitador siempre será menor que el voltaje de ruptura. Otro factor limitante es la constante dieléctrica representada por ϵ . Su valor varía de 1.0 a 2.5 para aislantes y para el agua es 2.9.

Esta es la razón por la que un aumento en la temperatura

tura de rocío del gas, favorece la precipitación de las partículas suspendidas.

- Rendimiento de la separación.

La eficiencia de colección de un precipitador electrostático, sigue una función exponencial, como la ecuación III.15.

$$\eta = 1 - e^{-\frac{Ae}{q} Ue} \quad (\text{III.15})$$

donde:

η = Eficiencia

Ae = Area de colección, cm^2

q = Flujo de gas, cm^3/seg

Ue = Velocidad de migración de las partículas, cm/seg

Al término $Ae/q = Ke$, se le llama Superficie de Colección Específica, el cual es constante para un precipitador específico, operando con un volumen o flujo de gas constante.

Sustituyendo de la ecuación III.15, tenemos:

$$\eta = 1 - e^{-Ke Ue} \quad (\text{III.16})$$

Para precipitadores de placas y de cilindros concéntricos, K_e está expresada por las ecuaciones III.17 y III.18 respectivamente:

$$K_e = Le / (BeVe) \quad (III.17)$$

$$K_e = 4 Le / (DtVe) \quad (III.18)$$



Aquí:

L_e = Longitud del electrodo colector en la dirección de la corriente de gas, cm

V_e = Velocidad media del gas, cm/seg

B_e = Espaciamiento entre placas, cm

D_t = Diámetro interno del cilindro colector, cm

Sustituyendo las ecuaciones III.17 y III.18 en la III.16:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{Le}{BeVe} U_e} \quad (III.19)$$

$$\eta = 1 - e^{-\frac{4Le}{Dt Ve} U_e} \quad (III.20)$$

De las ecuaciones III.19 y III.20 concluimos, que la EFICIENCIA del precipitador aumenta, reduciendo el espaciado entre placas, o la velocidad del gas; por otra par

te, aumentando la longitud del electrodo colector o la velocidad de migración de las partículas.

La velocidad del gas puede ser expresada de acuerdo a la ecuación III.21

$$V_e = \frac{L_e}{t} \quad (III.21)$$

donde:

t = tiempo de residencia del gas en el precipitador.

Aplicando la ecuación III.21 a las ecuaciones III.19 y III.20:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{t U_e}{B_e}} \quad (III.22)$$

Obviamente, la ecuación III.22 indica, si mayor es el tiempo de residencia, mayor es la eficiencia del precipitador.

III.2.2 PRINCIPIOS DE OPERACION

Basicamente, un precipitador es un aparato donde fuerzas eléctricas son utilizadas para separar partículas-

suspendidas en gases; dos efectos básicos son necesarios para obtener precipitación:

- 1º A la partícula suspendida se le debe de dar una carga eléctrica.
- 2º Después se le debe pasar a través de un campo eléctrico de intensidad suficiente para asegurar su eliminación efectiva de la corriente de ga - ses.

En la práctica, la carga eléctrica de las partículas es siempre llevada a cabo por medio de IONES producidos en la CORONA de descarga de corriente directa.

El método general de producir y neutralizar la CORONA de descarga es como sigue:

Corriente uni-direccional de alto voltaje es aplicada a finos electrodos por medio de una unidad Transforma - dor-elevador-rectificador. Una CORONA envolvente se forma sobre la superficie del alambre y produce una densa concen - tración de IONES en todo el espacio de gas entre los elec - trodos. Las partículas suspendidas en la corriente de ga - ses son cargadas por el bombardeo con IONES a medida que - ellos entran a este espacio de la CORONA de descarga, y en

tonces son colectadas y precipitadas sobre la superficie - de la placa colectora adyacente conectada "a tierra".

La precipitación requiere el uso de CORONA de descarga unipolar.

La descarga debe ocurrir únicamente de uno de los - electrodos y solo corriente directa o uni-direccional puede ser usada.

CORONAS de corriente alterna han sido usadas, sin embargo, ellas solo producen un movimiento oscilante de las partículas suspendidas, y la colección de partículas es - lenta. La CORONA de corriente directa produce una fuerza permanente, moviendo a las partículas hacia el electrodo - positivo y la colección es rápida.

Los electrodos para la CORONA de descarga que han sido usados en precipitadores varían en tipo y forma. CORONA de polaridad negativa es usada para casi todos los trabajos de precipitación eléctrica.

Las características corriente-voltaje de la CORONA - para un sistema de electrodos dado depende de la forma de la onda de voltaje y polaridad, la clase de gas, la presión y la temperatura, así como de los contaminantes pres -

sentos.

Curvas típicas corriente-voltaje para electrodos de descarga con CORONA positiva y negativa se muestran en la Figura III.6.

Las características importantes de notar son el mu - cho mayor voltaje de "chispeo" y el flujo de corriente de la CORONA negativa, los dos favorables para la precipitaci - ción eléctrica.

La CORONA positiva tiende a ser inestable y esporádi - ca, la CORONA negativa, sin embargo, hará producir mayor - concentración de ozono que la CORONA positiva.

La Figura III.7 muestra la trayectoria del flujo de corriente entre alambres y placas. Este flujo, también - llamado "viento eléctrico", es el resultado de una migraci - ón masiva de iones de gas cargados negativamente que se alejan del alambre cargado negativamente hacia la placa col - lectora aterrizada, cargada relativamente positiva.

En el precipitador de Una Etapa (tipo COTTRELL) se - distinguen 6 pasos principales (Figura III.8):

1. Ionización del gas portador

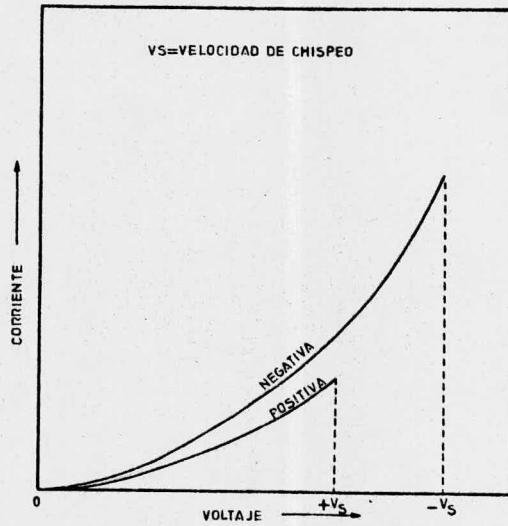


FIG. No. III.6.

CARACTERISTICAS CORRIENTE

VOLTAJE PARA CORONAS POSITIVA

NEGATIVA EN AIRE

TESIS PROFESIONAL

JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

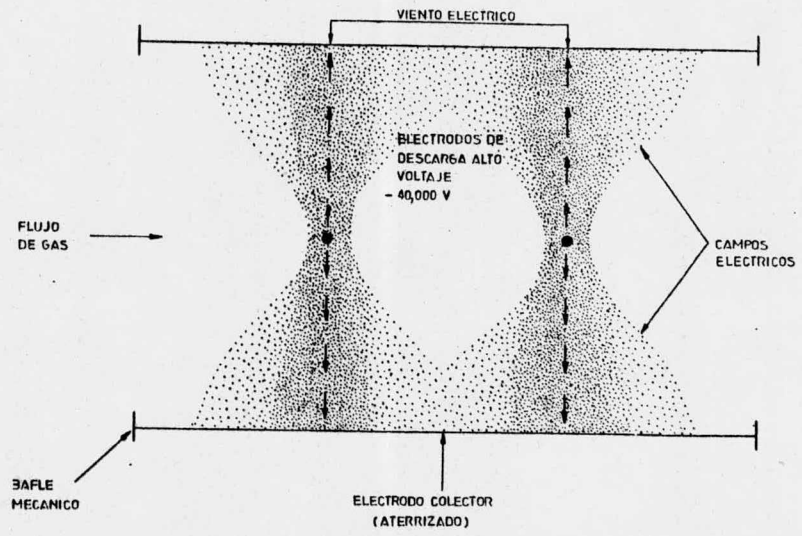
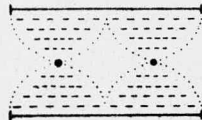


FIG. No. III.7
CAMPO ELECTRICO DE ALTO VOLTAJE
TESIS PROFESIONAL
JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ



1 FLUJO DE IONES
NEGATIVOS DE GAS



2 EL POLVO ES CARGADO
NEGATIVAMENTE



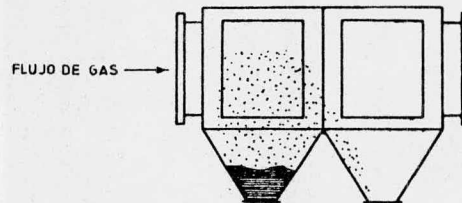
3 EL POLVO ES CAPTADO POR
LAS PLACAS ATERRIZADAS



4 SE FORMA UNA CAPA DE POLVO



5 LA CAPA DE POLVO ES
DESPRENDIDA DEL COLECTOR



6 POLVO AGLOMERADO CAE
DENTRO DE LA TOLVA

FIG. No. IIIA

LOS 6 PASOS DEL
PROCESO COTTRELL

TESIS PROFESIONAL
JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

2. Carga de las partículas
3. Precipitación del polvo
4. Construcción de la capa de polvo
5. Golpeo del electrodo colector
6. Caída del polvo dentro de la tolva

Los pasos 1, 2, 3 y 4 son continuos. Los pasos 5 y 6 son programados a intervalos cuya duración va de 1 minuto a varias horas, dependiendo de muchos factores de operación.

1. Ionización del gas portador.

Con la enorme diferencia de potencial entre los electrodos, se tiene la suficiente energía para ionizar el gas portador.

2. Carga de las partículas.

Como las partículas del polvo son llevadas a través de los pasos de gas por el gas introducido, ellas chocan con los iones de gas negativos y entonces se cargan NEGATIVAMENTE.

Debido a que los iones de gas son miles de veces más pequeños que el polvo microscópico y por su gran número, -

hay fuerza suficiente de carga para casi cualquier problema de colección.

3. Precipitación del polvo.

Las partículas de polvo cargadas negativamente se mueven rápidamente hacia las placas (positivas) aterrizadas, a las cuales ellas se pegan solas, siendo sostenidas por poderosas fuerzas eléctricas.

4. Construcción de la capa de polvo.

Las partículas de polvo forman una creciente capa sobre los electrodos colectores, y la carga negativa gradualmente entra desde el polvo hasta el electrodo colector aterrizado. A medida que la capa engruesa, las cargas sobre el polvo recientemente precipitado deben ser conducidas a través de la capa del polvo; para este flujo de corriente existe oposición llamada "resistividad" del polvo. Casi todos los gases residuales a los 200°C ofrecen máxima resistencia, es decir, mínima aptitud para la deposición. El gas residual húmedo se mantiene en su resistividad por debajo de la crítica del polvo, con aproximadamente 10^{11} Ω /cm, mientras que el seco, con solamente 20°C de punto de rocío a temperaturas de aproximadamente 100°C y 300°C sobrepasa el límite crítico.

Por tanto, tales gases residuales tienen que ser despolvados por encima de 300°C o por debajo de 100°C.

Polvos con resistividad por debajo de los $10^4 \Omega/\text{cm}$ no pueden separarse en precipitadores eléctricos, por producirse en esta región el fenómeno de "partículas danzantes" ocasionado por la rapidez del cambio de polaridad del polvo. A medida que la resistividad aumenta, arriba de $2 \times 10^{11} \Omega/\text{cm}$, la eficiencia de colección disminuye.

Los precipitadores operan con éxito en polvos cuya resistividad está en el rango de $10^7 - 10^{11} \Omega/\text{cm}$.

5. Golpeo del electrodo colector.

Después de que una capa de polvo de $1/16 - 1/4$ de pulgada ha sido precipitada, las partículas de polvo próximas al electrodo colector han perdido mucha de su carga hacia la placa aterrizada. La atracción eléctrica ha sido debilitada. Las partículas de polvo recién precipitadas aún conservan mucha de su carga, siendo aislada eléctricamente de la placa por la capa de polvo, manteniendo así la capa entre el electrodo colector. Un golpe bien marcado causa que la capa de polvo, se separe lejos del electrodo colector. La fuerza de golpeo está restringida, de manera que permita que la capa sea fragmentada en aglomeraciones-

Por tanto, tales gases residuales tienen que ser despolvados por encima de 300°C o por debajo de 100°C.

Polvos con resistividad por debajo de los $10^4 \Omega/\text{cm}$ no pueden separarse en precipitadores eléctricos, por producirse en esta región el fenómeno de "partículas danzantes" ocasionado por la rapidez del cambio de polaridad del polvo. A medida que la resistividad aumenta, arriba de $2 \times 10^{11} \Omega/\text{cm}$, la eficiencia de colección disminuye.

Los precipitadores operan con éxito en polvos cuya resistividad está en el rango de $10^7 - 10^{11} \Omega/\text{cm}$.

5. Golpeo del electrodo colector.

Después de que una capa de polvo de $1/16 - 1/4$ de pulgada ha sido precipitada, las partículas de polvo próximas al electrodo colector han perdido mucha de su carga hacia la placa aterrizada. La atracción eléctrica ha sido debilitada. Las partículas de polvo recién precipitadas aún conservan mucha de su carga, siendo aislada eléctricamente de la placa por la capa de polvo, manteniendo así la capa entre el electrodo colector. Un golpe bien marcado causa que la capa de polvo, se separe lejos del electrodo colector. La fuerza de golpeo está restringida, de manera que permita que la capa sea fragmentada en aglomeraciones-

relativamente grandes de partículas de polvo, para no hacerla volver a las partículas de polvo originales.

6. Caída del polvo dentro de la tolva.

Las aglomeraciones relativamente grandes caen dentro de las tolvas bajo la influencia de la gravedad, justamente como en la cámara de Asentamiento. Muchos precipitadores eléctricos se operan a velocidades del gas en el rango de 3 - 6 ft/seg para permitir el tiempo suficiente de asentamiento.

El alto voltaje se mantiene, para recargar y reprecipitar las partículas finas, las cuales pueden volver a pasar a la corriente de gases durante el ciclo de golpeo.

III.2.3 MANEJO DEL PRECIPITADOR

El manejo del precipitador es relativamente sencillo. Por lo general, existen dos centros de control; uno situado junto con los precipitadores y otro en el tablero de control de hornos. Normalmente, el ajuste inicial se realiza en la cabina situada junto a los precipitadores.

En la Figura III.9 se muestra el tablero de control de un precipitador.

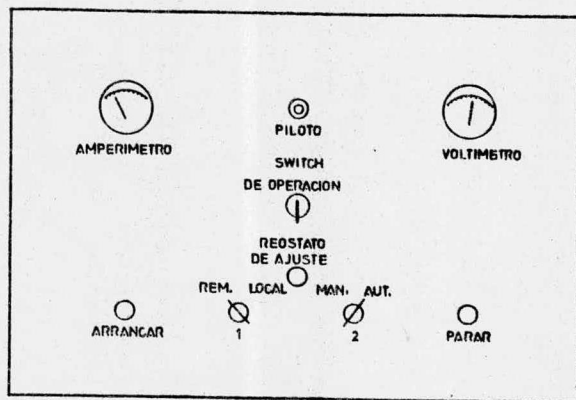


FIG. No. III.9

TABLERO DE CONTROL

DEL PRECIPITADOR

TESIS PROFESIONAL

JOAQUIN GODINEZ HERNANDEZ

El arranque y ajuste se hace de la forma siguiente:

- Cerrar las "cuchillas" de cada módulo (en el techo del precipitador)
- Cerrar el switch de operación
- Oprimir el botón de arranque
- Poner la perilla 1 en local
- La perilla 2 en manual
- Con el reóstato de ajuste, aumentar voltaje hasta máximo permitido (no haya "chispeo" excesivo)
- Poner perilla 1 en remoto
- Perilla 2 en automático

Hecho lo anterior, el equipo automático selecciona - el voltaje requerido por el precipitador, de acuerdo a sus condiciones de operación.

Para parar el precipitador, basta oprimir el botón - correspondiente.

III.2.4 PROBLEMAS COMUNES

1. Tierra del sistema de descarga de alto voltaje.
Se manifiesta porque al ajustar el amperímetro marca alto paso de corriente, mientras el voltímetro indica cero.

Las causas pueden ser:

- Alta humedad
- Algún "puente"
- Electrodo roto
- Acumulación excesiva de polvo.

2. Baja anormal de voltaje.

El voltaje que marca el instrumento es por debajo del de diseño. Se debe a un mal alineamiento entre "cortinas" y electrodos de descarga. Ocasiona baja en la eficiencia de colección.

3. Acumulación de CO.

Problema del horno no del precipitador, sin embargo, puede ocasionar explosión en el precipitador por el "chisporroteo" en el mismo. Debe existir analizador de CO para desconectar automáticamente el precipitador cuando haya CO en concentración explosiva.

4. Acumulación excesiva de polvo.

Si por alguna razón se acumula exceso de polvo en el precipitador, hay la posibilidad de deformación de la estructura del equipo, ocasionando baja en la eficiencia de colección. También, en ciertos casos el precipitador se "pone a tierra".

III.3 APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

- Aplicaciones

La precipitación electrostática puede ser aplicada a cualquier clase de gas, excepto mezclas explosivas; así como a una gran variedad de aerosoles.

Las aplicaciones industriales más importantes son:

- 1) Plantas de Cemento
- 2) Industria Papelera
- 3) Plantas de Acero
- 4) Plantas de Servicio
- 5) Industria del Petróleo
- 6) Industria del Negro de Carbón
- 7) Industria de Metales No-ferrosos
- 8) Industria Química

- Ventajas

Las ventajas más importantes son:

1. Alta eficiencia de colección con un mínimo de costos de operación.
2. Requiere la menor energía de todos los colectores de

alta eficiencia.

3. Su costo de mantenimiento es bajo.
4. Es altamente eficaz para separar partículas sólidas y líquidas.
5. Es ilimitado el tamaño de las partículas sólidas o líquidas en suspensión que pueden ser separadas.
6. Se pueden variar los porcentajes de separación según los requerimientos.
7. Es ilimitada la concentración de partículas en el gas que va a ser tratado.
8. En algunos casos se puede operar a temperaturas tan altas como 590°C y presión de 8.8 Kg/cm^2 .
9. Se puede dar diversas formas al equipo con arreglo al espacio disponible. Es posible elegir los materiales de construcción conforme a la corrosión.
10. Es variable el método de extracción de los materiales precipitados.

- Desventajas

Las Únicas desventajas son:

1. Altos costos de instalación en capacidades abajo de 50,000 ft³/min.
2. Eficiencia impredecible en polvo de alta resistividad.
3. Pérdidas de colección a flujos de gas arriba del rango de diseño.

C A P I T U L O I V

ANALISIS ECONOMICO

ANALISIS ECONOMICO

El sistema de captación de polvo está formado por:

- Precipitador completo
- Transportadores
- Silos o Depósitos
- Equipo móvil de transporte.

Los Costos de Operación (Costo Total) se clasifican en:

- Fijos
- Variables

Los Costos Fijos son aquellos independientes de la capacidad del sistema, va sea para producir o como en este caso recolectar; trabaje o no, han de pagarse. Entre los costos fijos están: impuesto predial, seguro, salarios por contrato, sueldos, algunas partes de mantenimiento y otros semejantes.

Los Costos Variables son una función de la operación

del sistema, por esta razón se les llama Variables y son: - materia prima, electricidad, agua de proceso, agua de en - friamiento, etc.

Costos de Operación.

Para este caso, en los dos procesos de fabricación - de cemento (Vía Húmeda y Vía Seca) se hace el desarrollo - para evaluar los Costos de Operación que tiene la compañía para captar y disponer el polvo de los precipitadores elec - trostáticos.

Los Sistemas de Captación son así:

La batería de precipitadores de los hornos rotatorios VIA HUMEDA capta el polvo, el gusanillo de cada precipita - dor lo lleva hacia un gusanillo general, el cual descarga - en el depósito de un elevador de cangilones, que sube el - polvo a 2 silos de almacenamiento. De aquí, el polvo se - transporta con camiones especiales hacia áreas dispuestas - para almacenamiento, en tanto se le encuentra un uso apro - piado; ya que su composición química no permite utilizar - lo nuevamente como material "crudo".

En el proceso VIA SECA, el precipitador recibe la co - rriente de gases sucios, proveniente de la Torre de Acondi -

cionamiento de Gases, donde se capta algo de polvo (8 a - 10%).

El polvo de la torre y el precipitado en el electro-filtro lo sacan gusanillos para este fin, llevando el polvo a un silo de almacenamiento, con el auxilio de un elevador de cangilones.

Este polvo se bombea al silo de "crudo" (homogeneización) para reusarse, ya que no hay diferencia apreciable - entre el polvo precipitado y el "crudo" que se alimenta al equipo de calcinación.

Este trabajo está hecho para las condiciones económicas del año de 1975.

IV.1 PROCESO VIA HUMEDA

Se hace evaluación del costo de captar y transportar el polvo hacia áreas especiales, fuera de la planta.

IV.1.1. COSTOS FIJOS

1. Depreciación.

1.a) Precipitador electrostático.

1.b) Obra civil del precipitador.

1.c) Vagonetas para polvo.

1.d) Traxcavo.

2. Mantenimiento.

2.a) Precipitador electrostático.

2.b) Vagonetas para polvo.

2.c) Traxcavo.

3. Personal.

3.a) Ingeniería y Supervisión.

3.b) Encargados de precipitadores.

3.c) Operador de traxcavo.

1. Depreciación.

1.a) Precipitador electrostático.

Costo del precipitador electrostático marca WESTERN-
PRECIPITATION, de 6 módulos en 2 cámaras (incluye instala-
ción y obra civil). \$ 9,641,140.00 que consta
de lo siguiente:

- Carcaza
- Sistema de electrodos colectores

- Sistema de electrodos de descarga.
- Placas perforadas.
- Aisladores eléctricos.
- 3 tableros con resistencias de carga
- 3 transformadores A.V. con rectificador de silicio c/u.
- 3 reactores saturables.
- 2 gusanillos extractores de polvo.
- 2 moto-reductores de los gusanillos.
- Estructura de sostén
- 18 golpeadores neumáticos
- 3 ductos de suministro de alto voltaje.
- 5 ductos de conexión de gases
- 3 barras de alto voltaje
- 2 gusanillos generales para polvo*
- 2 moto-reductores de los gusanillos generales*
- 2 elevadores generales para polvo*
- 2 moto-reductores de los elevadores generales*
- 2 Silos de Almacenamiento de polvo*
- 8 válvulas de descarga de polvo

Líneas eléctricas de: Energía al precipitador

Motores

- Línea de aire a golpeadores.
- Aislamiento térmico

* Proporción para 1 precipitador.

- Alumbrado
- Escaleras, pasillos y otros.
- Fusibles
- Tablero de control del precipitador
- Programador de golpeadores
- Control de gusanillos del precipitador
- Control de gusanillos generales*
- Control de elevadores generales*
- Analizador de CO
- Analizador de O₂
- Control de analizadores
- Indicador de nivel (tolvas).
- Instrumentos de control del precipitador en hor - nos
- Detectores de movimiento de gusanillos y elevadores
- Líneas de instrumentación
- 1 Jennings (válvula al vacío)

El costo de obra civil del precipitador es
 \$ 220,000.00 formada por:

Bases de:

- Precipitador

* Proporción para 1 precipitador.

- Tolvas de elevadores generales*
- Gusanillos generales*
- Gusanillos del precipitador
- Elevadores generales*
- Moto-reductores generales*
- Silos para polvo.

Caseta "local" de control*

- Cálculos de Depreciación.

Para todos los cálculos de Depreciación, se emplea - aquí la fórmula de la Línea Recta:

$$D = \frac{P - L}{n}$$

donde:

D - Depreciación.

P - Costo inicial del equipo (sin obra civil)

L - Valor de rescate.

n - Tiempo de vida útil (10 años, SHCP).

Para el precipitador, P y L se obtienen de la manera siguiente:

P = Costo inicial del equipo (sin obra civil)

P = Costo del precipitador - Costo obra civil

P = \$ 9,641,140.00 - 220,000.00

= \$ 9,421,140.00

L = Valor de rescate.

Peso del equipo metálico:

Precipitador completo 41,460.0 Kg.

Gusanillos, silos y eleva

dores 25,352.3 Kg.

Peso Total 75,352.3 Kg

Se considera este peso como "Chatarra", cuyo costo -
en el mercado es \$ 1.25/Kg; por tanto:

L = 75,352.3 Kg x \$ 1.25/Kg

= \$ 94,190.38

Sustituyendo en la fórmula:

$$D = \frac{\$ 9,421,140.00 - 94,190.38}{10}$$

$$D = 932,695.00 \frac{\$}{\text{año}}$$

1.b) Obra civil del precipitador

Se emplea la misma fórmula que para el precipitador-

sólo que aquí $n = 20$ años.

Entonces:

$$P = \$ 220,000.00$$

$$L = 0$$

$$n = 20 \text{ años (SHCRL)}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$D = \frac{\$ 220,000.00 - 0}{20}$$

$$D = 11,000.00 \quad \frac{\$}{\text{año}}$$

1.c) Vagonetas para polvo

2 vagonetas

Marca: EUCLID

Capac.: 18 ton

Peso: 15 ton (aprox.)

Costo: \$ 650,000.00

Depreciación (1 vagoneta):

$$P = \$ 650,000.00$$

$$L = 15,000.0 \text{ Kg} \times \$ 1.25/\text{Kg}$$

$$L = \$ 18,750.00$$

$$n = 10 \text{ años (SHCP)}$$

$$D = \frac{\$ 650,000.00 - 18,750.00}{10}$$

$$D = 63,125.00 \frac{\$}{\text{año}} \quad (1 \text{ vagoneta})$$

Para 2 vagonetas:

$$D = 63,125.00 \frac{\$}{\text{año}} \times 2$$

$$D = 126,250.00 \frac{\$}{\text{año}}$$

Nota: Depreciación, Costos de Mantenimiento y Personal de las vagonetas y traxcavo, así como salarios de Encargados de precipitadores y sueldo de Ingeniería y Supervisión están calculados para un sistema compuesto de 26 módulos (repartidos en 5 precipitadores) y deben ajustarse para un precipitador de 6 módulos.

El ajuste se hace multiplicando la cantidad respectiva por el factor 6/26.

Por eso, la proporción que corresponde a 1 precipitador de la Depreciación de 2 vagonetas para polvo es:

$$\begin{aligned} \text{Depreciación} \\ 2 \text{ vagonetas} &= 126,250.00 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\ &= 29,134.62 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

1.d) Traxcavo.

1 Traxcavo

Marca: CATERPILLAR

Capac.: 5 yd³

Peso: 2 ton (aprox.)

Costo: \$ 1,250,000.00

Depreciación:

$$P = \$ 1,200,000.00$$

$$L = 22,000.0 \text{ Kg} \times \$ 1.25/\text{Kg} \text{ ("chatarra")}$$

$$L = \$ 27,500.00$$

$$n = 10 \text{ años (SHCP)}$$

$$D = \frac{\$ 1,200,000.00 - 27,500.00}{10}$$

$$D = 117,250.00 \frac{\$}{\text{año}}$$

El traxcavo solamente trabaja 1 turno de 8 horas al día en el área de precipitadores, por eso se considera 1/3

de la Depreciación total.

$$\begin{aligned} \text{Depreciación traxcavo} & \\ \text{área de precipitadores} & = 117,250.00 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{1}{3} \\ & = 39,083.33 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Para 1 precipitador:

$$\begin{aligned} \text{Depreciación traxcavo} & \\ \text{área de precipitadores} & = 39,083.33 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\ & = 9,019.23 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Resumen para Depreciación: $\frac{\$}{\text{año}}$

Depreciación precipitador	932,695.00
Depreciación obra civil precipitador	11,000.00
Depreciación vagonetas	21,134.62
Depreciación traxcavo	9,019.23
Depreciación total	<u>973,848.85</u>

2. Mantenimiento.

2.a) Precipitador electrostático.

Se considera como 3% anual del costo inicial del equi

po (sin obra civil).

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} \\ \text{precipitador} &= \$ 9,421,140.00 \times 0.03 \\ &= 282,634.20 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

2.b) Vagonetas para polvo.

Se considera lo mismo que para el precipitador, 3% -
anual del costo inicial.

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} \\ \text{1 vagoneta} &= \$ 650,000.00 \times 0.03 \\ &= 19,500.00 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} \\ \text{2 vagonetas} &= 19,500.00 \frac{\$}{\text{año}} \times 2 \\ &= 39,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Para 1 precipitador:

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} \\ \text{2 vagonetas} &= 39,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\ &= 9,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

2.c) Traxcavo.

3% anual del costo inicial.

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} \\ \text{traxcavo} &= \$ 1,200,000.00 \times 0.03 \\ &= 36,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

También se toma 1/3 de esto, ya que solo trabaja 1 - turno de 8 hrs. al día para el área de precipitadores.

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} \\ \text{traxcavo área} \\ \text{precipitadores} &= 36,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{1}{3} \\ &= 12,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Para 1 precipitador:

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento} \\ \text{traxcavo área} \\ \text{precipitadores} &= 12,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\ &= 2,769.23 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Resumen para Mantenimiento:

	$\frac{\$}{\text{año}}$
Mantenimiento precipitador	282,634.20
Mantenimiento vagonetas	9,000.00
Mantenimiento traxcavo	<u>2,769.23</u>
Mantenimiento total	294,403.43

3. Personal

	- \$ año
3.a) Ingeniería y Supervisión.	
Sueldo	336,000.00
Vacaciones	20,000.00
Utilidades	14,000.00
Aguinaldo	16,000.00
Otros	48,000.00
Total	<u>434,000.00</u>

Para 1 precipitador de 6 módulos, de 29 que componen los dos sistemas de recolección (Vía Húmeda y Vía Seca):

$$\begin{aligned}
 \text{Ingeniería y Supervisión} &= 434,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\
 &= 89,793.10 \frac{\$}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

3.b) Encargados de precipitadores.

Estos trabajadores también manejan las 2 vagonetas para polvo; son 6 por 24 horas (2 en cada turno de 8 horas c/u).

En el turno de 6:00 - 14:00 h se pagan 8 h normales, en el de 14:00 - 22:00 h 8.5 h y en el de 22:00 - 6:00 h,

Por lo que concierne a utilidades, aguinaldo, vaca - ciones y "porcentaje" se considera igual para los 3 turnos.

Nota: Para todos los cálculos anuales, se considera el año de 360 días. En los pagos de vacaciones se usan 20-días por año.

Salarios para los 3 turnos (anuales)		$\frac{\$}{\text{año}}$
6:00 - 14:00 h	$18.97 \frac{\$}{h} \times 8 \frac{h}{d} \times 360 \frac{d}{\text{año}}$	54,633.60
14:00 - 22:00 h	$18.97 \frac{\$}{h} \times 8.5 \frac{h}{d} \times 360 \frac{d}{\text{año}}$	58,048.20
22:00 - 6:00 h	$18.97 \frac{\$}{h} \times 9.0 \frac{h}{d} \times 360 \frac{d}{\text{año}}$	61,462.80
Vacaciones	$18.97 \frac{\$}{h} \times 8 \frac{h}{d} \times 20 \frac{d}{\text{año}}$	3,035.20
"Porcentaje"	$650.00 \frac{\$}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}}$	7,800.00
Utilidades		3,000.00
Aguinaldo		5,000.00

Percepción de encargados de precipitadores en los 3-
turnos (anual).

	Turno		\$ año
2 Encargados	6:00 - 14:00	Salario	54,633.60
		Vacaciones	3,035.20
		"Porcentaje"	7,800.00
		Utilidades	3,000.00
		Aguinaldo	<u>5,000.00</u>
			73,468.80 x 2
	Total		146,937.60
	14:00 - 22:00	Salario	58,048.20
		Vacaciones	3,035.20
		"Porcentaje"	7,800.00
		Utilidades	3,000.00
		Aguinaldo	<u>5,000.00</u>
			76,883.40 x 2
	Total		153,766.80
	22:00 - 6:00	Salario	61,462.80
		Vacaciones	3,035.20
		"Porcentaje"	7,800.00
		Utilidades	3,000.00
		Aguinaldo	<u>5,000.00</u>
			80,298.00 x 2
	Total		160,596.00

Percepción anual	146,937.60 $\frac{\$}{\text{año}}$	Turno 6:00 - 14:00 h
Encargados de -- precipitadores = +	153,766.80	14:00 - 22:00 h
	<u>160,596.00</u>	22:00 - 6:00 h
=	461,300.40 $\frac{\$}{\text{año}}$	

Para 1 precipitador:

$$\begin{aligned}
 &\text{Percepción Anual} \\
 &\text{Encargados de -} \\
 &\text{precipitadores} = 461,300.40 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\
 &= 106,453.93 \frac{\$}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

3.c). Operador de Traxcavo.

Esta máquina trabaja 8 h por día en el área de precipitadores, generalmente de 6:00 - 14:00 h siendo solamente 1 operador por turno.

		$\frac{\$}{\text{año}}$
Percepción operador traxcavo (anual)		
Salario	21.075 $\frac{\$}{h} \times 8 \frac{h}{d} \times 360 \frac{d}{\text{año}}$	60,696.00
Vacaciones	21.075 " $\times 8$ " $\times 20$ "	3,372.00
"Porcentaje"	772.09 $\frac{\$}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}}$	8,665.08
Aguinaldo		5,554.50

Utilidades	<u>3,332.70</u>
Total	81,620.28

Para 1 precipitador:

$$\begin{aligned}
 \text{Percepción anual} \\
 \text{operador traxcavo} &= 81,620.28 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\
 &= 18,835.45 \frac{\$}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

Resumen para Personal: $\frac{\$}{\text{año}}$

Ingenierfa y Supervisión	89,793.10
Encargados de precipitadores	106,453.93
Operador de traxcavo	<u>18,835.45</u>
Personal total	215,082.48

Resumen para Costos Fijos:

Depreciación	973,848.85
Mantenimiento	294,403.43
Personal	<u>215,082.48</u>
Total = Costos Fijos = C_F	1'483,334.76

IV.1.2 COSTOS VARIABLES

Los Costos Variables para 1 precipitador electrostático marca WESTERN PRECIPITATION de 6 módulos en 2 cámaras son:

1. Energía eléctrica
2. Diesel
3. Aire comprimido

La energía eléctrica se midió directamente con un wattmetro, el diesel para vagonetas y traxcavo se cuantificó de las notas en el almacén de la fábrica.

El aire comprimido se produce en la fábrica por medio del equipo de compresión respectivo, sin embargo no se conoce su costo de producción, por lo que se hace análisis de costos para él.

- Costo de producción aire comprimido.

Se emplea para este servicio el equipo siguiente:

- 1 Compresor

Marca: NASH-HYTOR

Tipo: Anillo líquido

Capac.: 395 SCFM

Presión: 80 psig

Tamaño: 1256

RPM: 1750

Motor marca: IEM

H.P.: 150

Volts: 440

Amps: 170

RPM: 1780

Hz: 60

Costo de este equipo instalado \$ 641,104.00

- Bomba de agua al compresor:

Marca: WORTHINGTON

Tipo: ICN - 62

Capac.: 40 GPM

RPM: 3500

Motor marca: IEM

H.P.: 5

RPM: 3516

Volts: 440

Amps: 6.5

Hz: 60

Costo de esta bomba instalada \$ 20,000.00

- Bomba de agua recuperada de las compresoras:

El agua tratada usada en las compresoras NASH-HYTOR se vuelve a usar, por lo cual no se considera su costo, -- sino solamente el costo de bombeo:

1 Bomba

Marca: AURORA

Capac.: 4900 LPM

Cabeza: 12 m

Motor marca: SIEMENES

H.P.: 30

RPM: 1450

Volts: 440

Amps: 39

Hz: 60

Costo de esta bomba instalada \$ 24,960.00

Para calcular el costo de producción del aire comprimido se hace lo siguiente:

$C_T = C_F + C_V$ $C_T =$ Costo Total (Costos de Operación)

$C_F =$ Costos Fijos

$C_V =$ Costos Variables

Costos Fijos:

Los costos fijos en este caso son:

- Depreciación
- Personal
- Mantenimiento

Costo de Depreciación.

La Depreciación se calcula con la fórmula de la Línea Recta:

$$D = \frac{P - L}{n} \text{ ya empleada anteriormente.}$$

Para el equipo de compresión:

$$P = \$ 641,104.00$$

$$L = 800.0 \text{ kg} \times \$ 1.25/\text{Kg}$$

$$L = \$1,000.00$$

$$n = 10 \text{ años (SHCP)}$$

$$\begin{aligned} \text{Depreciación} \\ \text{equipo de com} \\ \text{presión} \end{aligned} = \frac{\$ 641,104.00 - 1,000.00}{10}$$

$$= 64,010.40 \frac{\$}{\text{año}}$$

Bomba de agua al compresor:

$$P = \$ 20,000.00$$

$$L = 100.0 \text{ Kg} \times \$ 1.25/\text{Kg}$$

$$L = \$ 125.00$$

$$n = 10 \text{ años (SHCP)}$$

$$\begin{aligned} \text{Depreciación bomba} &= \frac{\$ 20,000.00 - 125.00}{10} \\ \text{de agua al compresor} &= 1,987.70 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Bomba de agua recuperada:

Sirve para 3 compresores iguales, por lo que se toma 1/3 del costo, así como 1/3 de su consumo de energía eléctrica.

$$P = \$ 24,960.00 \times \frac{1}{3} = \$ 8,320.00$$

$$L = 150.0 \text{ Kg} \times \$ 1.25/\text{kg} \times \frac{1}{3}$$

$$L = \$62.50$$

$$n = 10 \text{ años (SHCP)}$$

$$\begin{aligned} \text{Depreciación bomba} &= \frac{\$ 8,320.00 - 62.50}{10} \\ \text{de agua recuperada} &= 825.75 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Costo de Personal.

No se considera costo de personal debido a que el equipo de compresión de precipitadores se instaló dentro del Departamento de Bombas a Hornos ya existente, sin incremento de salarios.

Costo de Mantenimiento.

Con respecto a esto, se considera como el 2.5% anual del costo inicial del equipo.

$$\begin{aligned}
 \text{Costo total de} &= \text{Costo equipo} + \text{Costo bomba} + \text{1/3 costo} \\
 \text{mantenimiento} &= (\text{compresión} + \text{de agua} + \text{bomba agua}) \cdot 0.025 \\
 & \hspace{15em} \text{recuperada} \\
 &= (\$641,104.00 + 20,000.00 + 1/3 \cdot 24,960.00) \cdot 0.025 \\
 &= (\$ 669,424.00) (0.025) \\
 &= 16,735.60 \frac{\$}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Costos Fijos} &= \text{Depreciación} + \text{Depreciación} + \text{Depreciación} - \\
 \text{aire comprimido} &= \text{compresor} + \text{Bomba de agua} + \text{bomba agua} - \\
 & \hspace{15em} \text{recuperada} \\
 & \hspace{4em} + \text{Costo de} + \text{Costo de} \\
 & \hspace{4em} + \text{Personal} + \text{Mantenimiento} \\
 &= \$ 64,010.40 + 1,987.50 + 825.75 + 0 \\
 & \hspace{4em} + 16,735.60
 \end{aligned}$$

$$\text{Costos Fijos aire comprimido} = 83,558.65 \frac{\$}{\text{año}} = C_F$$

Costos Variables (aire comprimido)

Los costos variables son:

- Energía eléctrica motor del compresor.
- Energía eléctrica motor de bomba de agua del compresor.
- Energía eléctrica motor de bomba de agua recuperada (1/3).

Se midió el consumo de energía eléctrica y es el siguiente:

	Kw
Motor del compresor	100.0
Motor bomba de agua al compresor	3.5
Motor bomba de agua recuperada	<u>10.0</u>
Energía eléctrica total	114.0

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica anual} &= 114.0 \text{ Kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ &= 984,960.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

La Compañía de Luz vende a $0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}}$ la energía eléctrica para uso industrial:

$$\text{Costo anual energía eléctrica} = 984,960.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}}$$

Por tanto:

$$\text{Costos Variables aire comprimido} = 275,788.80 \frac{\$}{\text{año}} = C_V$$

Aire comprimido producido:

$$\text{Aire producido por el compresor} = 11.18 \frac{\text{m}^3 \text{std}}{\text{min}} \text{ (395 SCFM)}$$

$$\text{Presión de trabajo del compresor} = 5.6 \frac{\text{kg}_2}{\text{cm}^2} \text{ (80 psig)}$$

$$\text{Aire comprimido anual} = 11.18 \frac{\text{m}^3 \text{std}}{\text{min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}}$$

$$\text{Aire comprimido anual} = 5,795,712.0 \frac{\text{m}^3 \text{std}}{\text{año}}$$

Costo Total (Costos de Operación) aire comprimido:

$$C_T = C_F + C_V$$

$$C_T = 83,558.65 + 275,788.80 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$\text{Costo de producción aire comprimido} = \frac{\text{Costo Total}}{\text{Aire comprimido anual}}$$

$$= \frac{359,347.45 \frac{\$}{\text{año}}}{5,795,712.0 \frac{\text{m}^3 \text{std}}{\text{año}}}$$

$$\text{Costo de producción aire comprimido} = 0.062 \frac{\$}{\text{m}^3 \text{std}}$$

Costos Variables (Precipitador).

1. Energía eléctrica.

El precipitador electrostático consume energía eléctrica en:

1.1 Campos del precipitador.

1.2 Instrumentación.

1.3 3 resistencias de módulos de control

1.4 2 motores de los gusanillos del precipitador.

1.5 1 motor del elevador general, en proporción para 6 módulos de 26 existentes en este sistema.

1.6 1 motor del gusanillo general, proporción para 6 módulos de 26 existentes.

1.7 Alumbrado de 4 lámparas vapor de mercurio, de 250 watts c/u.

1.8 3 cajas de resistencias de carga.

1.1 Campos del precipitador.

El precipitador está dividido en 3 secciones, A, B y

C, con módulos cada sección y consumen como promedio:

Sección	Volts	Amperes
A	285.0	56.5
B	278.3	62.9
C	271.5	69.3

La potencia eléctrica trifásica se calcula con la fórmula:

$$P = \sqrt{3} V I \cos \alpha$$

donde:

P = Potencia eléctrica, W

V = Voltaje, V

I = Intensidad de corriente, A

$\cos \alpha$ - Factor de potencia (~ 1).

La potencia eléctrica trifásica para las 3 secciones se calcula así:

$$P_A = 1.732 \times 285 \times 56.5 \times 1 \quad (\sqrt{3} = 1.732)$$

$$P_A = 27,890.4 \text{ W}$$

$$P_B = 1.732 \times 278.3 \times 62.9 \times 1$$

$$P_B = 30,318.8 \text{ W}$$

$$P_C = 1.732 \times 271.5 \times 69.3 \times 1$$

$$P_C = 32,587.5 \text{ W}$$

$$P_T = P_A + P_B + P_C$$

$$\begin{aligned} P_T &= 27,890.4 + 30,318.8 + 32,587.5 \\ &= 90,796.5 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} \\ \text{campos precipitador} &= 90.796.5 \text{ W} \times \frac{1 \text{ kw}}{1000 \text{ W}} \\ &= 90.8 \text{ kw} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica anual} \\ \text{campos precipitador} &= 90.8 \text{ kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ &= 784,512.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

La Compañía de Luz vende a $0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}}$ la energía eléctrica para uso industrial, entonces:

$$\begin{aligned} \text{Costo energía eléctrica} \\ \text{anual campos precipitador} &= 784,512.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\ &= 219,663.36 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

1.2 Instrumentación.

Medida con un wattmetro dio en total 1.0 Kw como promedio para los 2 transformadores de suministro.

$$\text{Energía eléctrica anual instrumentación} = 1.0 \text{ Kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}}$$

$$\text{Energía eléctrica anual instrumentación} = 8,640.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo energía eléctrica anual instrumentación} &= 8,640.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\ &= 2,419.20 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

1.3 3 resistencias de los módulos de control.

1 resistencia para cada módulo, de 245 W c/u, se considera que trabajan a plena carga.

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica de resistencias de módulos control} &= 3 \times 245 \text{ W} \times \frac{1 \text{ kw}}{1000 \text{ W}} \\ &= 0.735 \text{ kw} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica anual resistencias módulos control} &= 0.735 \text{ kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ &= 6,350.4 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo energía eléctrica anual resistencias módulos control} &= 6,350.4 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\ &= 1,778.11 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

1.4 2 motores de gusanillos del precipitador.

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} & \\ \text{ca 2 motores} & \text{ - } = 1.4 \text{ kw} \times 2 \\ \text{precipitador} & = 2.8 \text{ kw} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} & \\ \text{ca anual 2 moto} & \text{ - } = 2.8 \text{ kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ \text{res precipitador} & \\ & = 24,192.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo energía} & \\ \text{eléctrica anual} & \text{ - } = 24,192.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\ \text{2 motores pre} & \\ \text{cipitador} & \\ & = 6,773.76 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

1.5 1 motor del elevador general.

Proporción para 6 módulos de 26 existentes en el sistema Vía Húmeda.

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} & \\ \text{ca motor eleva} & \text{ - } = 6.7 \text{ kw} \times \frac{6}{26} \\ \text{dor general} & \\ & = 1.55 \text{ kw} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} & \\ \text{ca anual motor} & \text{ - } = 1.55 \text{ kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ \text{elevador general} & \\ & = 13,392.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Costo energía -} \\
 \text{eléctrica anual} \\
 \text{motor elevador-} \\
 \text{general} &= 13,392.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\
 &= 3,749.76 \frac{\$}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

1.6 1 motor del gusanillo general.

También proporción para precipitador de 6 módulos.

$$\begin{aligned}
 \text{Energía eléctrica} \\
 \text{motor gusanillo} \\
 \text{general} &= 5.2 \text{ kw} \times \frac{6}{26} \\
 &= 1.2 \text{ kw}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Energía eléctrica} \\
 \text{anual motor-} \\
 \text{general} &= 1.2 \text{ kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\
 &= 10,368.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Costo energía -} \\
 \text{eléctrica anual} \\
 \text{motor gusanillo} \\
 \text{general} &= 10,368.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\
 &= 2,903.04 \frac{\$}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

1.7 Alumbrado.

Consiste de 4 lámparas de vapor de mercurio de 250 W
c/u.

$$\begin{aligned}
 \text{Energía eléctrica} \\
 \text{alumbrado} &= 250 \text{ W} \times 4 \times \frac{1 \text{ kw}}{1000 \text{ W}} \\
 &= 1.0 \text{ Kw}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica anual alumbrado} &= 1.0 \text{ kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ &= 8,640.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo energía eléctrica anual alumbrado} &= 8,640.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\ &= 2,419.20 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

1.8 3 cajas de resistencias de carga

Cada caja de 4.5 Kw, se considera que trabajan a plena carga.

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica de resistencias} &= 4.5 \text{ kw} \times 3 \\ &= 13.5 \text{ kw} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica anual cajas de resistencias} &= 13.5 \text{ kw} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ &= 116,640.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo energía eléctrica anual cajas de resistencias} &= 116,640.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\ &= 32,659.20 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

2. Diesel

2.1 Vagonetas.

2.2 Traxcavo.

2.1 Vagonetas.

Se emplean 2 vagonetas para transporte de polvo fuera de la planta, entre las 2 consumen $104.50 \frac{1}{d}$ de diesel.

$$\begin{aligned} \text{Diesel anual} &= 104.50 \frac{1}{d} \times 360 \frac{d}{\text{año}} \\ \text{vagonetas} &= 37,620 \frac{1}{\text{año}} \end{aligned}$$

Para 1 precipitador:

$$\begin{aligned} \text{Diesel anual} &= 37,620.0 \frac{1}{d} \times \frac{6}{26} \\ \text{vagonetas} &= 8,681.54 \frac{1}{\text{año}} \end{aligned}$$

El costo del diesel es $0.50 \frac{\$}{T}$ así:

$$\begin{aligned} \text{Costo anual} &= 8,681.54 \frac{1}{\text{año}} \times 0.50 \frac{\$}{T} \\ \text{diesel vago} &= 4,340.77 \frac{\$}{\text{año}} \\ \text{netas} & \end{aligned}$$

2.2 Traxcavo.

El traxcavo trabaja 1 turno de 8 horas al día en el área de precipitadores y consume $17.0 \frac{1}{d}$ de diesel.

$$\begin{aligned} \text{Diesel anual} &= 17.0 \frac{1}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ \text{traxcavo} &= 6,120.0 \frac{1}{\text{año}} \end{aligned}$$

Para 1 precipitador:

$$\begin{aligned} \text{Diesel anual} &= 6,120.0 \frac{1}{\text{año}} \times \frac{6}{26} \\ \text{traxcavo} &= 1,412.30 \frac{1}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo anual} &= 1,412.30 \frac{1}{\text{año}} \times 0.50 \frac{\$}{1} \\ \text{diesel trax} &= 706.15 \frac{\$}{\text{año}} \\ \text{cavo} & \end{aligned}$$

3. Aire comprimido.

3.1 Golpeadores neumáticos

El aire comprimido solamente lo usan los 18 golpeadores neumáticos, marca WESTERN PRECIPITATION tipo PVSS, que tiene el precipitador.

$$\text{Cada golpeador consume } 0.368 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \text{ de aire a } 20^\circ\text{C y } -$$

4.2 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Tiempo de trabajo de los golpeadores:

El programador los hace trabajar 3 segundos cada 3 - minutos, entonces para cada golpeador:

$$\begin{aligned} \text{Número de veces} &= 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \times 1 \frac{\text{vez}}{3 \text{ min}} \\ \text{por hora} &= 20 \frac{\text{vez}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de traba-} &= 20 \frac{\text{vez}}{\text{h}} \times 3 \frac{\text{seg}}{\text{vez}} \\ \text{jo por hora} &= 60 \frac{\text{seg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de traba} &= 60 \frac{\text{seg}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \\ \text{jo por día} &= 24 \frac{\text{min}}{\text{d}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gasto aire com-} &= 0.368 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \left| \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \\ 4.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3} \end{array} \right. \times 24 \frac{\text{min}}{\text{d}} \\ \text{primido por gol-} & \\ \text{peador al día} & \\ &= 8.83 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \left| \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \\ 4.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3} \end{array} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gasto anual ai-} &= 8.83 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \left| \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \\ 4.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3} \end{array} \right. \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ \text{re comprimido -} & \\ \text{por golpeador} & \\ &= 3,178.8 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \left| \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \\ 4.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3} \end{array} \right. \end{aligned}$$

Para 18 golpeadores:

$$\begin{aligned} \text{Gasto anual aire comprimido 18 golpeadores} &= 3,178.8 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \left| \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \\ 4.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \end{array} \right. \times 18 \\ &= 57,218.4 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \left| \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \\ 4.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \end{array} \right. \end{aligned}$$

El aire comprimido producido por el compresor está - medido a 0°C y 760 mm Hg , por esa razón el aire consumido - se pone a estas condiciones.

Para poner a las condiciones deseadas el aire consumido, se usa la Ecuación General del estado gaseoso:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (760 \text{ mm Hg} = 1.03 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2})$$

donde:

P - Presión, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$ abs

V = Volumen, m^3

T = Temperatura, $^\circ\text{K}$

$$P_1 = 4.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \text{ man.} + 1.03 \quad P_2 = 1.03 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Resumen de Costos Variables.

	kw-h año	\$ año
1. Energía eléctrica		
1.1 Campos del precipitador	784,512.0	219,663.36
1.2 Instrumentación	8,640.0	2,419.20
1.3 3 resistencias módulos-control	6,350.4	1,778.11
1.4 2 motores gusanillo pre- cipitador	24,192.0	6,773.76
1.5 1 motor elevador gene- ral*	13,392.0	3,749.76
1.6 1 motor gusanillo gene- ral*	10,368.0	2,903.04
1.7 Alumbrado	8,640.0	2,419.20
1.8 3 cajas resistencias -- carga	<u>116,640.0</u>	<u>32,659.20</u>
Sub-Total	972,734.4	272,365.63
2. Diesel	<u>l</u> año	
2.1 2 vagonetas*	8,681.54	4,340.77
2.2 1 traxcavo*	<u>6,120.00</u>	<u>706.15</u>
Sub-total	14,801.54	5,046.92
3. Aire comprimido	<u>m³std</u> año	
3.1 18 golpeadores neumáticos	<u>270,704.32</u>	<u>16,783.68</u>
Sub-total	270,704.32	<u>16,783.68</u>
Total = C _v		<u>294,196.23</u>

* Proporción para 1 precipitador

Con lo anterior tengo completos los Costos, tanto --
Fijos como Variables, entonces:

	<u>\$</u> año
Costos Fijos del precipitador	1,483,334.76
Costos Variables del precipitador	<u>294,196.23</u>
Costo Total (Costos de Operación)	1,777,530.99

IV.1.3 DISTRIBUCION DE COSTOS POR GRUPO

Grupo - Costos Fijos

<u>Depreciación</u>	Costo <u>\$</u> año	% por Grupo	% de C _F
Precipitador	932,695.00	95.78	
Obra civil	11,000.00	1.13	
Vagonetas	21,134.62	2.17	
Traxcavo	<u>9,109.23</u>	<u>0.92</u>	
Sub-total	973,848.85	100.00	65.65
<u>Mantenimiento</u>			
Precipitador	282,634.20	96.00	
Vagonetas	9,000.00	3.05	
Traxcavo	<u>2,769.23</u>	<u>0.95</u>	
Sub-total	294,403.43	100.00	19.85

	Costo \$ año	% por Grupo	% de C _F
<u>Personal</u>			
Ingeniería y Supervisión	89,793.10	41.75	
Encargados - de precipita dores	106,453.93	49.50	
Operador de- Traxcavo	<u>18,835.45</u>	<u>8.75</u>	
Sub-total	<u>215,082.48</u>	100.00	<u>14.50</u>
Total = C _F	<u>1,483,334.76</u> =====		<u>100.00</u> =====

Grupo - Costos Variables.

Energía eléctrica

Campos preci pitador	219,663.36	80.65	
Equipo de - control y a- lumbrado	39,275.71	14.42	
Motores	<u>13,426.56</u>	<u>4.93</u>	
Sub-total	272,365.63	100.00	92.58

Diesel

Vagonetas	4,340.77		
Traxcavo	<u>706.15</u>		
Sub-total	5,046.92		1.72

	Costo \$ año	% por Grupo	% de C_F
<u>Aire comprimido</u>			
Golpeadores neu máticos	<u>16,783.68</u>		
Sub-total	<u>16,783.68</u>		<u>5.70</u>
Total = C_V	<u>294,196.23</u> =====		<u>100.00</u> =====

Grupo - Costo Total.

	Costo \$ año	% de C_T
Depreciación	973,848.85	54.80
Mantenimiento	294,403.43	16.56
Personal	215,082.48	12.10
Energía eléctrica	272,365.63	15.32
Diesel	5,046.92	0.28
Aire comprimido	<u>16,783.68</u>	<u>0.94</u>
Total = C_T	1'777,530.99	100.00
Costos Fijos	1'483,334.76	83.45
Costos Variables	<u>294,196.23</u>	<u>16.55</u>
Costo Total = C_T	1'777,530.99	100.00

IV.1.4 CONSUMOS UNITARIOS

Los Consumos Unitarios son las cantidades de energía eléctrica, diesel y aire comprimido que requiere una tonelada de polvo para ser recolectada.

Antes de calcular los Consumos Unitarios, debe conocerse la cantidad de polvo recolectado por el precipitador durante 1 año.

El precipitador estudiado capta en promedio 126.6 - ton de polvo al día, entonces:

$$\begin{aligned} \text{Polvo recolectado} &= 126.6 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ \text{al año} &= 45,576.0 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \end{aligned}$$

- Consumos Unitarios:

$$\begin{aligned} \text{Pesos por tonela-} &= \frac{\text{Costo Total (Costos de Operación)}}{\text{Polvo recolectado al año}} \\ \text{da de polvo} &= \frac{1'777,530.00 \text{ \$/año}}{45,576.0 \text{ ton/año}} \\ &= 39.00 \frac{\$}{\text{ton polvo}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} &= \frac{\text{Energía eléctrica anual total}}{\text{Polvo recolectado al año}} \\ \text{por tonelada de -} &= \frac{972,734.40 \text{ kw-h/año}}{45,576.0 \text{ ton/año}} \\ \text{polvo} &= 21.34 \frac{\text{kw-h}}{\text{ton polvo}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Diesel por tonelada de polvo} &= \frac{\text{Diesel anual consumido}}{\text{Polvo recolectado al año}} \\
 &= \frac{14,801.54 \text{ l/año}}{45,576.0 \text{ ton/año}} \\
 &= 0.32 \frac{\text{l diesel}}{\text{ton polvo}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Aire comprimido - por tonelada de polvo} &= \frac{\text{Aire comprimido anual consumido}}{\text{Polvo recolectado al año}} \\
 &= \frac{270,704.32 \text{ m}^3 \text{ std aire/año}}{45,576.0 \text{ ton/año}} \\
 &= 5.94 \frac{\text{m}^3 \text{ std aire}}{\text{ton polvo}}
 \end{aligned}$$

- Costo de los Consumos Unitarios:

$$39.00 \frac{\$}{\text{ton polvo}}$$

$$21.34 \frac{\text{kw} - \text{h}}{\text{ton polvo}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} = 5.98 \frac{\$ \text{ energía eléctrica}}{\text{tonelada de polvo}}$$

$$0.32 \frac{\text{l diesel}}{\text{ton polvo}} \times 0.50 \frac{\$}{\text{l}} = 0.16 \frac{\$ \text{ diesel}}{\text{tonelada de polvo}}$$

$$5.94 \frac{\text{m}^3 \text{ std aire}}{\text{ton polvo}} \times 0.062 \frac{\$}{\text{m}^3 \text{ std}} = 0.37 \frac{\$ \text{ aire comprimido}}{\text{tonelada de polvo}}$$

En resumen:

Consumos UnitariosCosto de los Consumos Unitarios

$$39.00 \frac{\$}{\text{ton polvo}}$$

$$5.98 \frac{\$ \text{ energía eléctrica}}{\text{tonelada de polvo}}$$

$$21.34 \frac{\text{kw-h}}{\text{ton polvo}}$$

$$0.16 \frac{\$ \text{ diesel}}{\text{tonelada de polvo}}$$

$$5.94 \frac{\text{m}^3 \text{ std aire}}{\text{ton polvo}}$$

$$0.37 \frac{\$ \text{ aire comprimido}}{\text{tonelada de polvo}}$$

IV.2 PROCESO VIA SECA

Se hace la evaluación del costo de captar el polvo y ponerlo en el silo de Almacenamiento.

IV.2.1 COSTOS FIJOS

1. Depreciación

- 1.a) Precipitador electrostático
- 1.b) Obra civil del precipitador
- 1.c) Torre de Acondicionamiento de Gases (Marca LURGI)
- 1.d) Obra civil Torre LURGI.

2. Mantenimiento

- 2.a) Precipitador
- 2.b) Torre LURGI.

* Proporción para dos horas por turno.

3. Personal

3.a) Ingeniería y Supervisión

3.b) Encargado de precipitador y Torre LURGI.

1. Depreciación.

1.a) Precipitador electrostático.

Costo del precipitador electrostático marca WESTERN-
 PRECIPITATION, de 3 módulos en 1 cámara (incluye instala -
 ción y obra civil) \$ 6'894,424.70 -

que consta de lo siguiente:

Carcaza

Sistema de electrodos colectores

Sistema de electrodos de descarga

Placas perforadas

Aisladores eléctricos

3 tableros con resistencias de carga

3 transformadores de A.V. con rectificador de sili -
 cio c/u

3 reactores saturables

1 gusanillo extractor de polvo

1 moto-reductor del gusanillo

Estructura de sostén

Calorífero

Ventilador del calorífero

1 motor del ventilador de calorífero

2 golpeadores electromecánicos (en placas perforadas)

15 golpeadores neumáticos

3 ductos de conexión de gases

3 barras de alto voltaje

1 elevador para polvo

1 moto-reductor del elevador

1 silo para Almacenamiento de polvo

Línea de aire a golpeadores

Líneas eléctricas de:

 Energía al precipitador

 Motores

Aislamiento térmico

Alumbrado

Escaleras, pasillos y otros

Fusibles

Tubería de aire caliente al ducto de alto voltaje

Tablero de control del precipitador

Control del gusanillo

Control del elevador

Analizador de CO

Analizador de O₂

Control de analizadores

Indicador de nivel (tolvas)

Instrumentos de control del precipitador en horno

Detectores de movimiento de gusanillos y elevadores
Líneas de instrumentación

El costo de obra civil del precipitador es \$140,647.79
formada por:

Bases de: precipitador
Elevador de polvo
Silo para polvo
Tolva para polvo (elevador)
Caseta "local" de control

- Cálculos de Depreciación.

Para todos los cálculos de Depreciación, al igual -
que en Vía Húmeda, se emplea aquí la fórmula de la Línea -
Recta:

$$D = \frac{P - L}{n}$$

donde:

D = Depreciación
P = Costo inicial del equipo (sin obra civil)
L = Valor de rescate
n = Tiempo de vida útil (10 años, SHCP)

Para el precipitador, P y L se obtienen de la manera siguiente:

P = Costo inicial del equipo (sin obra civil)

P = Costo del precipitador - Costo obra civil

P = \$ 6,894,424.70 - \$ 140,647.79

= \$ 6,753,776.91

L = Valor de rescate.

Peso del equipo metálico:

Precipitador completo	35,752.7 kg
Elevador de polvo	18,500.0 "
Silo para polvo	<u>2,500.0 "</u>
Total	56,752.7 kg

Se considera este peso como "chatarra", cuyo costo - en el mercado es de \$ 1.25/kg; por tanto:

L = 56,752.7 kg x \$ 1.25/kg

= \$ 70,940.88

Sustituyendo en la fórmula:

$$D = \frac{\$ 6,753,776.91 - \$ 70,940.88}{10}$$

= \$ 668,283.61 $\frac{\$}{\text{año}}$

1.b) Obra civil del precipitador.

$$P = \$ 140,647.79$$

$$L = 0$$

$$n = 20 \text{ años (SHCP)}$$

$$D = \frac{\$ 140,647.79 - 0}{20}$$

$$= 7,032.39 \frac{\$}{\text{año}}$$

1.c) Torre de Acondicionamiento de Gases.

Costo de la Torre de Acondicionamiento de Gases marca LURGI (incluye Instalación y obra civil) \$ 2,478,634.60 que consta de lo siguiente:

Carcaza

Cámara de vaporización

Placas perforadas

1 gusanillo extractor de polvo

1 moto-reductor del gusanillo

1 válvula de descarga del gusanillo

1 moto-reductor de la válvula

7 espreas de vaporización

7 válvulas de las espreas

2 bombas de alta presión para agua

2 ductos de conexión de gases

Aislamiento térmico

Línea de agua a espreas

Equipo de suministro de agua a espreas

Alumbrado

Línea eléctrica

Centro de control cámara de vaporización

Control equipo de suministro de agua

Control gusanillo extractor de polvo

Líneas de instrumentos

El costo de la obra civil de la Torre LURGI es -
\$145,905.66

formada por:

Bases de: Torre LURGI.

Equipo de suministro de agua

Caseta de control

- Cálculos de Depreciación.

P = Costo inicial del equipo (sin obra civil)

P = \$ 2,478,634.60 - 145,905.66

P = \$ 2,332,728.94

L = Valor de rescate

Peso del equipo metálico:

Carcaza 69,818.7 kg

Moto-reductores, gusanillo
válvula y otros 510.0 kg

Cabeza, ductos y partes in
ternas 8,550.0 kg

Equipo suministro de agua	<u>880.0</u> kg
Peso Total	79,758.7 kg (aprox.)

Se considera este peso como "chatarra", cuyo valor - en el mercado es \$ 1.25/kg, por tanto:

$$\begin{aligned} L &= 79,758.7 \text{ kg} \times \$ 1.25/\text{kg} \\ &= \$ 99,698.40 \end{aligned}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$\begin{aligned} D &= \frac{\$2,332,728.94 - 99,698.40}{10} \\ &= 223,303.06 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

1.d) Depreciación obra civil Torre LURGI.

$$\begin{aligned} P &= \$ 145,905.66 \\ L &= 0 \\ n &= 20 \text{ años (SHCP)} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$\begin{aligned} D &= \frac{\$ 145,905.66 - 0}{20} \\ &= 7,295.30 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Resumen para Depreciación:

	$\frac{\$}{\text{año}}$
Depreciación del precipitador	668,283.61
Depreciación obra civil del precipitador	7,032.39
Depreciación Torre LURGI	223,303.06
Depreciación obra civil Torre LURGI	<u>7,295.30</u>
Depreciación total	905,914.36

2. Mantenimiento

2.a) Precipitador electrostático.

Se hace la misma consideración que para el precipitador del sistema Vía Húmeda, que el costo anual de mantenimiento es 3% anual del costo inicial (sin obra civil).

$$\begin{aligned}
 \text{Mantenimiento del precipitador} &= 6,753,776.91 \times 0.03 \\
 &= 202,613.30 \frac{\$}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

2.b) Torre LURGI

Su mantenimiento es menor que el del precipitador, -

por resultados prácticos se aproxima al 1.5% anual del cos
to inicial (sin obra civil).

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento Torre LURGI} &= 2,332,728.94 \times 0.015 \\ &= 34,990.93 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Resúmen de Mantenimiento: $\frac{\$}{\text{año}}$

Mantenimiento precipitador	202,613.30
Mantenimiento Torre LURGI	<u>34,990.93</u>
Mantenimiento total	237,604.23

3. Personal

3.a) Ingeniería y Supervisión.

Ya se calculó el gasto total por Ingeniería y Supervisión en el proceso Vía Húmeda. Aquí solamente se hace - proporción para 3 módulos, de 29 que componen ambos Sistemas de Recolección (Vía Húmeda y Vía Seca), debido a que - Ingeniería y Supervisión son para los dos sistemas.

$$\begin{aligned} \text{Gasto anual por} & \\ \text{Ingeniería y -} &= 434,000.00 \frac{\$}{\text{año}} \times \frac{3}{29} \\ \text{Supervisión} & \\ &= 44,896.55 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

3.b) Encargado de Precipitador y Torre LURGI.

La vigilancia de este sistema la realiza el Encargado del pre-calentador del horno Vía Seca, con cuota base - de $21.11 \frac{\$}{h}$, dedicando 2 horas por turno al precipitador y Torre LURGI.

Vacaciones, "porcentaje", utilidades y aguinaldo se consideran iguales para los 3 turnos.

Percepción anual Encargado

Pre-calentador horno Vía Seca:

	Turno		$\frac{\$}{\text{año}}$
	6:00 - 14:00 h		
Salario normal	$21.11 \frac{\$}{h} \times 2 \frac{h}{d} \times 360 \frac{d}{\text{año}}$		15,199.20
Vacaciones	$21.11 " \times 2 " \times 20 "$		844.40
"Porcentaje"	$588.53 \frac{\$}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} \times \frac{1}{4}$		1,765.59
Utilidades ($\frac{1}{4}$)*			692.36
Aguinaldo ($\frac{1}{4}$)*			<u>1,154.30</u>
Sub-total			19,655.85

* Proporción para dos horas por turno.

Turno	\$
14:00 - 22:00 h	año
Salario normal + $\frac{1}{2}$ h extra por turno de 8 horas	16,149.15
Vacaciones	8,844.40
"Porcentaje" ($\frac{1}{4}$)*	1,765.59
Utilidades ($\frac{1}{4}$)*	692.36
Aguinaldo	<u>1,154.30</u>
Sub-total	20,605.80

Turno	
22:00 - 6:00 h	
Salario normal + 1 h extra por turno de 8 horas	17,099.10
Vacaciones	844.50
"Porcentaje" ($\frac{1}{4}$)*	1,765.59
Utilidades ($\frac{1}{4}$)*	692.36
Aguinaldo ($\frac{1}{4}$)*	<u>1,154.30</u>
Sub-total	21,555.85

* Proporción para dos horas por turno.

Percepción anual Encargado precalentador horno - Vía Seca = Percepción anual Encargado Precipitador y Torre LURGI.

	$\frac{\$}{\text{año}}$	Turno
Percepción anual-Encargado de precipitador y Torre LURGI	= 19,655.85	6:00 - 14:00 h
	20,605.80	14:00 - 22:00 "
	<u>21,555.85</u>	22:00 - 6:00 "
=	<u>61,817.50</u> $\frac{\$}{\text{año}}$	

Resumen para Personal: $\frac{\$}{\text{año}}$

Ingeniería y Supervisión	44,896.55
Encargado precipitador y Torre LURGI	<u>61,817.50</u>
Personal total	106,714.05

Resumen para Costos Fijos: $\frac{\$}{\text{año}}$

Depreciación	905,914.36
Mantenimiento	237,604.23
Personal	<u>106,714.05</u>
Total = Costos Fijos = C_F	1'250,232.64

IV.2.2 COSTOS VARIABLES

Los Costos Variables para un precipitador electrostático

tico marca WESTERN PRECIPITATION de 3 módulos en 1 cámara, con Torre de Acondicionamiento de Gases marca LURGI son:

1. Energía eléctrica
2. Agua tratada
3. Aire comprimido

La energía eléctrica se midió con un wattmetro directamente, el gasto de agua tratada se obtuvo del medidor de la torre y el aire comprimido se cuantificó por el consumo de cada golpeador (dato de placa).

1. Energía eléctrica.

El precipitador electrostático y la Torre LURGI consumen energía eléctrica en:

- Precipitador -

- 1.1 Campos del precipitador
- 1.2 Instrumentación
- 1.3 3 resistencias de los módulos de control
- 1.4 1 motor del gusanillo del precipitador
- 1.5 1 motor del elevador
- 1.6 1 motor de ventilador del calorífero
- 1.7 Calorífero

1.8 Alumbrado del precipitador y silo para polvo

1.9 3 cajas de resistencias de carga

- Torre LURGI -

1.10 2 motor bomba agua tratada alta presión

1.11 1 motor del gusanillo de polvo

1.12 1 motor válvula de descarga de gusanillo

1.13 Instrumentación

1.14 Alumbrado

La forma de calcular el consumo de energía eléctrica para este precipitador y la Torre LURGI es la misma que para el proceso Vía Húmeda. Por eso, sólo se presenta el resumen correspondiente en Costos Variables. (Pág. 159).

2. Agua tratada.

2.1 7 espreas Torre LURGI

$$\text{Gasto agua} = 5.7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

espreas

$$\text{Gasto anual} = 5.7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}}$$

agua espreas=

Nota: Esta agua consumida no siempre es agua tratada (producida en la planta), ya que en ocasiones se emplea agua potable o una mezcla de las dos. Como el costo del agua tratada es $2.00 \frac{\$}{\text{m}^3}$, se considera que el

agua usada cuesta $1.00 \frac{\$}{\text{año}}$ por las razones anteriores. Entonces:

$$\begin{aligned} \text{Costo anual} &= 49,248.0 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \times 1.00 \frac{\$}{\text{m}^3} \\ \text{agua espreas} &= 49,248.0 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

3. Aire comprimido.

Se calcula el consumo en igual forma que para Vfa --
Húmeda. Vea por favor resúmen en Costos Variables. (Pág.159).

Resumen de Costos Variables.

Energía eléctrica	<u>kw-h</u> <u>año</u>	<u>\$</u> <u>año</u>
- Precipitador -		
1.1 Campos del precipitador	784,512.0	219,663.36
1.2 Instrumentación	8,640.0	2,419.20
1.3 3 resistencias módulos - control	6,350.4	1,778.11
1.4 1 motor gusanillo precipitador	46,656.0	13,063.68
1.5 1 motor del elevador	30,240.0	8,467.20
1.6 1 motor ventilador calorífero	281,664.0	78,865.92
1.7 Calorífero	184,896.0	51,770.88
1.8 Alumbrado precip. y silo	12,096.0	3,386.88
1.9 3 cajas resistencias - carga	116,640.0	32,659.20
- Torre LURGI -		
1.10 1 motor bomba agua tratada	198,720.0	55,641.60
1.11 1 motor gusanillo polvo	41,472.0	11,612.16
1.12 1 motor válvula descarga	14,688.0	4,112.64
1.13 Instrumentación	8,640.0	2,419.20
1.14 Alumbrado	<u>8,640.0</u>	<u>2,419.20</u>
Sub-total	1,149,163.20	321,765.70

2.	Agua tratada			
	2.1 7 espreas Torre LURGI	<u>49,248.0</u>	$\frac{m^3 \text{ agua}}{\text{año}}$	<u>49,248.00</u>
	Sub-total	49,248.0	"	49,248.00
3.	Aire comprimido			
	3.1 15 golpeadores neumá- ticos	<u>225,586.93</u>	$\frac{m^3 \text{ std a}}{\text{año}}$	<u>13,986.39</u>
	Sub-total	<u>225,586.93</u>	" "	<u>13,986,39</u>
	Total = C _v			<u>385,000.09</u> =====

Con lo anterior tengo completos los Costos, tanto Fijos como Variables. Entonces:

Costos Fijos del Precipitador y Torre LURGI	$\frac{\$}{\text{año}}$ 1,250,232.64
Costos Variables del Precipitador y Torre LURGI	<u>385,000.09</u>
Costo Total (Costos de Operación)	1'635,232.73

IV.2.3 DISTRIBUCION DE COSTOS POR GRUPO

Grupo - Costos Fijos

	Costo \$ año	% por Grupo	% de C _F
<u>Depreciación</u>			
Precipitador	668,283.61	73.77	
Obra civil precip.	7,032.39	0.78	
Torre LURGI	223,303.06	24.65	
Obra civil T.LURGI	<u>7,295.30</u>	<u>0.80</u>	
Sub-total	905,914.36	100.00	72.46
<u>Mantenimiento</u>			
Precipitador	202,613.30	85.27	
Torre LURGI	<u>34,990.93</u>	<u>14.73</u>	
Sub-total	237,604.23	100.00	19.00
<u>Personal</u>			
Ingeniería y Supervisión	44,896.55	42.07	
Encargado Precipitador y Torre LURGI	<u>61,817.50</u>	<u>57.93</u>	
Sub-total	<u>106,714.05</u>	100.00	<u>8.54</u>
Total = C _F	<u>1,250,232.64</u> =====		

Grupo - Costos Variables

	Costo \$ año	% por Grupo	% de C _v
<u>Energía eléctrica</u>			
- Precipitador -			
Precipitador	53,149.83	21.64	
Equipo de control y alumbrado	40,243.39	16.39	
Motores y calorí- fero	<u>152,167.68</u>	<u>61.97</u>	
Sub-total	245,560.90	100.00	63.80
- Torre LURGI -			
Bomba de agua y - motores	71,366.40	93.65	
Instrumentación y alumbrado	<u>4,838.40</u>	<u>6.35</u>	
Sub-total	76,204.80	100.00	19.80
<u>Agua tratada</u>			
Espreas Torre LURGI	<u>49,248.00</u>		
Sub-total	49,248.00		12.80
<u>Aire comprimido</u>			
Golpeadores neumáti- cos	<u>13,986.39</u>		
Sub-total	<u>13,986.39</u>		<u>3.60</u>
Total=C _v	385,000.09		100.00
	=====		=====

Grupo - Costo Total

	Costo \$ año	% de C_T
Depreciación	905,914.36	55.40
Mantenimiento	237,604.23	14.53
Personal	106,714.05	6.53
Agua tratada	49,248.00	3.01
Energía eléctrica	321,765.70	19.67
Aire comprimido	<u>13,986.39</u>	<u>0.86</u>
Total = C_T	1'635,232.50	100.00
Costos Fijos	1'250,232.64	76.50
Costos Variables	<u>385,000.09</u>	<u>23.50</u>
Costo Total = C_T	1'635,232.73	100.00

IV.2.4 CONSUMOS UNITARIOS

Los Consumos Unitarios son las cantidades de energía eléctrica, agua tratada y aire comprimido que requiere una tonelada de polvo para ser recolectada.

Antes de calcular los Consumos Unitarios, debe conocerse la cantidad de polvo recolectado por el precipitador durante 1 año.

El precipitador estudiado capta en promedio 50.0 tons de polvo al día, entonces:

$$\begin{aligned} \text{Polvo recolectado} &= 50 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ \text{al año} &= 18,000.0 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \end{aligned}$$

- Consumos Unitarios

La mecánica de cálculo es igual que en Vfa Húmeda, - por esa razón solo se presenta el resumen de ellos (Pág.165).

En resúmen:

<u>Consumos Unitarios</u>	<u>Costo de los Consumos Uni-</u> <u>rios.</u>
90.85 $\frac{\$}{\text{ton polvo}}$	
63.84 $\frac{\$}{\text{ton polvo}}$	17.88 $\frac{\$ \text{ energía eléctrica}}{\text{tonelada de polvo}}$
2.74 $\frac{\text{m}^3 \text{ agua tratada}^*}{\text{ton polvo}}$	2.74 $\frac{\$ \text{ agua tratada}}{\text{tonelada de polvo}}$
12.53 $\frac{\text{m}^3 \text{ std aire}}{\text{ton polvo}}$	0.78 $\frac{\$ \text{ aire comprimido}}{\text{tonelada de polvo}}$

* Nota aclaratoria en Costos Variables, agua tratada.

IV.3 APROVECHAMIENTO DEL POLVO

IV.3.1 PROCESO VIA HUMEDA

Sistema de Insuflado. Para evitar la acumulación del material recolectado y darle uso, está en experimentación en un horno de la planta, un sistema de aprovechamiento de polvo al que se le da el nombre de Insuflado (Figura IV.1).

El insuflado consiste en inyectar el polvo, por medio de una bomba neumática, en la parte final del horno rotatorio (carátula).

Se hace el Insuflado para que el material, que está= semi-procesado, termine de reaccionar y salga mezclado con el clinker producido por el horno. Debido a que el polvo-inyectado puede alterar la composición del clinker, la can tidad introducida debe ser tal, que permita obtener el pro ducto del horno dentro de especificaciones.

- Costos de Operación del equipo de Insuflado.

Es finalidad de este trabajo conocer cuanto se gasta en este equipo, para saber si es conveniente (económicamente) su instalación en cada uno de los hornos en la planta.

Costo del equipo de Insuflado.	\$
1. Bomba Fuller con motor 15 H P	58,180.00
2. Compresor Fuller con motor 30 H P	57,204.00
3. Válvula rotatoria con motor 1 H P	28,776.00
4. Tubería para polvo: 160 m, 4" diám. Ced. 40	21,275.00
5. Tubería aire comprimido: 52 m, 3" diám. Ced. 40	5,185.80
6. Equipo de control	6,717.90
7. Instalación	29,189.00
8. Bases	9,729.70
Total	<hr/> 216,257.40

- Costos Fijos:

A. Depreciación.

$$P = \$ 216,257.40$$

$$L = (4,800.0 \text{ Kg} \times \$ 1.25/\text{Kg})$$

$$L = \$ 6,000.00$$

$$n = 10 \text{ años (SHCP)}$$

$$D = \frac{\$ 216,257.40 - 6,000.00}{10}$$

$$D = 21,025.74 \frac{\$}{\text{año}}$$

B. Personal

1 encargado por turno (3 turnos al día)		$\frac{\$}{\text{año}}$
Salario 18.00	$\frac{\$}{h} \times 8 \frac{h}{d} \times 360 \frac{d}{\text{año}} \times 3$	155,520.00
Vacaciones 18.00	$\frac{\$}{h} \times 8 \frac{h}{d} \times 20 \frac{d}{\text{año}} \times 3$	8,640.00
"porcentaje" 300.00	$\frac{\$}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} \times 3$	10,800.00
Utilidades (3)		6,000.00
Aguinaldo (3)		9,000.00
Percepción total anual		<u>189,960.00</u>

C. Mantenimiento

3% anual del costo inicial del equipo, sin obra civil.

$$\begin{aligned} \text{Costo inicial del equipo} \\ \text{sin obra civil} &= \$ 216,257.40 - 9,729.70 \\ &= \$ 206,527.70 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de} \\ \text{mantenimiento} &= \$ 206,527.70 \times 0.03 \\ &= 6,195.80 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

- Costos Variables:

D. Energía eléctrica	kw
Motor bomba Fuller	4.5
Motor compresor Fuller	17.0
Motor válvula rotatoria	<u>1.7</u>
Total	23.2

Este equipo trabaja 20 horas al día.

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} \\ \text{anual} &= 23.2 \text{ kw} \times 20 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ &= 167,040.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \end{aligned}$$

La Compañía de Luz vende a $0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}}$ la energía --
eléctrica para uso industrial.

$$\begin{aligned} \text{Costo energía} \\ \text{eléctrica anual} &= 167,040.0 \frac{\text{kw-h}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}} \\ &= 46,771.20 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

Resumen de Costos de Operación: $\frac{\$}{\text{año}}$

A. Depreciación	21,025.74
B. Personal	189,960.00
C. Mantenimiento	6,195.80
D. Energía eléctrica	46,771.20
Costo de Operación = C_T	263,952.74

- Costos de Operación del precipitador con el em --
pleo del Sistema de Aprovechamiento de polvo.

Debido a que en el Insuflado el polvo se bombea des-
de los Silos de Almacenamiento, el trabajo de vagonetas y-

traxcavo se eliminan y el gasto por personal Encargado de precipitadores se reduce aproximadamente en 50%.

De esta manera, los Costos de Operación del precipitador quedan así:

- Costos Fijos:	<u>\$</u> <u>año</u>
Depreciación.	
Precipitador	932,695.00
Obra civil	11,000.00
Mantenimiento	
Precipitador	282,634.20
Personal	
Ingeniería y Supervisión	89,793.10
Encargados de Precipitadores	<u>53,226.97</u>
C _F	1,369,349.27

- Costos Variables:	$\frac{\$}{\text{año}}$
Energía eléctrica	272,365.63
Aire comprimido	16,783.68
	<hr/>
C_V	289,149.31

Costo Total (Costos de Operación) = C_T 1,658,498.58

- Polvo aprovechado con el Sistema de Insuflado.

En la práctica, insuflar 4.0 ton/h de polvo no altera el funcionamiento y producto del horno.

$$\begin{aligned} \text{Polvo aprovechado con} \\ \text{Insuflado al año} &= 4.0 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \times 20 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\ &= 28,800.0 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \end{aligned}$$

- Costo de Reproceso.

El Costo de Reproceso está formado por los Costos de Operación del precipitador y del equipo de Insuflado.

$$\text{Costo de Reproceso} = \text{Costos de Operación del precipitador} + \text{Costos de Operación equipo de Insuflado}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de Reproceso} &= 1,658,498.58 \frac{\$}{\text{año}} + 263,952.74 \frac{\$}{\text{año}} \\ &= 1,922,451.32 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

- Costo Unitario de Reproceso.

Se define el Costo Unitario de Reproceso como:

$$\text{Costo Unitario de Reproceso} = \frac{\text{Costo de Reproceso}}{\text{Polvo aprovechado con Insuflado.}}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo Unitario de Reproceso} &= \frac{1,922,451.32 \text{ \$/año}}{28,800.0 \text{ ton/año}} \\ &= 66.75 \frac{\$}{\text{ton polvo}} \end{aligned}$$

- Utilidad por tonelada de polvo.

Si el polvo aprovechado se considera "crudo" para Cemento tipo V a $65.00 \frac{\$}{\text{ton}}$, la utilidad por tonelada de polvo es:

$$\begin{array}{l} \text{Utilidad por} \\ \text{tonelada de} \\ \text{polvo} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Costo por tonelada} \\ \text{del material como "crudo"} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Costo} \\ \text{Unitario de} \\ \text{Reproceso} \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Utilidad por} \\
 \text{tonelada de} \\
 \text{polvo} &= 65.00 \frac{\$}{\text{ton}} - 66.75 \frac{\$}{\text{ton}} \\
 &= - 1.75 \frac{\$}{\text{ton}}
 \end{aligned}$$

IV.3.2 PROCESO VIA SECA.

- Sistema de Reproceso.

El Sistema de Reproceso consiste en un equipo de bombeo de polvo, semejante al de Insuflado, que transporta el material desde el Silo de Almacenamiento hasta el Silo de Homogeneización de "crudo". Esto se hace porque el material recolectado es "crudo" y puede usarse nuevamente como material para calcinación.

- Costos de Operación del Equipo de Reproceso.

El equipo de Reproceso empleado aquí es casi igual al de Insuflado, excepto en las cantidades de tubo para polvo y aire comprimido. Por esta razón, se emplean los Costos de Operación del equipo de Insuflado, con ligeros ajustes, para el equipo de Reproceso.

- Costos Fijos:	$\frac{\$}{\text{año}}$
A. Depreciación	21,025.74
B. Personal. El personal que vigila el bombeo de polvo es el Encargado del precalentador horno Vía Se <u>ca</u> , por lo que no se considera <u>es</u> te gasto.	
C. Mantenimiento	6,195.80
Total = C_F	<hr/> 27,221.54

- Costos Variables:

D. Energía eléctrica 23.2 Kw

La cantidad recolectada por día son 50.0 ton de polvo, por eso, la bomba puede trabajar solamente 10 horas al día bombeando 5.0 ton de polvo por hora.

$$\text{Costo energía eléctrica anual} = 23.2 \text{ kw} \times 10 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \times 0.28 \frac{\$}{\text{kw-h}}$$

$$\text{Costo energía eléctrica anual} = 23,285.60 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$C_V = \text{Costo energía eléctrica anual.}$$

$$C_V = 23,285.60 \frac{\$}{\text{año}}$$

Resumen de Costos de Operación

	\$ año
A. Depreciación	21,025.74
B. Personal	
C. Mantenimiento	6,195.80
D. Energía eléctrica	23,385.60
	<hr/>
Costos de Operación = C_T	50,607.14

- Polvo para Reproceso.

La cantidad de polvo recolectada por el precipitador es 50.0 ton por día, el cual es totalmente bombeado hacia el Silo de Homogeneización de "crudo", por medio del equipo de Reproceso.

$$\begin{aligned}
 \text{Polvo para} \\
 \text{Reproceso al año} &= 50.0 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \times 360 \frac{\text{d}}{\text{año}} \\
 &= 18,000.0 \frac{\text{ton}}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

- Costo de Reproceso.

Al igual que en Vía Húmeda, el Costo de Reproceso es:

Costo de Reproceso = Costos de operación precipitador - torre LURGI + Costos de Operación - equipo de Reproceso.

$$\begin{aligned} \text{Costo de Reproceso} &= 1.635,232.73 \frac{\$}{\text{año}} + 50,607.14 \frac{\$}{\text{año}} \\ &= 1,685,839.87 \frac{\$}{\text{año}} \end{aligned}$$

- Costo Unitario de Reproceso.

$$\text{Costo Unitario de Reproceso} = \frac{\text{Costo de Reproceso}}{\text{Polvo para Reproceso al año}}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo Unitario de Reproceso} &= \frac{1,685,839.87 \text{ \$/año}}{18,000.0 \text{ ton/año}} \\ &= 93.70 \frac{\$}{\text{ton polvo}} \end{aligned}$$

- Utilidad por tonelada de polvo.

El polvo recolectado en este sistema es "crudo" para Cemento Blanco, con un costo de 95.00 $\frac{\$}{\text{ton}}$; la utilidad -- por tonelada de polvo es:

Utilidad por tonelada de polvo = Costo por tonelada del material como "crudo" - Costo Unitario de Reproceso

Utilidad por tonelada de polvo = $95.00 \frac{\$}{\text{ton}}$ - $93.70 \frac{\$}{\text{ton}}$

= $1.30 \frac{\$}{\text{ton}}$

C A P I T U L O V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

De todos conocido, el Cemento Portland es un material indispensable actualmente. Existen dos formas principales de fabricarlo:

Por Vía Húmeda, en donde un lodo (pasta de "crudo")- formado con caliza y arcilla (dosificadas) se transforma en "CLINKER" al pasar por un horno rotatorio;- ese "CLINKER" molido y mezclado con yeso en la cantidad necesaria produce el CEMENTO.

Por Vía Seca, en donde un polvo de caliza y arcilla, (dosificadas) pasa por un precalentador de suspensión y después al horno rotatorio de donde sale el "CLINKER", que mezclado con yeso forma el CEMENTO.

En ambos sistemas de fabricación los hornos rotatorios desprenden polvo que puede perjudicar el MEDIO-AMBIENTE. Para evitar eso se emplean varios equipos entre ellos los más comunes son los PRECIPITADORES -- ELECTROSTATICOS.

Los PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS son en su forma - más simple, un fuerte campo eléctrico de polaridad - fija, formado por dos electrodos colectores y uno de descarga (alambre) en donde al pasar partículas de - algún material suspendidas en una corriente de aire- (o algún otro fluido no-conductor eléctrico) se car- gan eléctricamente y se adhieren a los electrodos colectores en virtud de la Ley de Cargas Eléctricas. - El material así captado se saca y se le da el uso de seado.

En Vía Húmeda la empresa gasta \$ 39.00 por tonelada- de polvo colectada y almacenada en sitios especiales.

En Vía Seca son \$ 90.85 por cada tonelada de polvo - captada.

Con el empleo de REPROCESO se gastan \$ 1.75 por tonelada de polvo en Vía Húmeda y se GANA \$ 1.30 por tonelada en Vía seca.

RECOMENDACIONES

Por las conclusiones anteriores se recomienda:

- El empleo de PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS
Para la limpieza de gases en los hornos rotatorios.
- El REPROCESO del polvo colectado.
- La fabricación de cemento por VIA SECA.

C A P I T U L O VI

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. Keil, Fritz, CEMENTO, Pág. 109, Editores Técnicos -- Asociados, S.A., Barcelona, 1968.
2. Western Precipitation Division, MANUAL DE ENTRENAMIENTO TECNICO, Secciones 1, 2 y 3, Joy Manufacturing Co., Los Angeles, 1967.
3. Zimmermann, L, VEB Entstaubungstechnik "Edgar Andre" Magdeburgo, traducción de The Czechoslovak Technical Journal "Ochrana Obzduši" (Atmospheric Protection), - 4, 55-59 (1972).
4. Labahn, Otto y Kaminsky, W.A., PRONTUARIO DEL CEMENTO, 4a. Edición, pags. 27, 67, 102, 144, 149, 217, - 255, 311, Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona, 1970.
5. Ross, R.D., editor, AIR POLLUTION AND INDUSTRY, pags 397-413, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1972.
6. Perry, J. H., editor, CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK - 4a. edición, sección 22, pags. 62-96, McGraw-Hill -- Book Co., New York, 1963.
7. Aries, R.S. y Newton R.D., CHEMICAL ENGINEERING COST ESTIMATION, pags. 118-182, McGraw-Hill Book Co., -- New York, 1955.

8. Grant E.L., Iresen, W.G., Leavenworth, R.S., PRINCIPLES OF ENGINEERING ECONOMY, 6a. Edición, pags. 156-163, Ronald Press Co., New York, 1976.