



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**SISTEMAS DE TRANSPORTACION
NEUMATICA.**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

GERARDO AHEDO SANTOYO



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

INDICE GENERAL

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 Generalidades	2
1.2 Breve Historia de la transportación neumática	3
1.3 Objetivos	6

CAPITULO II

DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS NEUMATICOS PARA EL TRANSPORTE DE MATERIALES SOLIDOS A GRANEL

2.1 Funcionamiento	9
2.1.1 Sistemas a presión positiva	10
2.1.2 Sistemas a presión negativa	14
2.1.3 Sistemas combinados	19
2.1.4 Sistemas de aire mezclado	21
2.1.5 Sistemas tanque presurizado	25
2.1.6 Sistemas de aire activado	33
2.2 Componentes del sistema	39
2.2.1 Alimentadores rotatorios	39
2.2.2 Impulsores de aire	47
2.2.3 Colectores de sólidos	54
2.2.4 Almacenadores	63
2.2.5 Tubería de transporte	66
2.2.6 Válvulas divergentes	69

2.3 Ventajas y desventajas	75
2.4 Aplicaciones y utilización en México	78

CAPITULO III

FLUIDIZACION

3.1 Introducción	96
3.2 Sistemas fase diluída	98
3.2.1 Características de flujo en transporte horizontal	100
3.2.2 Propiedades de flujo de sólidos	104
3.3 Sistemas fase densa	120
3.4 Características de flujo en transporte vertical	127
3.5 Potencia necesaria para la mezcla sólido-gas	135
3.6 Lechos fluidizados	138

CAPITULO IV

SELECCION DEL EQUIPO NECESARIO

4.1 Selección del sistema	151
4.2 Selección de impulsores de aire	164
4.3 Selección de alimentadores rotatorios	179
4.4 Selección de colectores de polvos	188
4.4.1 Colectores de bolsas	188
4.4.2 Ciclones	200
4.5 Cálculo de tubería	221

CAPITULO V

SISTEMAS DE CONTROL

5.1	Introducción	223
5.1.1	Tipos de sistemas de control	224
5.1.2	Funciones típicas de control	227
5.1.3	Componentes del sistema de control	230
5.2	Aplicaciones de control	235
5.2.1	Dispositivos de control	239
5.3	Tableros de control	245
5.4	Controles eléctricos	250

CAPITULO VI

CALCULO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMATICO

6.1	Procedimiento de diseño	255
-----	-------------------------	-----

	CONCLUSIONES	276
--	--------------	-----

	FUENTES DE INFORMACION	278
--	------------------------	-----

C A P I T U L O I.

INTRODUCCION.

1.1 Generalidades

1.2 Breve historia de la
transportacion neumática.

1.3 Objetivos.

1.1 Generalidades.

La transportación neumática consiste, en general, en el transporte de partículas de material sólido por medio de una corriente de gas a través de tuberías, mediante el empleo de presión, del vacío o de ambos combinados.

La fluidización de sólidos por medio de una corriente de gas llevada hasta el extremo de que el gas, arrastre a esos sólidos fluidizándolos, es en sí la transportación neumática. Esta forma de acarrear sólidos tiene muchas ventajas, en comparación con otros métodos tradicionales de transporte como : transporte por bandas, tornillo sin fin, cangilones, transportadores vibratorios, etc.

Aún cuando los principios científicos del transporte neumático son bien conocidos, su aplicación se realiza mediante fórmulas de diseño que puedan emplearse en forma general; esto se debe principalmente a que resulta difícil determinar las características del material en las condiciones del transporte específico empleado, además la diversidad de materiales a transportar ha influido para que la tendencia, de determinar sólo sistemas particulares

de transporte sea cada vez mayor. En la actualidad las empresas dedicadas a esta operación, se basan en las experiencias anteriores que muchas veces llegan a ser confidenciales, algunos efectúan previamente pruebas en una planta piloto, pero esto ocurre solo cuando el costo del proyecto a realizar lo permite, ya sea por magnitud o por cuidado del material, el cual requiere de un margen estrecho de seguridad.

Muchas veces se utiliza este proceso donde se requiera que los sólidos fluidizados tengan un proceso de intercambio de calor, en los procesos altamente exotérmicos o endotérmicos o también como vehículo para la transferencia de masa sólido-gas.

Las anteriores aplicaciones se encuentran generalmente en procesos químicos.

1.2 Breve historia de la transportación neumática

En 1816 la compañía B.F. Sturtevant, experimentó el uso de ventiladores para activar sistemas de tuberías que

transportaban materiales no abrasivos como: algodón, aserrín, desperdicios de papel y virutas de madera. Estos experimentos, sin embargo, no lograron arrojar datos que facilitaran el empleo, diseño o cálculo de sistemas neumáticos, o cuando menos dichos datos no fueron divulgados.

Posteriormente, los fabricantes de maquinaria agrícola introdujeron el uso de transportación neumática para la descarga de granos, lo cual en aquella época constituyó una innovación. Lo anterior fue el resultado de innumerables pruebas que se hicieron, sin lograr constituir una técnica especializada que facilitara otros empleos.

En 1924 H. Gasterstadt publicó las leyes teóricas que describen las caídas de presión asociadas con flujos de aire y mezcla aire-sólidos a través de líneas de transporte. Trabajó principalmente con sólidos granulares como el trigo. Sus ecuaciones empíricas son sustancialmente correctas cuando se aplican a materiales de estas características.

A partir de 1924 la literatura y datos sobre la materia se han incrementado rápidamente al descubrirse las técnicas de fluidización de sólidos, las que permitieron, junto con el aire a alta presión, la creación de la bomba para sólidos, y el tanque soplador. Este desarrollo hizo posible el transporte a gran distancia con tubería de diámetro relativamente pequeño.

En 1944 Wilbur G. Gudson publicó un procedimiento matemático para determinar la velocidad del aire y los requisitos de potencia para sistemas de baja presión y vacío manejando granos y materiales similares.

Pero a pesar de tantos años de investigación, la teoría escrita sobre transporte de sólidos, es aplicable solamente a algunos materiales de características conocidas, en sistemas de transporte específicos.

Este tipo de transporte puede ser aplicable, en la industria agrícola, mecánica, carga y descarga en trenes y barcos, y en la industria química donde su aplicación es más extensa.

OBJETIVOS

6

Los objetivos principales que se pretenden con la presentación de esta t esis son el efectuar una recopilación de información, obtenida principalmente de empresas dedicadas a este ramo, y de investigaciones independientes realizadas a la fecha, para dar a conocer el funcionamiento de un sistema de transporte neumático, así como los equipos que intervienen en el mismo.

Lo anterior con la idea de que se tenga un mejor conocimiento de la utilidad de dicho sistema, y de esta manera puedan substituirse en algunos casos los sistemas tradicionales de transporte de materiales a granel en México.

Un segundo objetivo es el enunciar basándose en investigaciones realizadas últimamente, algunos de los fenómenos físicos que se presentan en una tubería por la cual fluye un flujo mixto aire-material.

Para esto se establecen un grupo de ecuaciones obtenidas empíricamente y que nos dan una mejor idea del comportamiento de la mezcla.

El objetivo que se pretende es dar las bases necesarias para que se realizen investigaciones futuras en México en el campo de fluidización, aspecto de suma importancia

no solo en el transporte neumático, sino en gran número de aplicaciones en ingeniería como son: combustión, transferencia de calor, transferencia de masa, etc.

Otro objetivo es establecer después de un análisis cómo afectan las características físicas del material en la correcta selección de los diferentes equipos.

De la misma manera se desea enunciar un sistema de cálculo preliminar para diseñar un sistema de transporte, y seleccionar tanto el sistema como los equipos adecuados para las condiciones específicas.

C A P I T U L O I I

DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS NEUMATICOS PARA EL TRANSPORTE DE MATERIALES SOLIDOS A GRANUL

2.1 Funcionamiento

2.1.1 Sistemas a presión positiva

2.1.2 Sistemas a presión negativa

2.1.3 Sistemas combinados

2.1.4 Sistemas aire mezclado

2.1.5 Sistemas tanque presurizado

2.1.6 Sistemas de aire activado

2.2 Componentes del sistema

2.2.1 Alimentadores rotatorios

2.2.2 Impulsores de aire

2.2.3 Colectores de sólidos

2.2.4 Almacenadores

2.2.5 Tubería de transporte

2.2.6 Válvulas divergentes

2.3 Ventajas y desventajas

2.4 Aplicaciones y utilización en México

2.1 Funcionamiento

El objetivo principal de un sistema de transporte neumático es trasladar material granular o polvoso de un punto determinado a uno o varios lugares de descarga, usando como medio motriz una corriente de aire. Del lugar de almacenamiento del material, éste se introduce a la línea de transporte por medio de un alimentador donde las partículas se fluidizan mediante una corriente de aire, ya sea a presión positiva o negativa; esta mezcla se lleva por medio de una línea de transporte hasta un destino final donde se separa la mezcla y el material es recolectado.

Existen diferentes formas de clasificar los sistemas de transporte neumático, cada una de las cuales depende del parámetro que se considere; así, se tienen clasificaciones de acuerdo a la presión del sistema, a su velocidad, al tipo de material que se maneja, o bien de acuerdo con la distancia que se va a transportar, dentro de estas la clasificación más práctica es la que se basa en la presión del sistema, la cual se enuncia a continuación.

2.1.1 Sistemas de Presión positiva

- a) Presión alta 43 a 125 psig
- b) Presión Media 12 a 45 psig
- c) Presión Baja Hasta 12 psig

2.1.2 Sistemas de presión negativa

2.1.3 Sistemas Combinados

2.1.4 Sistemas de Aire mezclado

2.1.5 Sistemas con Tanque Presurizado

2.1.6 Sistemas de Aire Activado.

A continuación se describen los diferentes sistemas de transporte neumático de acuerdo con dicha clasificación.

2.1.1 Sistemas de Presión Positiva

Este sistema se utiliza generalmente para transportar material desde un punto único a varios destinos finales. En estos sistemas la corriente de aire a alta velocidad es producida en la línea de transporte por una descarga de aire, que proviene de un soplador centrífugo, transmitida

a la línea por medio de un accesorio de inyección. (Ver Fig. 1). El material es separado desde el almacenaje original por medio de un transportador mecánico y es liberado en un alimentador rotatorio, que impide entradas de aire de la línea a la tolva almacenadora. Entonces el material es descargado por medio de un alimentador en la corriente de aire, una vez hecha la mezcla, ésta es transportada por medio de una tubería, hasta un receptor con venteo. La descarga en varios receptores se realiza uno por uno, con la operación de válvulas divergentes localizadas a lo largo de la tubería principal, y que desvían el flujo a el receptor seleccionado.

Los receptores en los sistemas de presión son generalmente tolvas con conexiones de venteo a la atmósfera o colectores de polvo, dependiendo de las características del material. En algunos sistemas los accesorios de inyección son eliminados, por lo que la corriente de aire puede recibir el material de varias tolvas de almacenaje, cada una de las cuales posee un alimentador rotatorio.

Los filtros de polvo se requieren en dos partes del sistema, cerca del alimentador rotatorio que descarga el material

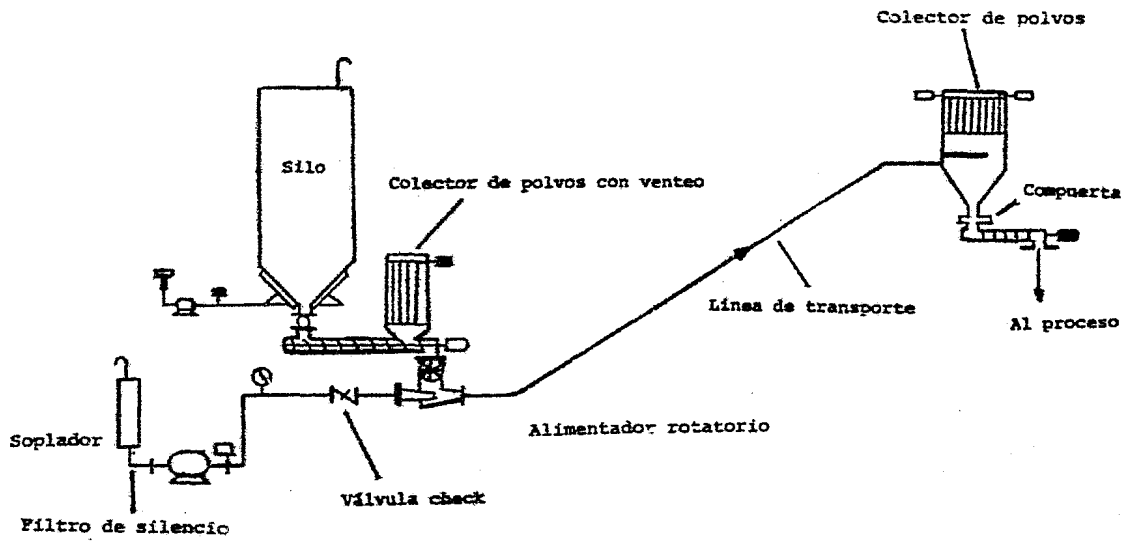


Fig. 1 SISTEMA DE PRESION POSITIVA

en la corriente de aire, y el segundo en los receptores. Para evitar pérdidas de presión y posibles fugas al medio ambiente, el aire de transporte se descarga por medio de venteo.

El venteo puede ser eliminado en instalaciones donde las tolvas estén sujetas a condiciones de aire húmedo, para prevenir condensaciones interiores.

Los polvos colectados por el filtro de polvo se descargan en el conducto de entrada, por medio de un alimentador rotatorio, cuando el equipo está funcionando.

Los controles necesarios pueden ser reducidos considerablemente al eliminar las válvulas divergentes y usan un switch manual en la estación selectora de mangueras. Las conexiones de mangueras pueden ser usadas paralelamente a los tubos para efectuar diferentes funciones, usando el mismo soplador si es posible y si la capacidad de este lo permite, si no es así, se podrán instalarse los necesarios.

En algunos casos las fugas de aire a través de las válvulas llega a ser el 20% del aire total suministrado, lo que ocasiona una pérdida de energía.

2.1.2 Sistemas de presión Negativa.

Estos son los llamados sistemas de vacío, en los cuales una corriente de aire, con alta velocidad, se establece en la línea de transporte, por medio de succión de aire producida por un soplador colocado inversamente en la tolva de recibo. El material es inducido directamente en la línea de transporte por medio de un fluido continuo de aire y a través de una boquilla de captación, o una tolva. La entrada al sistema del material puede ser también por medio de un alimentador rotatorio, alimentado por gravedad, o por un transportador mecánico. La mezcla aire-material es transportada a través de tuberías y llevada a un receptor separador, donde el material es descargado a través de un 2o. alimentador rotatorio, a una o más tolvas de almacenamiento. En el sistema la trayectoria del aire es la siguiente: primero pasa por un colector de polvo, luego por el productor de vacío y posteriormente es descargado en la atmósfera.

Este sistema se utiliza cuando se necesita transportar de varios puntos a una misma tolva de recibo, (Ver Fig. 2) ó bien, donde es preferible tener entradas de aire al sistema, que fugas de polvo al exterior. Esto significa una

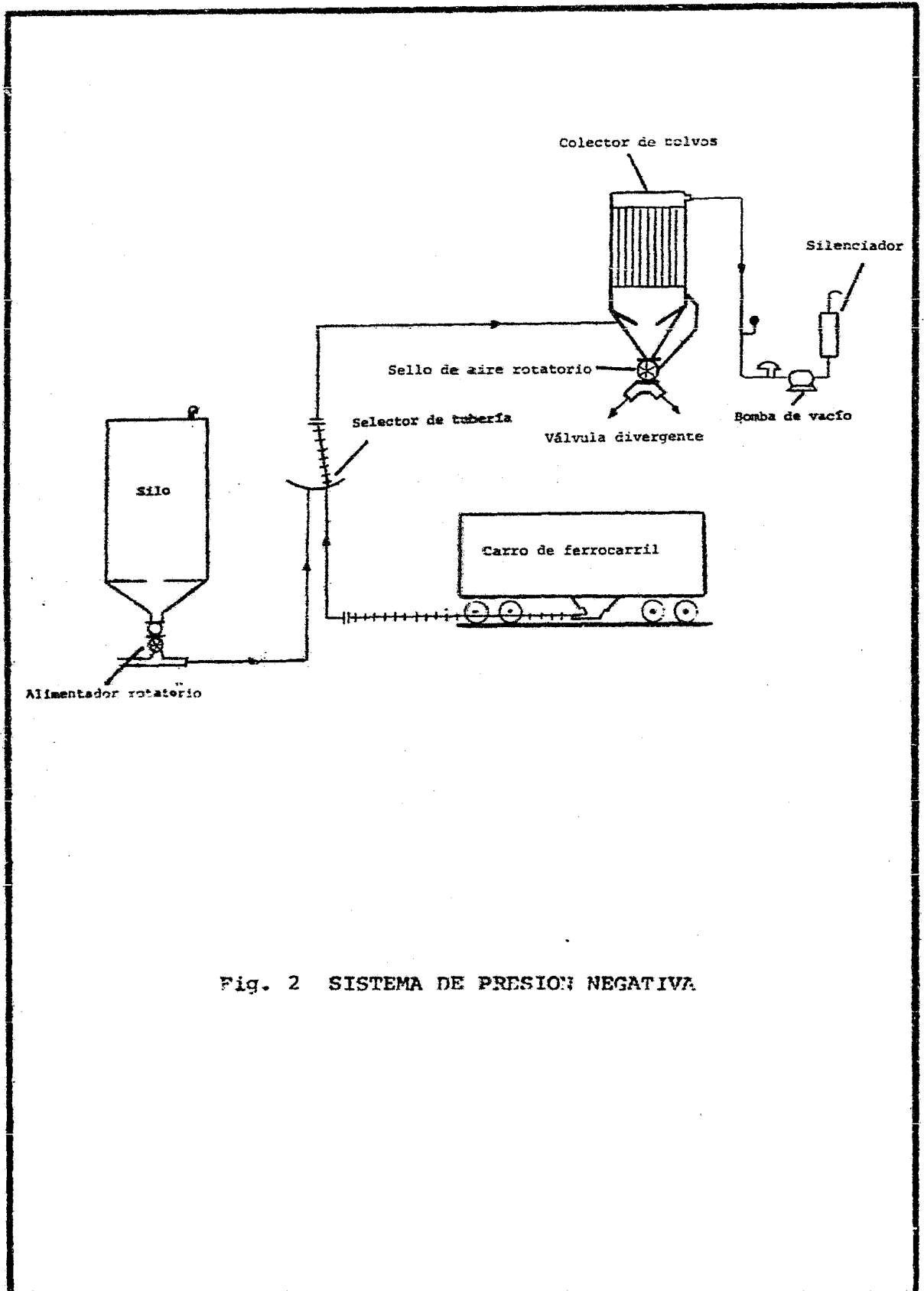


Fig. 2 SISTEMA DE PRESION NEGATIVA

gran utilidad del sistema en manejo de sustancias tóxicas o corrosivas.

Como una opción en este sistema también es posible recoger el material de varios puntos y llevarlo a otros tantos receptores, lo que requiere de un gran aumento de equipo. (Ver Fig. 3). Cada punto de descarga requiere de un equipo receptor, con un alimentador rotatorio de descarga, un par de válvulas divergentes, una para conectar al receptor transportador principal, y otra para la línea de retorno de polvos.

El sistema de vacío es ideal para la descarga de vehículos que transportan materiales (furgones, camiones o barcos), algunos de los cuales vienen equipados con dispositivos o boquillas de captación, lo que requiere de la simple conexión de una manguera para iniciar la descarga. El material es inducido dentro del receptor separador y descargado por gravedad a varias tolvas, o a sistemas mecánicos de gravedad de aire activado para transferirlo a varios puntos de descarga.

Instalándose adecuadamente válvulas divergentes, o estaciones selectoras de mangueras, y el equipo necesario el

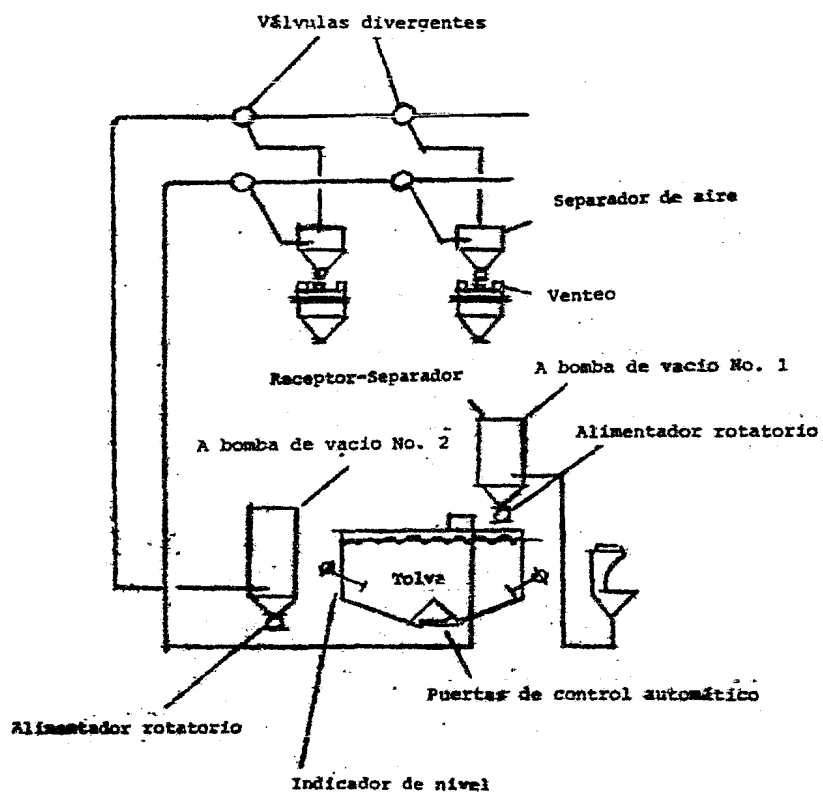


Fig. 3 SISTEMA DE PRESION NEGATIVA

sistema con una bomba de vacío y un receptor separador puede: a) Descargar un furgon de material; b) Recoger material desde varias tolvas de almacenamiento; c) Transferir el material de una tolva de almacenamiento a otra; y d) Librar de material al área de trabajo con la simple instalación de un receptor.

Los receptores-separadores usados en este tipo de sistema son generalmente una combinación de filtro de polvos y de un separador ciclónico. A estos, la corriente de aire de transporte entra tangencialmente dentro de un espacio anular, en un depósito de forma cónica.

En los sistemas de vacío se requiere de mayores dimensiones en todos los equipos, debido a la baja densidad del aire.

Un defecto común en este sistema trabajando cualquier tipo de material, es la pérdida de potencia debido a entradas de aire, ya que este trabaja a vacío. Para evitar esto las válvulas deberán contar con sellos especiales.

2.1.3 Sistemas Combinados Presión-vacío

Este tipo de sistema realiza dos operaciones al mismo tiempo, la de recolectar el material en lugares de difícil acceso, y la de descargarlo a lugares de fácil localización. Se trata de una combinación de sistemas de presión positiva y negativa.

El funcionamiento del sistema es el siguiente. (Ver Fig.4). El material es recogido y transportado primeramente por una corriente de vacío, es recibido por un colector de polvo donde la mezcla es separada, el material es almacenado provisionalmente en una tolva de recibo, en la parte inferior de esta, se encuentra un alimentador rotatorio para alimentar el material a la línea de presión positiva.

El aire utilizado en la línea de presión positiva proviene del lado de vacío, previamente filtrado.

Estos sistemas debido a su versatilidad, son muy usados en la industria, con una gran diversidad de aplicaciones y de arreglos. Aun así deberá tenerse mucho cuidado en el estudio de los materiales a transportarse, y en las funciones a que deberá cumplir el sistema.

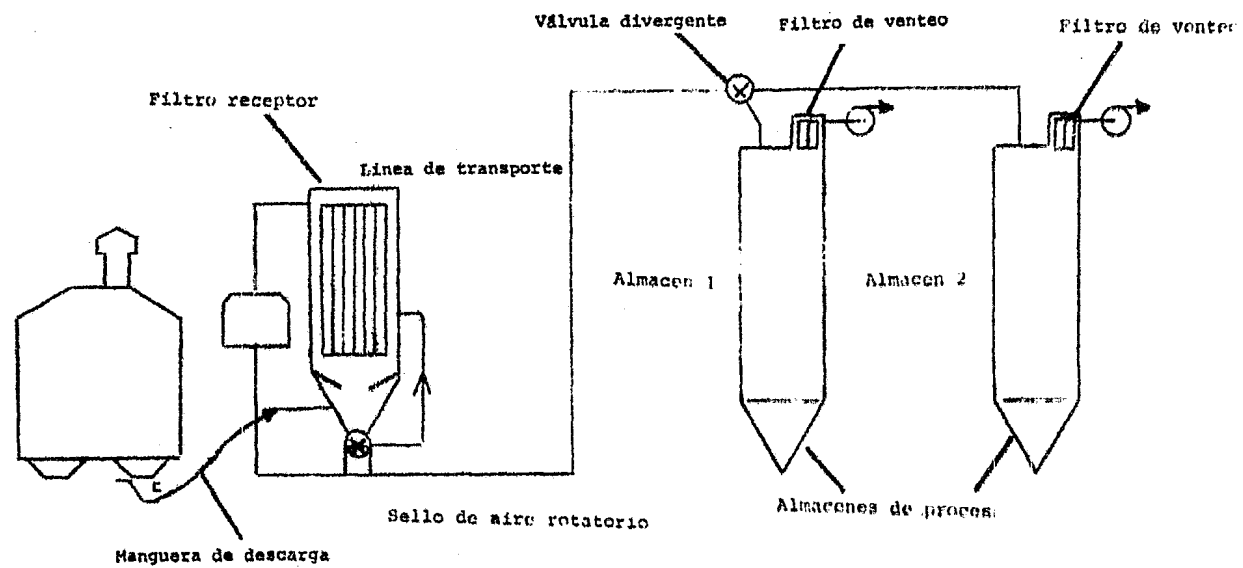


Fig 4 SISTEMA COMBINADO

2.1.4. Sistemas de Aire Mezclado.

Son sistemas en los cuales el aire y el material están mezclados con una relación especial, a una presión positiva. Operan a alta presión y bajas relaciones de aire-material.

El funcionamiento del sistema es similar al de presión positiva, excepto que el tamaño de la tubería es mas pequeño, al igual que el colector de polvos. (Ver Fig. 5)

Se utilizan comúnmente dos tipos de alimentadores; uno emplea un alimentador rotatorio, el cual recibe el material directamente en la parte baja de la tolva, por medios mecánicos o por aire activado. El aire es suministrado al final de las cubiertas del alimentador y entra por un lado del alimentador rotatorio. En la entrada de la línea de transporte, la mezcla a una alta presión es soplada afuera y a través de la línea de transporte. El aire que se queda dentro del alimentador, es venteado e introducido a la tolva, por medio de un preventilador conectado en el alimentador, al quedar vacío el alimentador rotatorio, estará lista para recibir la siguiente carga de material.

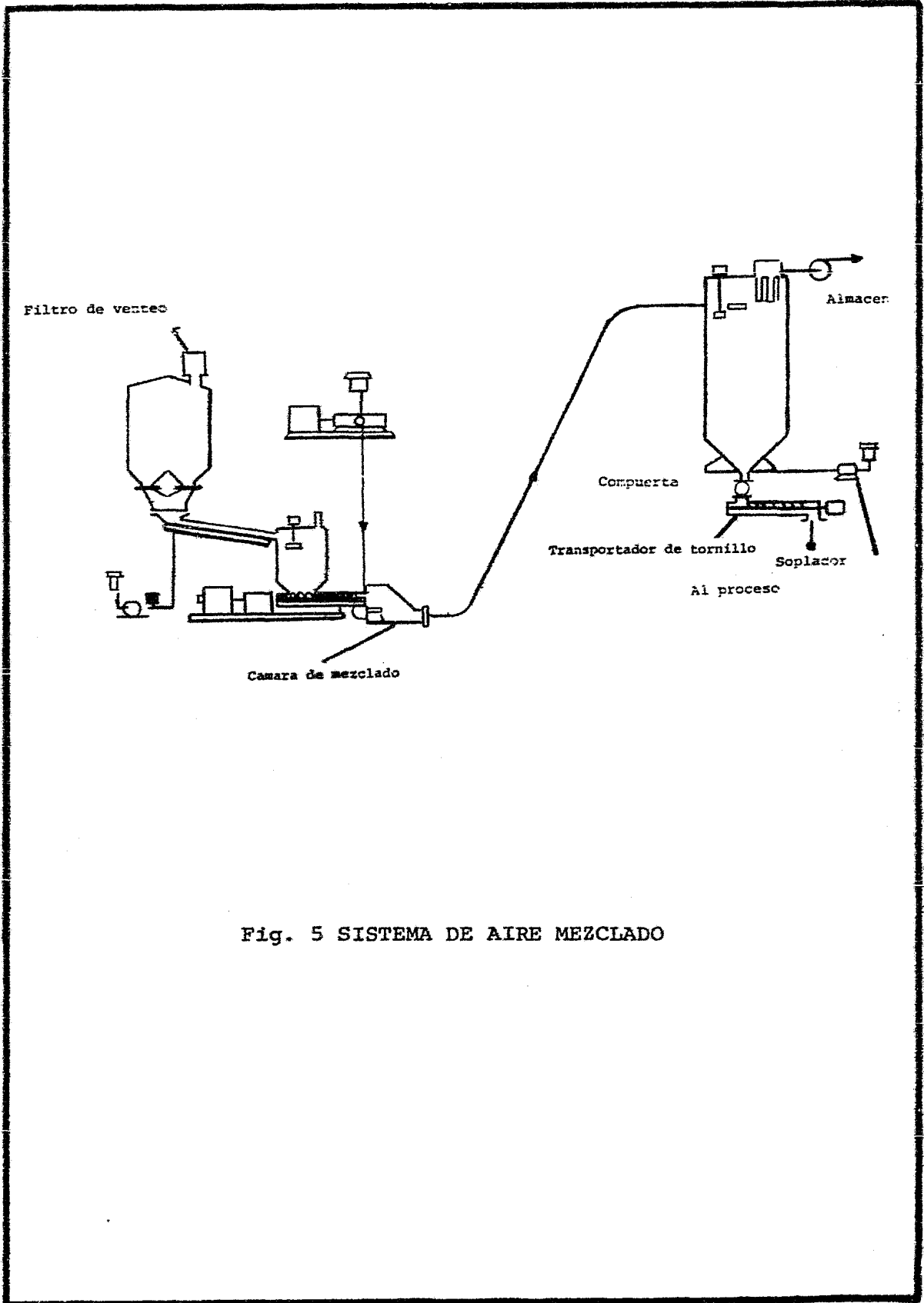


Fig. 5 SISTEMA DE AIRE MEZCLADO

El otro tipo de alimentador contiene un impulsor de tornillo con graduación decreciente de espacio, el cual recibe el material de una tolva de alimentación por medio de gravedad, mecánicamente o por medio de un sistema de aire activado.

El tornillo compacta el material y lo fuerza a entrar a la cámara de mezclado por medio de una válvula check. La cámara de mezclado es alimentada por una tovera que introduce aire a alta presión por medio de alabes deslizantes ó por un compresor centrífugo, de aquí la mezcla entra directamente a la línea de transporte.

Los sistemas de aire mezclado, están limitados a transportar materiales pulverizados, debido a las altas relaciones de aire-material usadas.

Estos sistemas son usados para transportar materiales semi-abrasivos a relativas largas distancias con un mínimo de aire, en una mezcla densa, lo que ocasiona una reducción en el diámetro de la línea.

La máxima presión de operación, en estos sistemas, usando

un alimentador rotatorio especial es de 15 psig.

Esta limitación es determinada por los rangos de presión de trabajo de los impulsores de aire. Los sistemas que usan impulsores de tornillo para alimentación, pueden operar a presiones superiores a 40 Psig. La presión en el compresor durante la operación es 40 Psig. superior, a la de la línea. Esta diferencia se debe a la caída de presión ocasionada por las boquillas de inyección en la cámara de mezclado.

Los sistemas de aire mezclado son esencialmente sistemas de presión positiva y pueden llevar material, a varios puntos de descarga usando válvulas divergentes.

2.1.5 Sistemas con Tanque Presurizado.

En este tipo de sistemas, el aire entra a un tanque donde está el material depositado, se presuriza este tanque, y posteriormente se establece un flujo de mezcla aire-material. (Ver Fig. 6).

En general estos sistemas están formados por un recipiente cilíndrico presurizado en forma de depósito cónico, acompañado del siguiente equipo:

- Una válvula diametral de admisión de material operada por un cilindro neumático, colocado en la parte superior del recipiente.
- Un cilindro de aire que opera una válvula de venteo, también colocada en la parte superior, y cuya función es dejar escapar el aire cuando el material es introducido.
- Un medidor de nivel, para determinar cuando se llena el depósito.

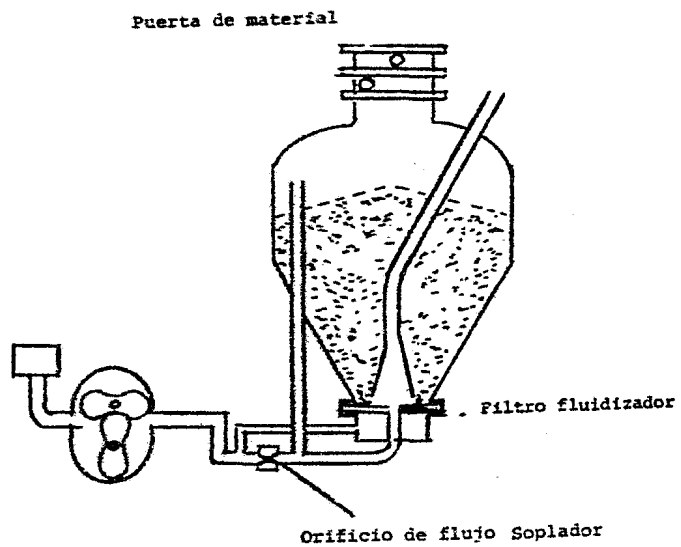
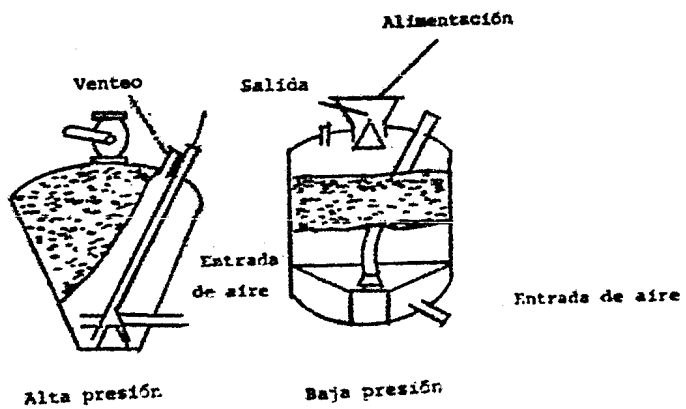


Fig. 6 SISTEMA CON TANQUE PRESURIZADO



- Boquilla de aereación a lo largo de los lados, y cerca del tanque, donde se suministra el aire que proviene de un soplador o un compresor.
- Un tubo sellado de descarga, con o sin una boquilla de freno de aire para aumentar la fluidización y ayudar a la transportación a través de la línea.
- Un panel de control para operaciones secuenciales de vaciado y llenado del tanque, en un ciclo intermitente automático o manual si es necesario.

La descarga de aire se realiza por medio de un compresor de alta presión o por un soplador, a través de una válvula solenoide.

El funcionamiento del sistema con tanque presurizado vacío es el siguiente (ver fig. 7) .

Una vez abiertas las válvulas de venteo y de entrada de material,este entra hasta que el tanque se llena, lo cual es registrado por un detector de nivel, conectado a un relevador.

Este detector u otro que registra la variación

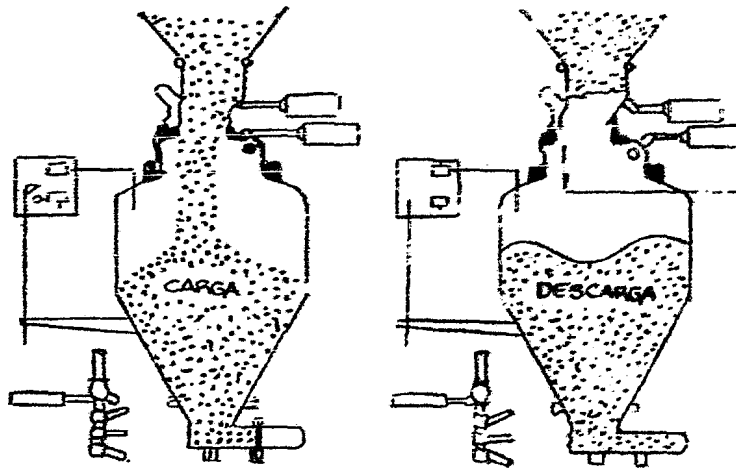


Fig. 7 CICLO DE OPERACION TANQUE PRESURIZADO

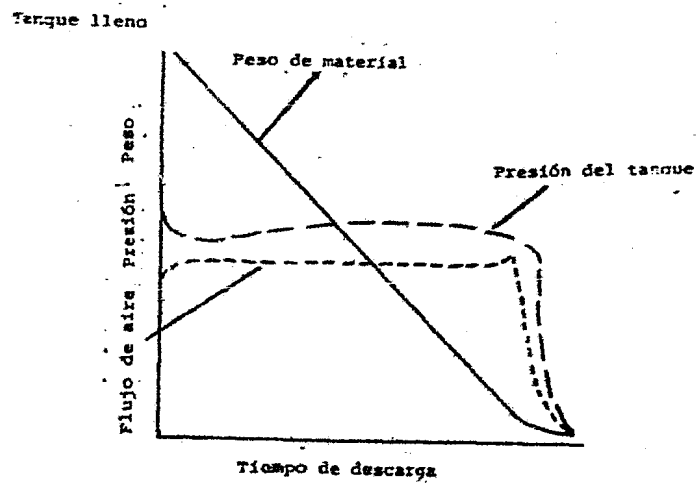


Fig. 8 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN TANQUE PRESURIZADO CON ALIMENTACION CONTROLADA

de peso, accionan controles eléctricos que a su vez cierran las válvulas de venteo y entrada de material y abren la válvula solenoide de entrada de aire. El aire proveniente del soplador, entra al tanque, aumenta la presión en este, hasta que el material está altamente aireado y comienza a fluir por la línea de transporte.

La variación de la presión del aire producida por el soplador y la presión de la corriente de transporte se muestra en la Fig. 8. Estas curvas muestran el funcionamiento de un sistema de libre alimentación, en el cual la relación de material aireado es baja en el comienzo y fin de un ciclo de descarga.

En la Fig. 9 se muestra el funcionamiento de una alimentación controlada, por lo tanto, la velocidad constante de descarga es mantenida por la dosificación del aire dentro del tanque, en proporción a la pérdida de peso en el tanque registrada ésta por una celda de carga en el soporte del tanque.

Cuando todo el material ha dejado el tanque y solamente el aire fluye a través de la línea, un switch de baja presión,

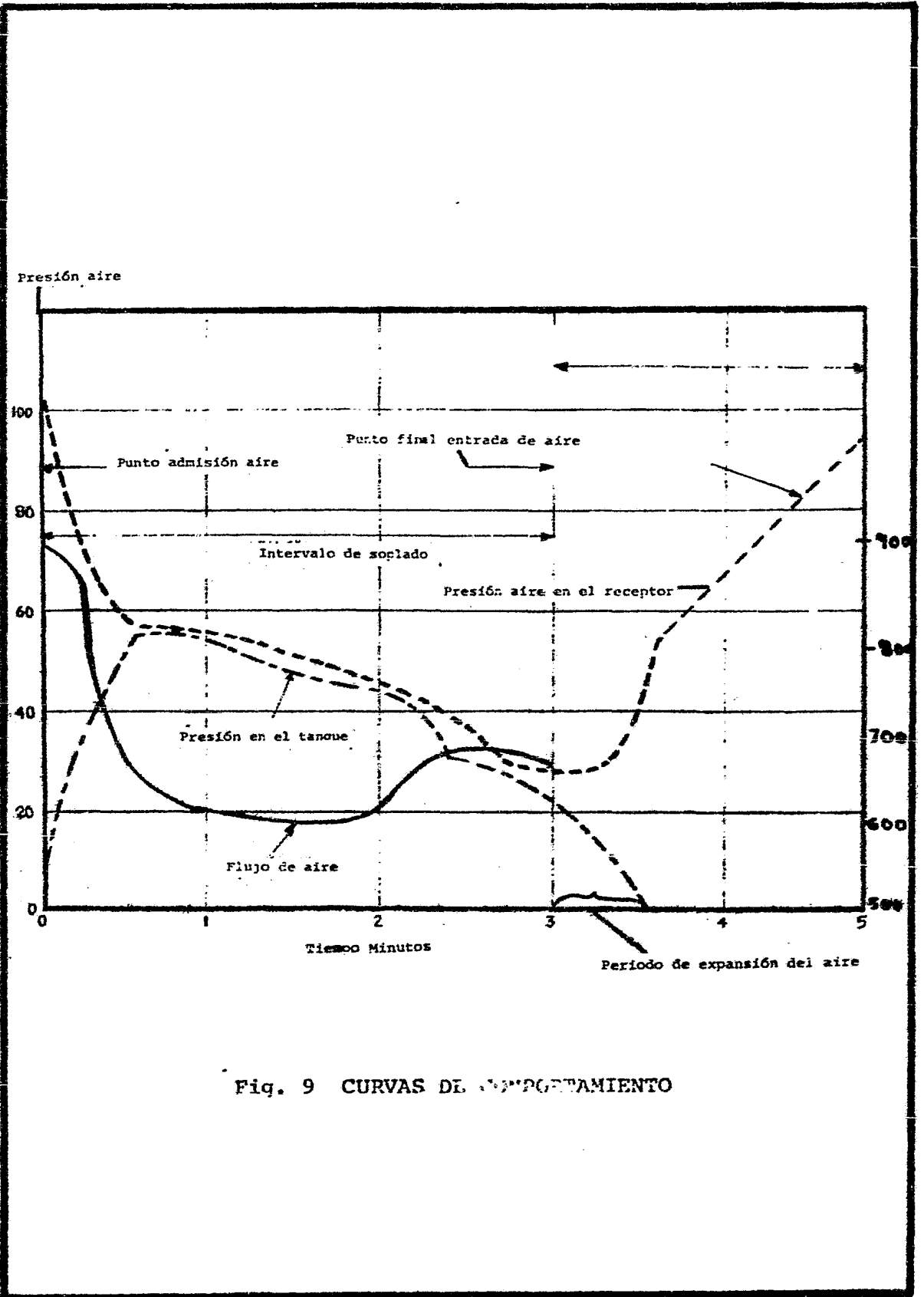


Fig. 9 CURVAS DE COMPORTAMIENTO

6 los relevadores que detectan la pérdida de peso, actúan controles eléctricos, los cuales cierran la válvula de entrada de aire y abren las válvulas de venteo y la de entrada de material para comenzar el siguiente ciclo.

En tanques que reciben el aire de sopladores, el soplado deberá ser parado en la descarga, o descargará el aire por una válvula de paso.

Los sistemas de tanque presurizado dependen de la facilidad del material a ser fluidizado. Sin embargo algunos materiales que tienden a formar terrones y normalmente no son fluidizables, pueden ser transportados también en estos sistemas.

La baja velocidad de las corrientes de transporte, hacen de este sistema ideal para el transporte de materiales abrasivos o desmenuzables y también para otros materiales, con buenas características para fluir. Los materiales que no puedan ser transportados en sistemas de baja presión probablemente la puedan hacer en los llamados sistemas de alta presión.

Los nuevos tipos de sistemas de control de alimentación,

han hecho posible el transporte de materiales altamente abrasivos o desmenuzables a muy bajas velocidades, tales como 150 ft/min. y altas relaciones de material (500-1).

Algunas maneras de hacer esto son las siguientes:

- a) Controlando la entrada de aire en el tanque o dependiendo de la pérdida de peso;
- b) Introducir solamente parte del aire producido por el soplador al tanque, el restante se introduce por medio de boquillas en puntos estratégicos a lo largo de la línea de transporte.

La descarga en este sistema es intermitente, lo cual puede ser remediado por la operación alternativa de un par de tanques presurizados, cuando un tanque recibe el material, el otro está descargándolo.

La capacidad de almacenamiento de los tanques va de 1 a 400 ft³ y presiones que varían en un rango de 1 a 500 lb/in² dependiendo ambos de las características específicas del sistema.

2.1.6. Sistemas por aire activado.

Si bien este sistema no es un transportador neumático de acuerdo a la definición que de ellos tenemos, si puede incluirse como un miembro más de la familia. En un transportador neumático la fuerza motriz la suministra la energía producida por la expansión del aire. En este tipo de sistemas la fuerza motriz es la fuerza de gravedad. Normalmente se considera el transporte por gravedad, como la caída del material a través de un ducto inclinado, cuyo ángulo con la horizontal es mayor que el ángulo de reposo del material.

Todo los materiales, no mayores a $1/8''$ de diámetro o los finamente divididos, tienen un ángulo de reposo definido, y para transportarlos a un ángulo mucho menor, hay que proporcionar cierta ayuda al material. La vibración es un método para abatir el ángulo de reposo del material para que este fluya libremente hacia abajo. Otro método es la utilización del aire.

En el caso de los transportadores por aire activado, los requisitos de aire, el ángulo de inclinación de la instalación e incluso la viabilidad de uso de este sistema,

están en función de las características físicas del material a transportarse. El material debe ser seco y fluidizable y para ello tendrá un tamaño de partícula muy pequeño. Ver fig 10

Los transportadores de aire activado constan de dos cámaras separadas por una membrana porosa; en la parte superior está el material y en el inferior el aire de fluidización.

Este transportador, tiene también la habilidad de hacer cambios de dirección usando radios grandes y manteniendo siempre la misma pendiente.

Un diseño adecuado de estos sistemas, comprende el estudio de las siguientes consideraciones:

- Tipo de transportador.

Pueden ser abiertos o cerrados. El material se alimenta al transportador en la parte superior a través de una tolva. El aire se suministra por la parte inferior de la cámara de aire y fluye a través de la membrana porosa fluidizando el material, ocasionando que fluya libremente hasta la parte más baja del

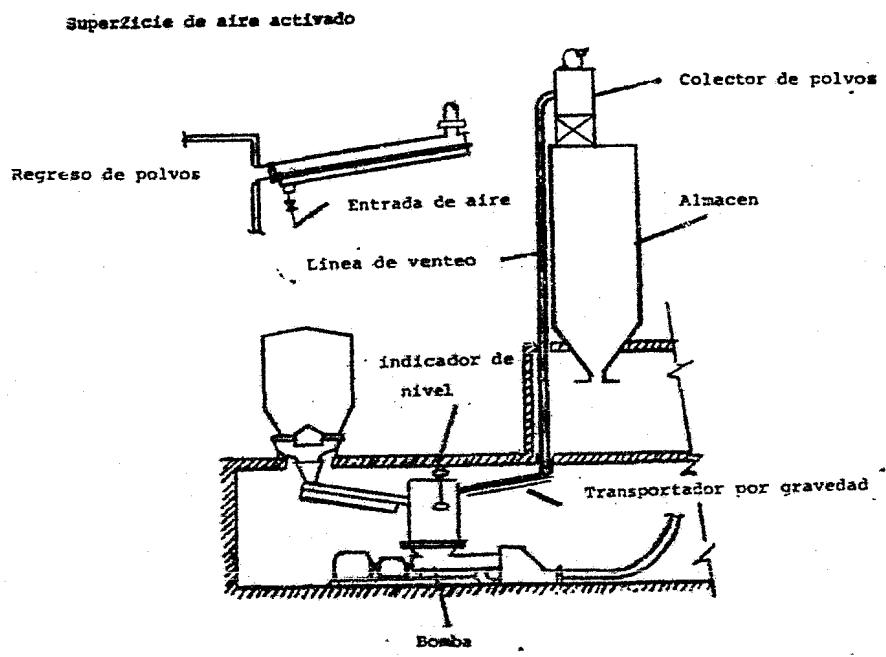


Fig. 10 SISTEMA DE AIRE ACTIVADO

transportador. En los transportadores de tipo cerrado, la cámara superior está cerrada y tiene venteo en la descarga.

- Medio poroso.

La membrana porosa es el corazón de estos transportadores. La naturaleza del medio poroso determina la presión requerida para producir el flujo de aire a través de ella. El flujo de aire varía con la caída de presión que se produce al pasar a través de la membrana. El medio poroso debe proporcionar una distribución uniforme de aire sobre la superficie de transporte. La selección del medio poroso se basa generalmente en la uniformidad de la distribución del aire. A veces se basa en la resistencia a los ataques químicos. La permeabilidad de cualquier membrana varía con el tiempo debido a la formación de polvos en la cara de la membrana por donde fluye el material.

- Suministro de aire.

Los requisitos de aire pueden variar desde 4 hasta

30 in. de agua de presión y desde 2 hasta 30 ft^3 de aire por ft^2 de membrana. Estos requisitos son suministrados por un ventilador o por un soplador de desplazamiento positivo de baja presión.

La cantidad de aire requerido por estos sistemas depende de: las características físicas del material; área seccional del transportador; profundidades de la capa de material; pendiente del transportador; densidad del material en el transportador y, de la naturaleza del medio poroso.

El aire necesario puede suministrarse en cualquier punto a lo largo del transportador.

El uso de una unidad central para varios transportadores, requiere de precauciones especiales para garantizar una distribución uniforme de aire a cada unidad.

- Alimentación y descarga del material.

La alimentación se efectúa a través de compuertas reguladoras de flujo. La descarga puede incluir compuertas laterales a fin de descargar material, en puntos intermedios.

Estos transportadores además de utilizarse en operaciones de transporte hasta del orden de 5,000 ft (manteniendo la fluidización del material y la pendiente de la instalación).

Entre las ventajas más importantes de estos sistemas se encuentran las siguientes: inmejorable, simplicidad, no tiene partes móviles, tienen muy poco desgaste, funciona con requisitos mínimos de potencia, gran facilidad de instalación, de operación y de mantenimiento.

2.2 Componentes del sistema

2.2.1 Alimentadores rotatorios

2.2.2 Impulsores de aire

2.2.3 Colectores de sólidos

2.2.4 Almacenadores

2.2.5 Tuberías de transporte

2.2.6 Válvulas divergentes.

2.2.1 Alimentadores Rotatorios

El principal dispositivo para introducir o extraer material en un sistema de transportación neumática, con el mínimo de pérdida de aire transportador son los alimentadores rotatorios.

Consisten básicamente en un rotor, montado sobre una flecha con cavidades formadas por espas radiales. (Ver Fig. 11)

Su funcionamiento es simple, el material entra a las cavidades del rotor por la parte superior, este gira t descarga

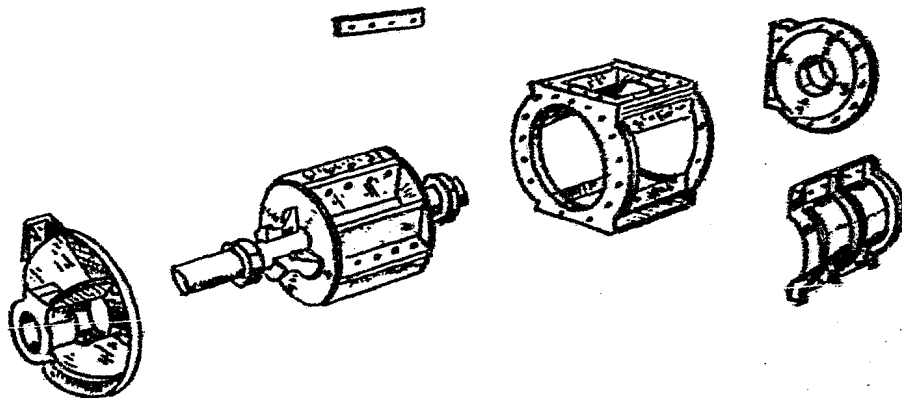


Fig. 11 ALIMENTADOR ROTATORIO

los sólidos por la parte inferior. Como principal característica deben evitar la fuga de aire a la parte inferior de la tolva alimentadora, para lo cual serán instalados sellos de aire, dependiendo del material a manejar.

En el diseño de alimentadores rotatorios es necesario considerar lo siguiente;

a) Las características de los sólidos a manejarse: tamaño de partícula, forma, temperatura, susceptibilidad a la humedad, fragilidad, abrasividad y densidad.

b) Presión diferencial en el alimentador. Para un correcto diseño, es necesario considerar esta presión diferencial, dicha presión debe considerarse para el cálculo de la flecha y el rotor, ya que por medio de esta - existe una deflexión que puede obstruir el giro del rotor, lo cual puede ocurrir por la estrecha tolerancia entre -- éste y el cuerpo del alimentador.

También es importante el servicio que proporcionará el alimentador, que puede ser como alimentador volumétrico o como sello de presión.

Para evitar fugas del lado de alta presión al de baja, deberán considerarse lo siguientes factores:

- 1) Usar un pre-ventilador, permitir la descarga del aire a alta presión en las aspas vacías.
- 2) Proveer el alimentador con un claro de 0.003 a 0.005 pulgadas entre la punta de las aspas y la envoltura o agregar juntas sellantes.
- 3) Proveer suficientes aspas entre la entrada del material y los puntos de descarga para obtener un sellado con efecto de laberinto.

La parte básica de estos alimentadores son los rotores, los cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Rotores abiertos.
 - b) Rotores cerrados.
-
- a) Rotores abiertos.

Estos rotores tienen paletas radiales con los extremos

abiertos, se usan para presiones diferenciales de hasta 10 Psig. El número de paletas se determina por la cantidad de sellado requerida entre el rotor y el cuerpo. Para capacidad máxima deben usarse cavidades profundas. Cuando se agregan más paletas al rotor se originan problemas en función directa de su número, pues al estrecharse la garganta de las cavidades, los sólidos encuentran dificultad para entrar y salir de ellas.

b) Rotores cerrados.

Estos rotores tienen aspas radiales con los extremos cerrados, con lo cual se tiene un diseño de rotor con mayor resistencia a la distorsión que se presenta con diferenciales de presiones altas. Se utilizan generalmente cuando se manejan materiales abrasivos, pues debido a los extremos cerrados se reduce el desgaste entre el rotor y las placas terminales del cuerpo del alimentador.

Los alimentadores rotatorios también pueden clasificarse de acuerdo a la caja donde está instalado el rotor.

Los tipos de cajas más comunes son: Alimentadores Rotatorios de caída vertical. (Drop-Through).

Alimentadores Rotatorios de caja venteada.

Alimentadores Rotatorios de soplo horizontal. (Blow-Trough).

Alimentadores Rotatorios por arrastre de aire. (Air-Swept)

Alimentadores Rotatorios de caída vertical.

Este alimentador es el que se conoce comúnmente como alimentador rotatorio. La entrada y la salida de material pueden tener sección cuadrada, rectangular o redonda. Se usan como sellos de aire en la descarga de filtros-recibidores o ciclónicos, en sistemas de vacío, y como sellos de aire y alimentadores volumétricos en la alimentación de sólidos a sistemas combinados presión-vacío. Como sello de aire en la descarga de filtros recibidores y recibidores ciclónicos deberá tener una entrada de material redonda para mantener la configuración circular de la sección cónica a la cual se fija en cualquier caso; el rotor debe tener una posición normal con respecto a la línea central del ducto de transporte.

Alimentador Rotatorio de Caja Venteada

La diferencia con respecto al anterior es un venteo ubicado entre la entrada y la salida de sólidos, el cual tiene como finalidad desplazar el aire de las cavidades del rotor, el cual podría obstruir la entrada de sólidos.

Este alimentador se usa solamente para materiales de flujo libre, finamente divididos y que no sean abrasivos, en sistemas de baja presión. El material entra al rotor por la parte superior y al girar el rotor llega a la parte interior, al continuar el giro del rotor el material pasa a la parte inferior y se introduce por las salidas a la corriente transportadora. En estos alimentadores se tiene buen mezclado de material. El cuerpo del alimentador se considera, en este caso, como una parte integral de la tubería de transporte.

-Alimentador Rotatorio por arrastre de aire

Este alimentador al igual que el anterior es para sistemas de baja presión, pero tiene la ventaja de manejar además de materiales finamente divididos, de flujo libre y que no sean abrasivos, materiales granulares, que no se puedan manejar con el alimentador de sople horizontal.

debido a la gran turbulencia que ocasionaría la recirculación de sólidos. Este alimentador también usa el aire de transporte para mezclarlo en las cavidades del rotor pero la descarga se efectúa no sólo por la acción del aire, sino también por la acción de la gravedad. Aquí el aire entra por las placas terminales del alimentador y la entrada al rotor, está ubicado cerca del punto de descarga de las cavidades.

La doble acción de este aire sobre las bolsas del rotor permite un buen mezclado aire-material facilitando la descarga; por otra parte, evita que el material entre en contacto con los soportes de la flecha, desgastándolos.

Este alimentador rotatorio es el que tiene la mayor eficiencia volumétrica de los mencionados anteriormente.

2.2.2. Impulsores de aire.

El tipo de impulsores de aire seleccionado para un sistema de transportación neumática se determina básicamente, por la corriente de aire y presión necesitada, para transportar un material específico a través de un sistema de tuberías a un costo determinado, considerando además un factor de seguridad por concepto de fugas internas o externas.

Los impulsores de aire mas usados son:

- a) Ventiladores centrífugos.
- b) Sopladores rotatorios de desplazamiento positivo.
- c) Sopladores compresores de flujo axial.
- d) Compresores de paleta múltiple.

- a) Ventiladores centrífugos.

En estos ventiladores el aire es comprimido e impulsado por la acción dinámica de un solo impulsor rotatorio. Los materiales empleados en su construcción

pueden ser: acero al carbón, aluminio y acero inoxidable, y pueden ser impulsados por medio de una banda de transmisión o directamente.

Los ventiladores centrífugos, dependiendo del material de construcción, pueden tolerar grandes temperaturas, pero al incrementarse estas, debe incrementarse también la velocidad, para compensar la pérdida de eficiencia debida a la disminución de la densidad del aire.

La velocidad del ventilador puede modificarse fácilmente. Si es impulsado por bandas, cambiando el diámetro de las poleas y, si es impulsado directamente, cambiando el diámetro del impulsor; sin embargo esto último generalmente es costoso.

Los ventiladores centrífugos se usan en sistemas de vacío de baja presión o combinados.

Tienen la desventaja que el flujo de aire disminuye al aumentar la resistencia en el sistema (ocasionada por taponamiento en las líneas). Pueden liberar cantidades muy grandes de aire a presiones diferenciales muy bajas

(0.5 Psig.)

Existe otra línea de ventiladores centrífugos llamados ventiladores industriales, los cuales están diseñados para trabajos de baja presión alrededor de 20 in de H_2O de presión estática, algunos de estos ventiladores, sin embargo generan presiones hasta de 45 in de H_2O , los cuales tienen impulsores radiales de diseño de aro, o de tipo dentado. El primer tipo es para manejar aire y polvo fino, y el último (llamado filtro de rueda) es para materiales longitudinales.

Cuando se especifique un ventilador , las condiciones de entrada y salida, deberán ser descritas ampliamente (Temperaturas, presiones y condiciones de ambiente prevalentes) ya que el manejo de aire a menor temperatura ocasionaría un aumento necesario de potencia, debido al cambio de densidad en el aire antes mencionado.

b) Sopladores Rotatorios de Desplazamiento Positivos.

Estos sopladores tienen 2 rotores lobulares accionados por engranajes sincronizados de tal manera que se engranan

uno con otro al rotor en direcciones opuestas, dentro de un cuerpo maquinado con tolerancias estrechas. El aire entrante es atrapado entre los lóbulos (Ver Fig. 12) y descargado el sistema en forma de pulsaciones. Los rotores están separados en su punto más cercano por un pequeño espacio de tal manera que nunca hagan contacto. Estos engranajes sincronizados, pueden impulsarse directamente por un motor a través de bandas en V, lo cual es más conveniente debido a la facilidad y economía para efectuar cambios de velocidad. Estos sopladores liberan con cada revolución, una determinada cantidad de aire, medida a las condiciones de entrada. Operando a una velocidad constante, contra una presión constante, el soplador libera una cantidad igual de aire. Si se incrementa la velocidad del soplador, manteniendo la presión constante, se incrementa el volumen de aire liberado en una cantidad igual al aumento en el número de revoluciones. Para aplicaciones generales de transporte es recomendable utilizar un sellado de ejes mínimo en las placas terminales; pero para el manejo de gases inertes, donde las pérdidas en estos puntos, pueden ser críticas; deben usarse sellos de ejes diseñados para trabajo pesado.

Estos sopladores pueden liberar cantidades de aire en un rango que oscila entre unos cuantos F_t^3/min . hasta 24,000 f_t^3/min a presiones de hasta 12 psig.

Tienen la ventaja, con respecto de los ventiladores centrífugos, de que pueden desarrollar presiones altas y suficiente capacidad, para mover los sólidos cuando las líneas del sistema se tapan. Se utilizan en sistemas de vacío a baja presión y combinados.

c) Soplador/compresor de flujo axial.

Este soplador-compresor tiene 2 rotores cicloidales de diámetro relativamente pequeño, del tipo macho-hembra, que giran a velocidades de varios miles de RPM y su rotación causa la progresión axial sucesiva de cavidades selladas. (Ver Fig. 13) Con este sistema de operación el aire es liberado de una manera suave y continua. Su rango de operación, es del orden de unos cuantos f_t^3/min hasta 12,000 f_t^3/min con presiones hasta de 18 psig. Se utilizan en sistemas de vacío, sistemas de baja presión, presión media y sistemas combinados.

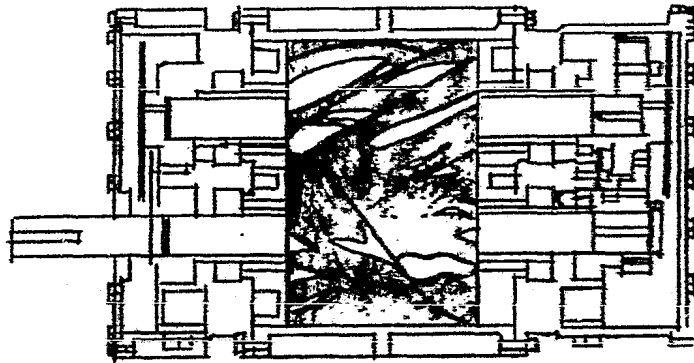


Fig. 13 SOPLADOR / COMPRESOR DE FLUJO AXIAL



Fig. 12 SOPLADOR ROTATORIO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

d) Compresor de Paleta Múltiple.

Consiste en un rotor de paleta múltiple dentro de una cubierta maquinada bajo estrechas tolerancias. El rotor gira y el aire, que entra por el ojo de dicho rotor, va incrementando en velocidad en forma radial hasta que llega a los extremos de las paletas, punto en el cual, esta velocidad se convierte en presión. La función de estos compresores es la de incrementar la presión del aire que fluye a través de ellos.

Este tipo de compresor, se fabrica en una fase, dos fases y fase múltiple. Su capacidad oscila en un rango de 30 a 3300 ft^3/min y presiones hasta 125 psig. Debido a su diseño rotatorio este tipo de compresor libera un flujo de aire continuo, sin pulsaciones, directamente desde su punto de descarga, ya sea a una bomba de flujo de sólidos o a un tanque inyector, sin la necesidad de usar un recipiente de aire intermedio.

Se usan en sistemas de presión media y alta.

2.2.3. Colectores de sólidos.

La recuperación del material de la corriente transportadora requiere de la separación del aire y el material en un colector. De acuerdo al sistema de transporte, a las características del material y a los requisitos de operación se seleccionan los colectores que pueden clasificarse de la siguiente manera.

- a) Colectores ciclónicos
- b) Filtros-colectores o colectores de polvo.
- c) Tanques colectores.

a) Colectores ciclónicos.

Se usan para efectuar separaciones en los puntos terminales de sistemas de vacío, baja presión y presión media. No tienen un 100% de retención de polvos por lo cual su uso está limitado a sólidos no polvosos. Sin embargo, en sistemas de presión media tienen un mayor grado de eficiencia no obstante que la velocidad en estos sistemas de ningún modo es tan grande, como en los sistemas de vacío y baja presión. Ello se debe a que la acción ciclónica no se ve interrumpida por soplos de aire entre la salida del

fondo y la válvula de descarga, como es el caso en sistemas de vacío.

Los recibidores ciclónicos, para uso de sistemas neumáticos, se diseñan y contruyen en 2 tipos, fase sencilla (Ver Fig. 14) y 2 fases. La eficiencia de estos ciclones puede elevarse, con el uso de entradas y salidas de aire tipo espiral. Los ángulos de los conos varía de 60° a 75° para ciclones primarios y de 70° a 85° para ciclones secundarios.

Los recibidores ciclónicos primarios se usan únicamente para sistemas de vacío y los secundarios para sistemas de vacío y de presión (baja y media).

Los materiales de construcción, así como el grado de rigidez, se determinan en función del material a transportarse y sus efectos de desgaste. En el manejo de materiales abrasivos se acondicionan los recibidores ciclónicos con capas de material resistente al desgaste, para extender su vida promedio, especialmente en los puntos de impacto.

b) Filtros recolectores.

Se componen de una sección inferior cónica y una sección

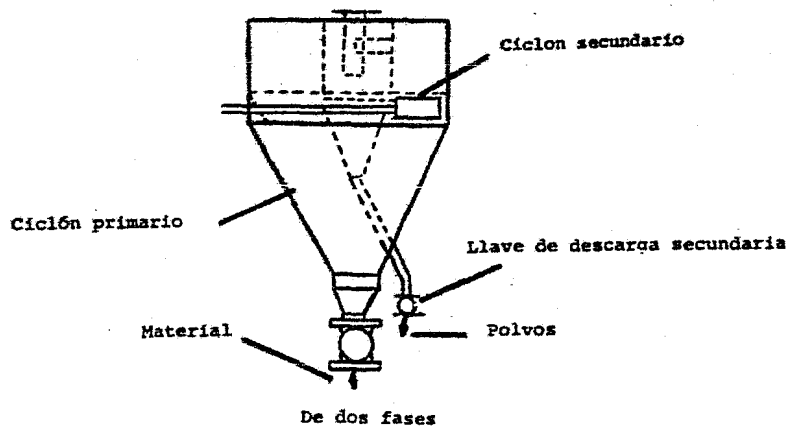
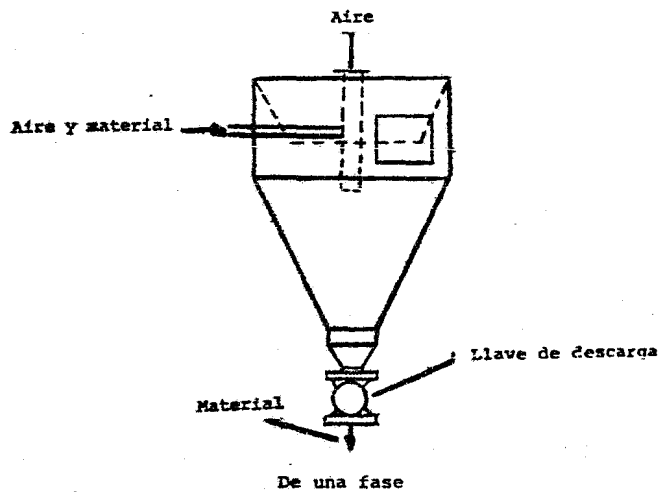


Fig. 14 RECIBIDOR CICLONICO

superior equipada con un medio filtrante. (Ver Fig. 15). Se usan en sistemas donde se requiere una separación de 100% de sólidos. El medio filtrante puede ser de fibras naturales o sintéticas y su limpieza se efectúa por sacudimiento mecánico, aire en sentido contrario a la superficie de retención o una combinación de ambos.

Uno de los filtros-colectores más usado, es el de 4 compartimientos. (Ver Fig. 16). En este, el medio filtrante está dividido en 4 secciones, con lo cual la limpieza del filtro, se efectúa por sección, evitando con esto la necesidad de detener la corriente transportadora. Este separador ofrece una alta relación de área activa filtrante durante el ciclo de limpieza (el cual tiene una duración de 15 a 30 segundos cada 2 ó 3 min.)

En el caso de materiales polvosos no abrasivos, la corriente transportadora debe entrar al separador en forma tangencial para tener en el cono una separación ciclónica.

En el caso de materiales abrasivos, la corriente transportadora debe entrar al separador en forma radial, es necesario hacerla chocar contra una placa desviadora, para disminuir la velocidad de flujo, provocando el choque entre las partículas....

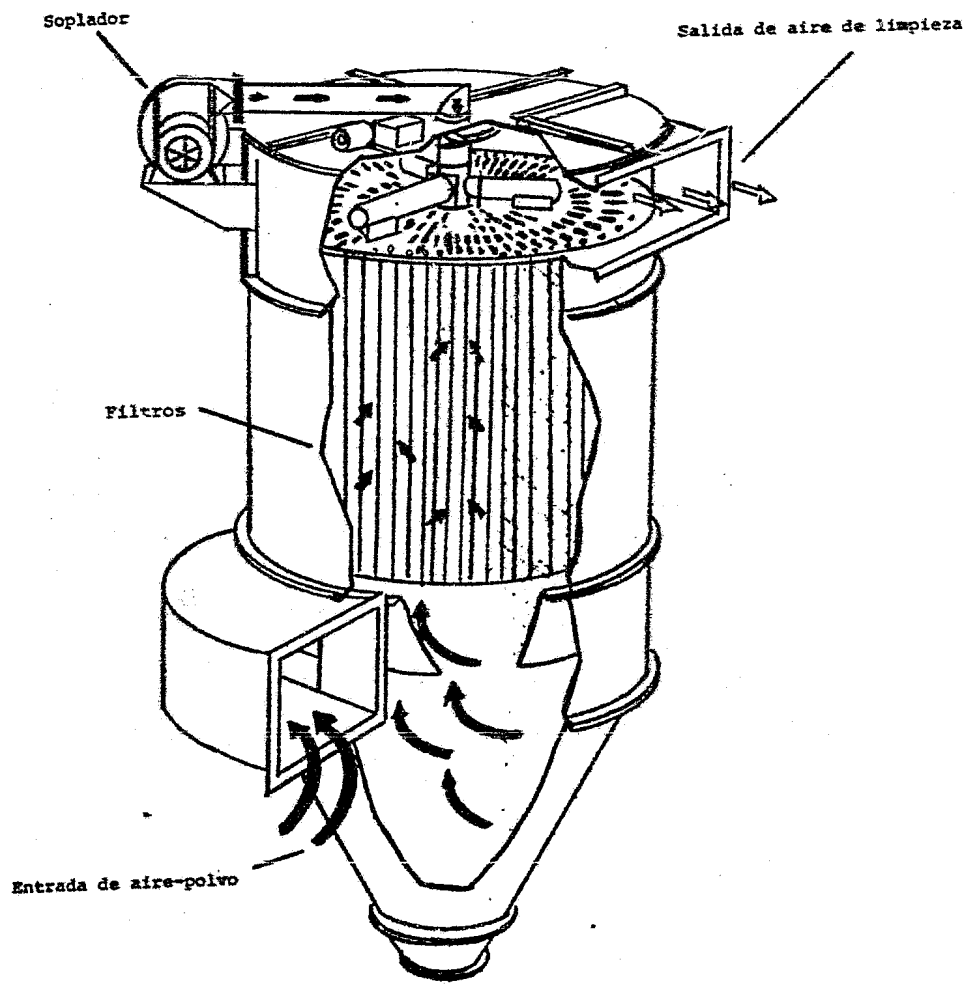


Fig. 15 FILTRO RECOLECTOR DE POLVOS

abrasivas y así reducir el desgaste en las paredes del receptor.

Para facilitar la acción ciclónica, en el fondo cónico se utiliza un faldón interno, para crear esta condición, así como para eliminar la posibilidad de que el aire transportador se dirija directamente a la salida del separador y/o a las bolsas filtrantes.

La placa de la cabeza a la cual se fijan los tubos filtrantes, debe ser de acero y con los cuellos (agujeros donde se colocan los tubos filtradores) soldados y herméticos; esta condición permite a la placa recuperar la resistencia perdida por dichos cuellos y reduce al mínimo la flexión de operación resultante por las diferenciales de presión.

Los filtros generalmente se dimensionan en $f_t 2$ de filtro requerido para retener los polvos de cada $f_t 3$ de aire, que pasa a través de dicho filtro. Dependiendo del material transportado, así como de su carga de polvos, los resultados de estas relaciones pueden variar de 1 a 6

Actualmente existen colectores que usan únicamente medios

neumáticos para su limpieza. Tienen en las partes finales de cada tubo filtrante, una boquilla por la cual se inyecta aire en dirección contraria a la del flujo normal, con presiones hasta de 100 psig. (Ver Fig. 17). Estos colectores son muy costosos por el equipo requerido, el cual consta de un sistema de tuberías con boquilla a cada uno de los tubos, aparte un impulsor de aire.

Otros colectores usan una jaula de bolsas filtrantes, las cuales se substituyen una por otra cuando requiere limpieza.

Cuando la disponibilidad de espacio es reducida se puede efectuar una adaptación, combinando un ciclón primario y un filtro recolector, adicionado al fondo del recolector un ciclón secundario para recoger los polvos desalojados.

Cualquiera que sea la selección del medio filtrante debe checarsé las recomendaciones de los fabricantes, para las relaciones aire/unidad de área de tela filtrante.

c) Tanques recolectores.

La descarga de sólidos en sistemas de presión pueden

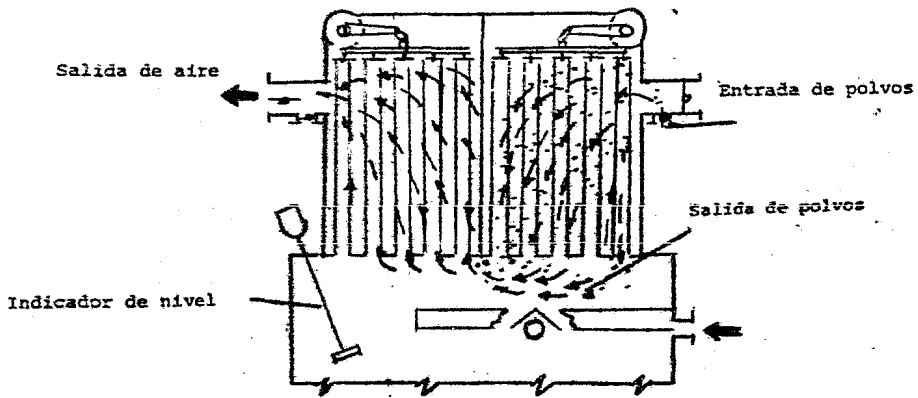


Fig. 16 FILTRO COLECTOR DE 4 COMPARTIMIENTOS

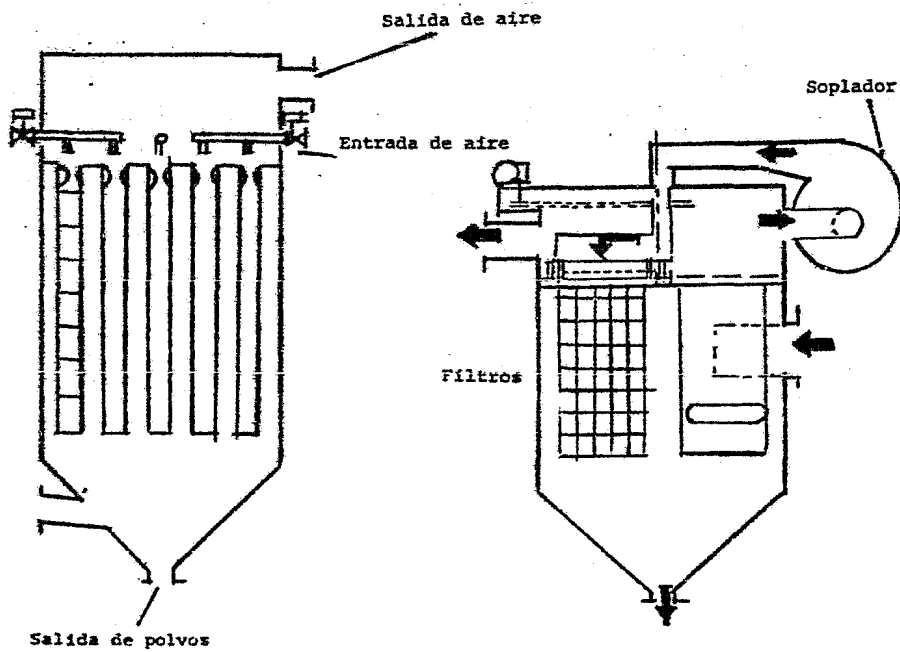


Fig. 17 FILTRO COLECTOR
(LIMPIADO POR AIRE)

efectuarse directamente a tanques de proceso o almacenamiento sin la necesidad de separadores previos.

Estos tanques deberán tener venteos ya sea a la atmósfera directamente, en el caso de materiales no polvosos; o a filtros de polvos colocados en la parte superior de dichos tanques.

2.2.4. Almacenadores.

Son los depósitos en los cuales el material es almacenado, ya sea antes de ser transportado, o después. De este elemento el material pasa a un alimentador rotatorio, se mezcla con el aire y es transportado de la manera explicada en incisos anteriores.

Antes de seleccionar una tolva almacenadora, deberá considerarse todos los factores de almacenamiento y características del material, que podrían afectar sus propiedades de fluidización tales como: absorción de humedad, cambios de volumen de partículas debido a acciones químicas, compresión del material almacenado, efecto de vibraciones externas, efectos de cambio de temperatura y humedad. La información de los factores antes mencionados puede ser obtenida por experiencia previa, en el manejo del material en receptores pequeños, o de otras industrias que hayan manejado el material en gran volumen.

Existen varios factores que afectan la fluidización del material cuando este es descargado a la línea de transporte: la presión lateral del material en las paredes laterales del depósito, el coeficiente de fricción de las

partículas entre sí, o contra las paredes, la relación de presión vertical a presión lateral, y la fuerza de corte del material compactado. Todos los anteriores factores deberán ser obtenidos por medio de experimentos de la corriente de masa en el depósito.

Sin embargo, a pesar de la variedad de factores que afectan el uso de las tolvas, las experiencias anteriores han servido para estandarizar el uso de almacenadores, con modificaciones necesarias en las tolvas (Ver Fig. 18).

Los almacenadores más comunmente usado en sistemas de transportación neumática, son los de forma cilíndrica, con una tolva cónica, usando salidas de descarga por gravedad.

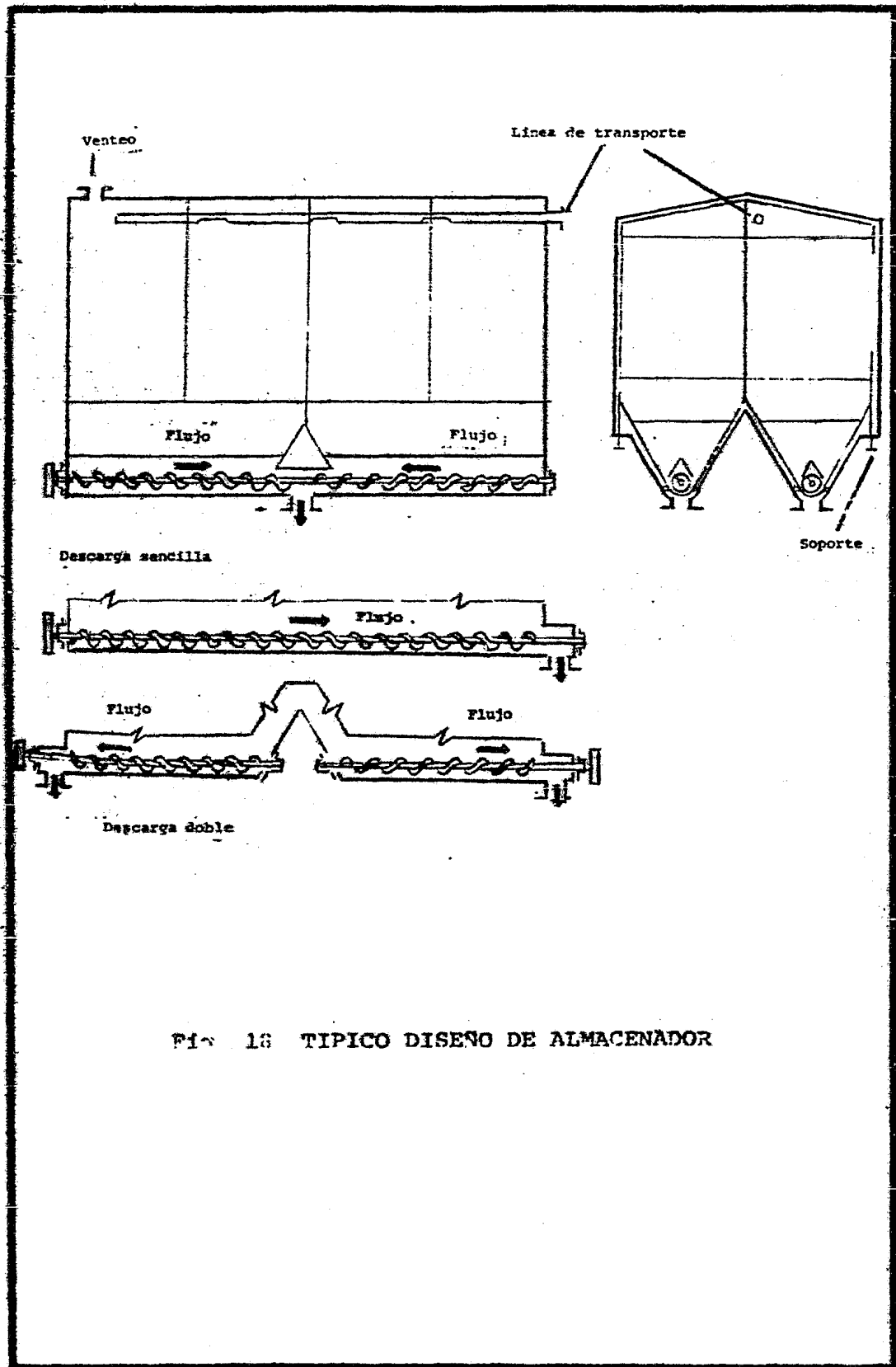


FIG. 16 TÍPICO DISEÑO DE ALMACENADOR

2.2.5. Tubería de transporte

Para la mayoría de los materiales la tubería que se usa en transporte neumático es de acero standard: para diámetro de 2 a 7 in. cédula 40; para diámetros de 8 a 12 in. cédula 30. Los ductos de 14 pulgadas o más son de acero soldado con un espesor de pared de 1/16 a 3/16 de pulgada, dependiendo del material transportado. Para plásticos y otros materiales que requieran de un transporte libre de contaminación puede usarse tubería de aluminio o de acero inoxidable con medidas comerciales, pero con espesores de pared de cédula 5 y 10

Cuando se requieran cambios de dirección en las líneas de transporte, deben efectuarse empleando curvas de radios grandes. Algunos autores recomiendan usar radios de 6 a 12 veces mayores que el diámetro de la línea, dependiendo del material transportado.

El doblado de los tubos se puede efectuar en frío o en caliente. Para materiales no abrasivos puede utilizarse tubería sin refuerzos. En el transporte de materiales medianamente abrasivos se usan refuerzos, que consisten en una delgada capa de acero colocada en la superficie exterior

del tubo en el área de curvatura, soldada a dicho ducto o agrupada por medio de pernos en U. Otro método de refuerzo en las áreas de curvatura, consiste en unir al ducto la placa de refuerzo por medio de fundición segmentada, sólo que en este caso, se requiere que el doblado se efectúe en caliente. Para materiales muy abrasivos se utilizan como refuerzos, placas de acero soldadas en sus extremos a la parte posterior del segmento de curvatura formando una caja de desgaste, que puede ser hueca o llena con concreto resistente a la abrasión.

En el manejo de granos para evitar que estos se rompan y desgajen, lo cual ocurre debido a que su abrasividad causa gran desgaste (en forma de canales a los codos de los ductos circulares) se utilizan en los respaldos de las curvas placas de acero de sección rectangular que son renovados cada vez que se requiera.

Acoplamiento de tubería.

Las juntas usadas en la unión de ductos de la línea de transporte deben ser herméticas y sin espacios entre uno y otro ducto, las más frecuentes son : uniones por bridas,

soldadura o usando coples. Las juntas por soldadura pueden ser por medio de cubre juntas o a tope, evitando que entre soldadura al interior del tubo. Los tipos de coples más frecuentes, son del tipo de sobre presión.

2.2.6. Válvulas divergentes.

Las válvulas divergentes de flujo, se usan para desviar el flujo de transporte de un ducto a 2 o más ductos o de dos o más ductos a uno solo. Lo primero ocurre principalmente en sistemas presurizados y lo segundo ocurre principalmente en sistemas de vacío. En sistemas de presión las válvulas deben ser herméticas a fin de que no haya fugas que contaminen la atmósfera. En sistemas de vacío las fugas son internas, lo que aumenta la cantidad de aire manejada por la bomba de vacío arriba de la necesaria para el transporte.

Los tipos de válvulas mas frecuentes son:

Válvulas de tapón rotatorio (Ver Fig. 19) (Rotating Plug).

Se usa para aplicaciones donde no se requieran fugas ni de aire, ni de polvos. Consta de una caja y un tapón giratorio. La caja puede ser de hierro fundido, acero inoxidable o aluminio. El tapón tiene un agujero cilíndrico que se alinea con cualquiera de los puntos de descarga de la caja. Aunque los puntos de descarga están normalmente puestos a 30° uno del otro, el tapón debe girar 150° para ir de una posición a otra. Para prevenir la entrada de material entre

los claros del tapón y la caja, se inyecta aire a través de las terminales de la válvula.

La válvula se mueve, por medio de un pistón neumático montado sobre una flecha, se necesita una planta de aire de 80 a 100 psig.

Válvulas de aleta (Flap Gate).

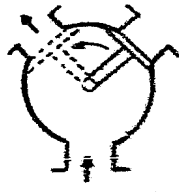
Es una válvula más económica que la anterior y consiste de una aleta pivoteada en una punta, de tal manera, que puede dirigir el flujo a la salida adecuada. Esta paleta se ajusta con un material de empaque reemplazable para formar un sello entre la aleta y la caja de la válvula. Los materiales empleados en su construcción son los mismos que para la válvula anterior.

Estas válvulas son apropiadas para el transporte de una a dos líneas. Debido a su construcción no deben usarse en sistemas de vacío, pues el sello de la aleta se desgastaría rápidamente. Pueden operarse por medio de un pistón neumático o manualmente por medio de una palanca.

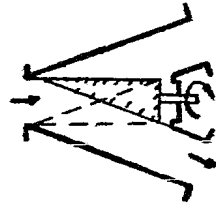
Válvulas de asiento esférico. (Spherical Sedt).



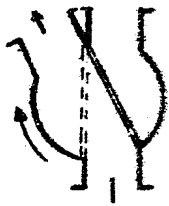
Tipo rotor



Asiento esférico



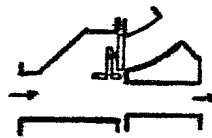
Tapon rotatorio



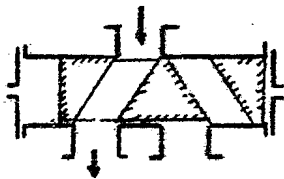
Válvula giratoria



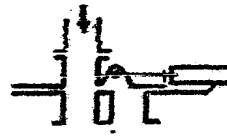
Válvula de trampa



Válvula oscilante



Tipo piston



Válvula corrediza

Fig. 19 VALVULAS DIVERGENTES

Consiste de una caja con varias salidas que se sellan por medio de pistones neumáticos, utilizando un distribuidor retractable de operación automática para canalizar el flujo a la línea deseada.

Existen otros interruptores de flujo más económicos, como son los desviadores de tipo manguera, que son de gran utilidad cuando se tienen que conectar alternadamente muchas líneas de transporte.

La selección de la válvula depende esencialmente, del material a transportarse y de la inversión disponible. Así por ejemplo la válvula tipo aleta se usa para sólidos finos, la válvula de asiento esférico, se usa para materiales abrasivos.

Válvula de compuerta.

Generalmente son utilizadas como llave de descarga en filtros-recibidores, recolectores ciclónicos en sistemas de vacío y como alimentador en sistemas presurizados. En ambas aplicaciones, es más un sello de aire que un alimentador, se usa para manejar materiales a alta temperatura abrasivos o aquellos con tendencia a crear formaciones en el interior de alimentadores rotatorios.

Las válvulas de compuertas más frecuentes son las de 3 compartimientos, la cual consiste de 2 compuertas, dos de las cuales son herméticas. La compuerta superior se utiliza como interruptor del flujo del material dentro de la válvula. No puede mantenerse un flujo continuo del material a través de la válvula, pues cada compuerta tiene la función de sellar el compartimiento. La operación de la válvula es como sigue: se abre una compuerta y una carga de material cae al compartimiento siguiente; y, para mantener el vacío o la presión, según el sistema que se tenga, las compuertas herméticas - la central y la inferior- deben abrirse alternadamente de tal manera que cuando una esté abierta, la otra esté cerrada.

Para que esta válvula opere en forma continúa hay que efectuarle una adaptación consistente en anexar a su parte superior un alimentador de medición y una pequeña tolva de compensación. No puede de ninguna manera usarse directamente debajo de una tolva o un tanque cuyo volumen sea mayor que el volumen disponible en cada compartimiento.

La apertura de las compuertas puede realizarse por gravedad, en la cual la fuerza necesaria para abrir la dá el propio paso del material, teniendo una diferencia máxima

de presión de 5 in. de agua, o por medio de un motor, abriendo y cerrando alternativamente y dependiendo de la velocidad de este, con diferencias de presión hasta de 20 m. de agua, o bien por medio de cilindros neumáticos que actúan individualmente con cada compuerta con diferencias de presión de 3 a 6 m de agua.

2.3. Ventajas y desventajas.

Ventajas.

Los sistemas neumáticos para manejo de sólidos a granel presentan las siguientes ventajas:

Ahorros debidos a la diferencia de precios, entre el material comprado a granel y el material comprado en sacos o bolsas. Resultantes en la eliminación de costos de empaquetamientos.

Ahorros en los fletes, debido a las reducidas tarifas que se aplican en el manejo de material a granel.

Ahorros debidos a la reducción de costos de mano de obra por manejo y almacenamiento de bolsas y pequeños envases.

Reducción de pérdidas de material, por rasgaduras en el saco y derrames residuales en la descarga de bolsas y envases o material (que se cae de las bandas).

Almacenamiento de materiales a granel en tanques y silos

de gran capacidad, en áreas de la planta que resultarían insuficientes para almacenamiento de materiales empapados.

Incremento: de la seguridad de la planta debido a la eliminación de manejo manual de bolsas o envases y debido también a la eliminación de polvos que se originan al abrir y descargar dichos empaques y bolsas.

Reducción de la contaminación del producto, debido a que el transporte se efectúa en sistemas cerrados.

Reducción de la contaminación ambiental debido a las uniones herméticas en los equipos de transporte.

Ahorros debidos a la eliminación de puntos de transferencia, requeridos en otros sistemas, cuando las trayectorias de transporte no son rectas.

Ahorros en el movimiento de la limpieza de la planta, debido a que los sistemas neumáticos, por ser herméticos en sus juntas, eliminan las condiciones de polvo; y

Reducción de riesgos de fuego y explosión en el manejo de materiales combustibles.

Desventajas.

Las desventajas más importantes que presentan estos sistemas, en comparación con otros sistemas de transporte son las siguientes :

Las características que debe tener el material a ser transportado son: ser de flujo relativamente libre y estar secos. Lo anterior reduce el número de materiales susceptibles de ser transportados por medios neumáticos.

Inversiones mayores que para otros transportadores de capacidad similar.

Altos requisitos de potencia, lo cual implica, aumento en los costos.

Los cambios de dirección deben efectuarse con radios lo suficientemente grandes para evitar reducciones sensibles en la capacidad de transporte.

2.4. Aplicaciones y utilización en México.

Como se verá el campo posible de aplicaciones de los sistemas de transportación neumática, es bastante extenso, sobre todo en industrias, las cuales requieren de sistemas prácticos y eficaces para transportar materiales a granel. O en industrias donde se necesite llevar material de una parte de un proceso a otro. Los sistemas de transporte neumático encuentran su mayor uso, en la industria química debido a la gran necesidad de transportar grandes volúmenes de material en forma de polvos o granulares, rápidamente, sin contaminación, sin pérdidas de material y controlando la cantidad de material requerido.

A continuación se describen algunas de las aplicaciones más comunes en la industria de nuestro país.

INDUSTRIA DEL CEMENTO.

En las plantas de Cemento se encuentran muchas aplicaciones de transporte neumático para el manejo de material entre los diferentes pasos del proceso que se sigue para su elaboración.

En la fase inicial de la elaboración del cemento no se puede usar la transportación neumática debido a las dimensiones del material, este es transportador por otros medios como bandas transportadoras. De ahí es llevado a las quebradoras y posteriormente a los crudos. La primera aplicación del transporte neumático se tiene en la descarga de los remolinos y consiste en un transportador de aire activado, que es ideal en la transportación horizontal, de la descarga de los molinos hasta los elevadores de cangilones, que liberan el material que dividirá los sólidos en finos y grandes.

El material fino en estas condiciones ya puede iniciar su proceso de transformación y para esto puede ser transportado mediante una bomba de flujo de sólidos, ya sea directamente al tanque alimentador del horno, o inicialmente a silos de mezclado, si es que se requiere de un mezclado adicional de los materiales crudos para una adecuada mezcla de combustión. En caso de usarse silos de mezclado, la descarga de ellos al tanque alimentador del horno, podrá efectuarse por medio de una bomba de flujo de sólidos o por un transportador de aire activado dependiendo de la distancia a transportar. Después que los crudos pasan

por el precalentador, son quemados en el horno rotatorio, y descargado como cemento clinker. El clinker es enfriado por medio de aire posteriormente se pasa a un quebrador y finalmente a los molinos de terminado. Entre la descarga del quebrador y la entrada a los molinos de terminado clincker no tienen características adecuadas para ser transportado neumáticamente, debido a las propiedades del material, por lo cual es transportado por otros tipos de transportadores.

De la descarga de los molinos determinado se usan transportadores de aire activado para llevar el cemento a una bomba de flujo de sólidos y de allí a los silos de almacenamiento, donde se almacena el producto terminado para su posterior distribución ya sea por carros, ferrocarriles o barcos (transporte a granel) o su liberación a áreas de empaquetamiento unitario.

Para cargar carros tolva, se usan transportadores de aire activado o para transportar el cemento desde la salida de los silos hasta la báscula que pesa el material liberado. Para cargar carros de ferrocarril se utiliza el mismo sistema si el furgón queda lo suficientemente cerca de los

silos, si no es así, se usan transportadores de aire activado con eslabones extensibles. Para cargar barcos se usan transportadores de aire activado, bombas de flujo de sólidos a una combinación de ambos.

Como se puede observar, la tranportación neumática se usa ampliamente en la elaboración del cemento, permitiendo una gran flexibilidad en el diseño de la planta. Eliminan atmosferas polvosas, reducen los costos de mantenimiento y hacen de la planta un lugar de trabajo muy seguro. La alternativa sería una masa de transportadores de gusano, elevadores de cangilones y posiblemente de bandas los cuales requerirían costos de mantenimiento mucho más altos y probablemente un costo global de producción también más alto.

En algunas plantas de cemento los procesos de mezcla y combustión se controlan por computadora y se requieren de continuos muestreos para ser analizados. Para traer las muestras del tanque alimentador del horno, y de los molinos de cilindros de crudos el laboratorio se utilizan pequeños transportadores neumáticos del tipo vacío-presión para liberar el material, sin recolección manual. Esto permite a los operadores del laboratorio conocer todo el tiempo

la calidad del mezclado.

TRANSPORTE DE POLIMEROS GRANULARES.

En la industria de los plásticos se ha encontrado gran aplicación de la transportación neumática debido al tipo de material y los procesos que se realizan para la elaboración. En 1930 se utilizaron los primeros transportadores neumáticos, para el manejo de resinas fenólicas y madera en polvo que eran empleados en la fabricación de diferentes componentes para radios, teléfonos, aisladores eléctricos, etc.

Al desarrollarse otros materiales plásticos como resinas vinílicas, acetatos de celulosas, nylon, etc.; incrementarse su moldeo y extrusión hasta un punto en que era conveniente su manejo a granel, se utilizaron para ello los transportadores neumáticos.

En el diseño de la Transportación Neumática para plásticos

se debe tener cuidado con la temperatura del medio de transporte por lo siguiente:

Los plásticos se dividen en 2 categorías: termo-plásticos y termo-fijos. Los primeros tienen la propiedad de fundirse con la aplicación de calor, por lo cual se requiere que la temperatura del medio de transporte se mantenga abajo de la temperatura de distorsión del material de transporte. Los termo fijos tienen la propiedad de permanecer rígidos con la aplicación de calor, por lo que en este caso la temperatura del medio de transporte no constituye un punto tan crítico.

Los sistemas usados en transporte de plásticos incluyen: vacío, baja presión y tanques de inyección con requisitos de aire o baja presión. Por ningún motivo deben usarse bombas de flujo de sólidos pues el paso del gusano actuará el material, comprimiéndolo y generando calor, con la cual puede elevarse la temperatura hasta rebasar la temperatura del material transportado. El uso de sistemas de alta presión no es económico pues se requiere de sofisticados sistemas de enfriamiento.

Los ductos de transporte deben ser de aluminio o de acero

inoxidable a fin de evitar la contaminación del producto, la cual también debe evitarse filtrando el aire de transporte. En sistemas de vacío solo necesita filtrarse el aire en la entrada del sistema, pero en el de presión debe filtrarse en la entrada y la salida del soplador, pues así se protege el aire de transporte de contaminaciones ocasionadas por herrumbre u otras partículas que pudieran desprenderse del soplador.

Uno de los problemas mas comunes en el transporte neumático de polímeros granulares es la formación de una película, particularmente cuando las distancias de transporte son grandes, conocida con diferentes nombres: piel de víbora, pelo de angel, cintillas, etc. Estos términos describen al material que se desprende de las paredes del ducto de transporte y que se mezcla con el producto manejado. Estas películas se observan en sistemas en que se transporta polietileno. En el manejo de poliestireno se tienen formaciones de arroyos. En el manejo de propileno no se han observado formaciones de películas.

Se han efectuado muchas pruebas con el propósito de observar las causas y encontrar las soluciones a estas formaciones

de películas. Para ello se han construido dispositivos o sistemas, como la construcción de sistemas de vidrio, con lo cual se puede detectar directamente, la formación de películas.

De los estudios realizados se ha llegado a conclusiones como, que la formación de película en la tubería está en función de la velocidad del material y la fricción del mismo contra las paredes.

Para el manejo de materiales de alta densidad, la solución mas práctica parece ser el control de la velocidad, sin embargo hay algunos polietilenos de baja densidad que producen formaciones de películas, aunque se usen las más bajas velocidades de transporte permisibles.

En el manejo de poliestireno se tienen formaciones de películas que representan problemas, únicamente cuando se manejan en un mismo sistema materiales de distinto color. Debido a que se contamina un color con otro por los residuos en la tubería. Lo recomendable en estos casos es usar diferentes líneas de transporte para materiales de diferente color.

No obstante los anteriores problemas, los transportadores neumáticos se han desarrollado en la industria de los plásticos en forma paralela al rápido crecimiento de la producción y uso de los polímeros.

INDUSTRIA ALIMENTICIA.

Una de las ventajas más importantes que se tienen con el uso de transportadores neumáticos en la industria alimenticia, es el alto grado de calidad sanitaria con que pueden manejarse los diferentes materiales.

Los molinos de alimentos reciben granos (maiz, sorgo, avena, grano, almidón, etc.) y los procesan en fórmulas alimenticias para ganado, aves de corral y otros animales.

En estos molinos, se usan los transportadores neumáticos tanto en operaciones de descarga, como de transferencia; y dependiendo del material a transportar, se utilizan otros transportadores ocasionando gran reducción en las pérdidas por manejo de material. Cuando la descarga de los ingredientes alimenticias a granel se realiza con una pala mecánica, se tienen pérdidas del 1% al 2%, lo que puede

significar pérdidas sustanciales si se tiene en cuenta que en el costo total de la fórmula alimenticia comercial, los ingredientes representan un porcentaje que oscila entre el 65% y 75%.

En molinos grandes con producciones de 100 ó más toneladas diarias, es común el uso de diversos sistemas de transporte. Cuando las entregas de material se hacen simultáneamente en varios carros de ferrocarril con el propósito de detener tarifas reducidas de transporte, los granos son descargados en una fosa que tiene un transportador de gusano, pasándolo a un transportador de cangilones que lo distribuirá a silos adyacentes. Pero si los silos quedan retirados de la fosa de descarga se utiliza un transportador neumático de vacío de alta capacidad, conectando una boquilla estacionaria en dicha fosa.

La mayoría de los métodos de descarga en la industria alimenticia se hacen a vacío, por la flexibilidad que presentan para liberar material de cualquier tipo de transporte. Para un mismo sistema las capacidades de transporte, son diferentes para cada tipo de material, teniéndose en cuenta las mas bajas cuando se manejan productos de baja densidad como la cebada, la harina de avena, leche en polvo, etc.

Cuando se manejan granos blandos, como las anteriores, el flujo del cono del filtro-recibidor a la llave de descarga rotatoria se ve impedido por la acción del vacío. Lo que ocurre es que el alimentador rotatorio, está sometido a la diferencia de presiones de vacío a presión atmosférica, esto ocasiona intermitencia en el filtro receptor, ocasionando, la disminución en la capacidad de transporte.

La capacidad de estos sistemas de vacío para la industria alimenticia, están basados principalmente en la humedad, cantidad de aceite y del tamaño de la partícula del material.

Todos los componentes alimenticios de grano blando son higroscópicos aun durante el transporte absorben humedad, ocasionando que el material no fluya libremente. El contenido de aceite ocasiona el mismo problema, cuanto mas aceite contenga el grano blando, menor será su capacidad de transporte.

El tamaño de partícula se puede clasificar en extrafino, fino y granular. Los granulares son buenos para la transportación neumático, dependiendo solamente de la dureza del grano, (este grano puede ser formado después de un

proceso especial en forma de "pellets" o por simple naturaleza del material. Para que el material pellets, no sufra roturas, se manejan a baja velocidades, en el rango de 4000 a 5000 ft/min. ya sea en vacío o a baja presión.

También es importante mantener las cargas mas altas en la tubería, para que el material no tenga movimientos irregulares dentro de ella.

La tubería debe diseñarse con el mínimo de curvas y las terminales de cada ducto deben ser completamente lisas a fin de que sus uniones a tope cuadren perfectamente. También se recomienda que al final de la tubería, la pastilla disminuya su velocidad, para que no entre a alta velocidad al filtro o a la tolva y se rompan normalmente se pone una tubería cónica, entre el filtro receptor o la tolva, ya sea en vacío o en baja presión.

Al final del sistema, cuando el material es descargado a los silos, debe reducirse lo mas posible la altura, para evitar las caídas altas de material y que se rompan los pellets. Lo cual puede solucionarse utilizando un canal en zig-zag o en espiral.

INDUSTRIA CERVECERA.

La elaboración de un barril de cerveza (31 galones) requiere de 34 lbs. de malta y 1916 de maíz molido, por lo que una cervecería con una producción de 100,000 barriles anuales, usará unas 1,545 Ton de malta y 87,090 Ton de maíz. El manejo de esta cantidad de materiales ya es conveniente el uso de una transportación neumática, tanto en la operación de descarga como en la de transferencia.

Para sus operaciones de descarga, las cervecerías de poca producción usan generalmente sistemas de vacío de 4" a 6" de diámetro de transporte con capacidades de 5000 a 1000 ft³/Hr. Las cervecerías grandes requieren de sistemas de 6" a 8" de diámetro de transporte con capacidades de 1000 a 2500 ft³/Hr. para satisfacer sus necesidades. Si se requieren mayores capacidades, lo mejor es usar 2 sistemas. Las distancias de transporte pueden llegar a ser hasta de 1350 ft.

La objeción mas común que se hace a estos sistemas de vacío, es su facilidad para dañar la malta durante el tránsito en la línea de transporte; sin embargo, esto

sólo ocurre cuando no se toman las precauciones debidas.

Las recomendaciones que hay que considerar son las siguientes:

- a) Mantener una velocidad mínima de transporte. En sistemas de vacío la velocidad final será mayor que la de entrada, debido a esto al final de la tubería la misma se incrementará poco a poco, para reducir la velocidad de descarga.
- b) Usar una relación de aire-material lo mas denso posible (mínima cantidad de aire por cada lb. de material).
- c) Localizar adecuadamente y minimizar el número de secciones curvas en la línea de transporte. También se recomienda que en los cambios de dirección, se usen siempre que sea posible ductos de sección rectangular para evitar el desgaste y la formación de canales en las paredes internas de ducto. Las secciones rectangulares de los codos deben ser placas renovables del metal mas resistente a la abrasión. La transición de la sección circular a la sección rectangular y viceversa debe de ser suave, para evitar

turbulencias en el interior del ducto.

Cuando se usan válvulas divergentes deben tener cambios de dirección gradual. De no ser así, la malta chocará con las paredes del ducto y se pulverizará.

d) Evitar el uso de un solo soplador, cuando se emplee un sistema combinado presión-vacío. Cuando el transporte de la malta se efectúa en un sistema combinado es conveniente separar las trayectorias de vacío y presión en unidades completamente independientes, esto es, utilizar una bomba de vacío para el sistema de vacío y un soplador para el sistema de presión. Si se usa un soplador para activar ambas terminales del sistema, las variaciones en la cantidad de aire libre manejando por la trayectoria de vacío, debido a las cargas desiguales en el sistema, se reflejarán en la trayectoria de presión en velocidades mucho más altas que las necesarias. Estas velocidades deben evitarse.

e) Usar alimentadores apropiados cuando se libera material de tanques de almacenamiento. En la recuperación

de la malta de los silos de almacenamiento no deben utilizarse alimentadores rotatorios pues se introducirán los granos entre las aspas del rotor y el cuerpo de alimentador, quebrándose. Las pérdidas por este concepto son bajas, pero lo mejor es eliminarlas completamente, lo cual puede hacerse utilizando alimentadores rotatorios unidos a las boquillas reguladoras de flujo. Cuando el material que va a liberarse de los silos es el maíz si pueden utilizarse alimentadores rotatorios.

Cuando se tienen sistemas presurizados si deben utilizarse alimentadores rotatorios para la descarga de la malta de los silos de almacenamiento, pero únicamente como sello de aire. La capacidad volumétrica del alimentador debe de ser por lo menos 1.5 veces mayor que la capacidad de transporte, para evitar la formación de material en la parte superior de dicho alimentador rotatorio para evitar sobrecargas en el sistema presurizado y también para reducir la entrada y rotura de granos de malta en los claros del rotor y el cuerpo del alimentador.

Los transportadores neumáticos se usan en la industria Cervecería principalmente, para la descarga de malta, maíz y

en ocasiones arroz de carros de ferrocarril, para liberarlo en tanques de almacenamiento. Se utilizan también en la descarga de los silos de almacenamiento a las tolvas pesadoras, que son las que liberan el material al proceso de elaboración.

No obstante que normalmente se transportan dos materiales diferentes y en ocasiones tres a través de la misma tubería, la contaminación entre ellos es mínima. Para evitar que los materiales se mezclen es conveniente una vez que ha terminado el transporte del material, dejar operar libremente el sistema unos 30 segundos para que se limpien los ductos.

C A P I T U L O I I I

FLUIDIZACION

- 3.1 Introducción
- 3.2 Sistemas fase diluída
 - 3.2.1 Características de flujo en transporte horizontal
 - 3.2.1 Propiedades de flujo de sólidos
- 3.3 Sistemas fase densa
- 3.4 Características de flujo en transporte vertical
- 3.5 Potencia necesaria para la mezcla sólido-gas
- 3.6 Lechos fluidizados

3.1 INTRODUCCION.

Debemos entender por fluidización, al estudio de los fenómenos físicos que se presentan cuando un grupo de partículas son transportadas por medio de una corriente de gas dentro de una tubería, o cuando simplemente se aplica una corriente ascendente de gas a un lecho de partículas las cuales están depositadas sobre una zona, a través de la cual pasa la corriente, ocasionando un flujo ascendente de las mismas.

Por lo anterior se entiende que el hecho de fluidizar una partícula o un grupo de éstas, consiste en crear un flujo, de una mezcla aire-material por medio de una corriente de aire.

Las principales aplicaciones de este método, son generalmente en el transporte a granel de materiales como se enuncia en esta Tesis, o las aplicaciones en diferentes procesos químicos de los lechos fluidizados, los cuales se detallarán posteriormente.

Estos últimos pueden ser usados en transportación neumática como alimentadores.

Como es de comprenderse, se presentan en la fluidización un gran número de fenómenos, dependiendo estos de muchos factores como el tipo de material, diámetro de las partículas, forma de las mismas, velocidad del gas acarreador, peso de partícula, etc. Por lo tanto se enunciarán aquí los principales fenómenos que afectan un diseño en un sistema de transporte neumático, y a la vez se establecerán un grupo de ecuaciones, todas estas obtenidas por diferentes autores empíricamente y en base a experimentos realizados por los mismos, con distintos materiales.

Es evidente que para cada tipo de material se tendrán diferentes comportamientos, en algunos casos se compararán estos con el comportamiento ideal.

En la fluidización existen dos grandes sistemas los cuales serán estudiados por separado, el sistema fase diluida y el sistema fase densa.

En el sistema fase diluida las partículas son transportadas en la línea uniformemente dispersas, mientras que en la fase densa las partículas viajan en forma compacta formando grupos uniformes.

3.2. Sistemas Fase diluída.

Uno de los primeros experimentos que se realizaron con este sistema, fue en el año de 1940 en la Universidad West Virginia, se desarrolló un alimentador de Lecho fluidizado, el cual era capaz de manejar un flujo con alta densidad de carbón.

El experimento consistía en una línea por medio de la cual una pequeña porción de carbón fluidizado, era transportado a un reactor gasificador.

Las técnicas de alimentación fluidizadas fueron usadas subsecuentemente, para estudiar las características del flujo en la fase diluída. Estos estudios han mejorado enormemente los cálculos de caída de presión en líneas horizontales, velocidad del gas, velocidad de sólidos, diámetro de tubería relación sólido-gas, etc. y lo demostrado en la tabla 3.2

Los estudios sobre la mezcla sólido-gas, han sido numerosos. Siguiendo a las investigaciones de Gaster Staedt en 1924, fueron realizados distintos experimentos por diferentes autores, todos estos relacionados con caída de

TABLA 3.2

RESUMEN DE INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES
EN FASE DENSA PARA TRANSPORTE SOLIDO-GAS

Autor	Sólido	Diámetro partícula	Gas	Tubería		Flujo sólidos lb/hr	Flujo gas	Rel. sólido- gas.
				Diámetro, ft	Largo, ft			
Albright (1951)	Carbón	0.0029	Aire	0.025 0.0257 0.0363	0.58		100-1000 ft ³ /hr	125-236
Carney (1954)	Carbón	0.0029 0.0059 0.0025 0.0049	Aire	0.0158	7.35	18-178	20-50	4.4-87
Koble (1953)	Polvos de cerá- mica	0.0017 0.044 0.0240		0.0158 0.0208 0.0252	7.35	36-900	1.5-60 ft/seg	23-865
U.S Bureau of mines	Carbón		Aire	0.088 0.176 0.242	200	600-7700 2000-50000 3000-60000	20-530 16-1300 75-1300 lb/hr	4-160 7-175 5-230
Wen y Simons (1959)	Carbón	0.0297 0.0197 0.0044	Aire	0.0835 0.0625 0.0418	10	40-300	.50-50 ft/seg	50-850
	Vidrio en polvo	0.0110 0.0058 0.0028		0.03				
Zenz (1949)	Vidrio Arena	0.0231 0.022 0.0366 0.019	Aire	0.148	3.7	6.5-302 lb/hr ft ²	6.6-80 ft/seg	1.0-75
	Sal	0.006 0.00232 0.0042						

presión, fricción entre sólidos y gas, carga de sólidos, velocidades de partículas, velocidad de gas, etc., los principales son los estudios de Kunii y Levenspiel (1969) Lera (1959), Soo (1967) y Zenz y Othmer (1960).

Los principales estudios se han realizado en el campo del transporte neumático, manejando elementos como carbón, granos y químicos.

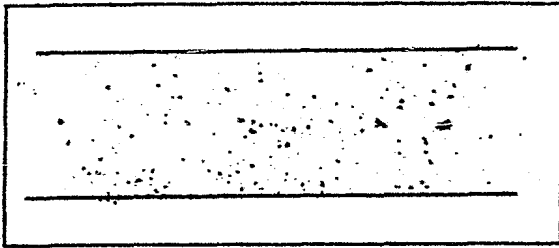
A continuación se enunciarán estudios sobre mecánica de fluidos y sobre las propiedades de la mezcla sólido-gas con el énfasis de que estos aspectos son muy importantes en la aplicación de la fluidización en la ingeniería. Aunque en la actualidad se han realizado numerosos estudios todos estos han sido basados en los mismos principios.

3.2.1 CARACTERISTICAS DE FLUJO EN TRANSPORTE HORIZONTAL.

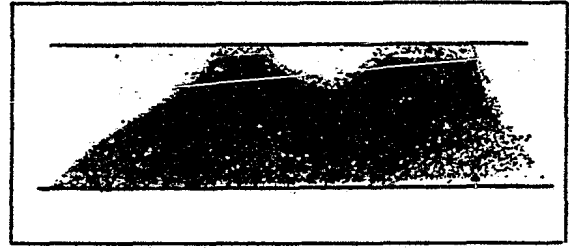
Patrones de flujo en tuberías.

La observación visual del comportamiento de la mezcla sólido-gas en tuberías, nos revela que los patrones de flujo son raros y complejos, siendo afectados estos principalmente por la relación sólido-gas. (Ver figura 21).

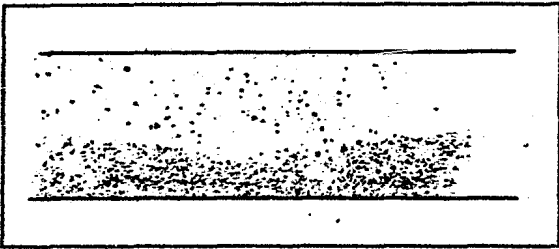
Fig. 21 PATRONES DE FLUJO EN TUBERIAS



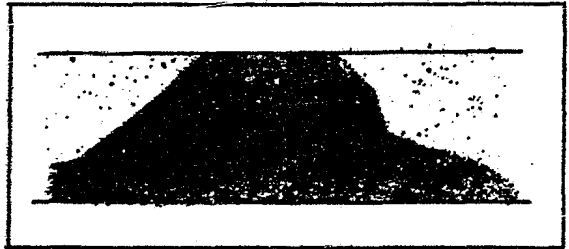
Flujo homogéneo



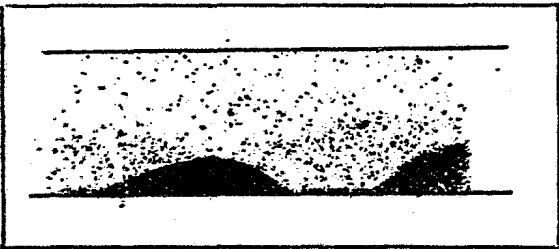
Flujo irregular incipiente



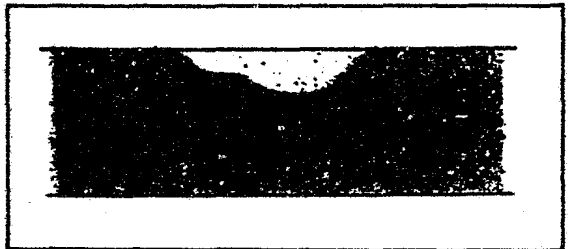
Flujo homogéneo degenerado



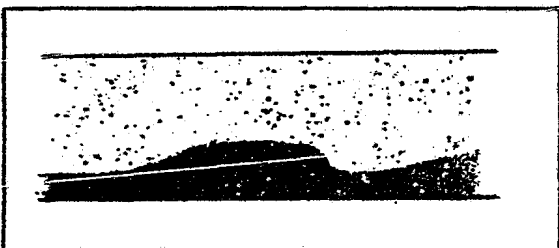
Flujo irregular



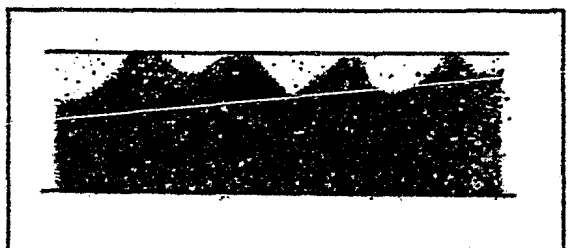
Flujo de ola incipiente



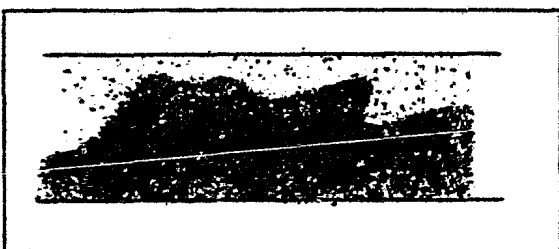
Flujo irregular degenerado



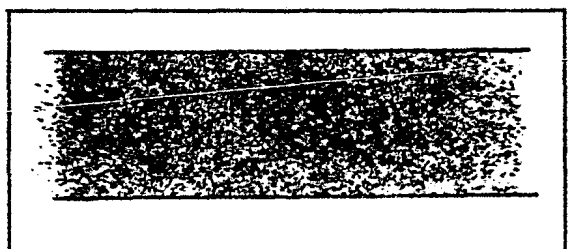
Flujo de ola



Flujo ondulado



Flujo de ola degenerado



Tubería llena

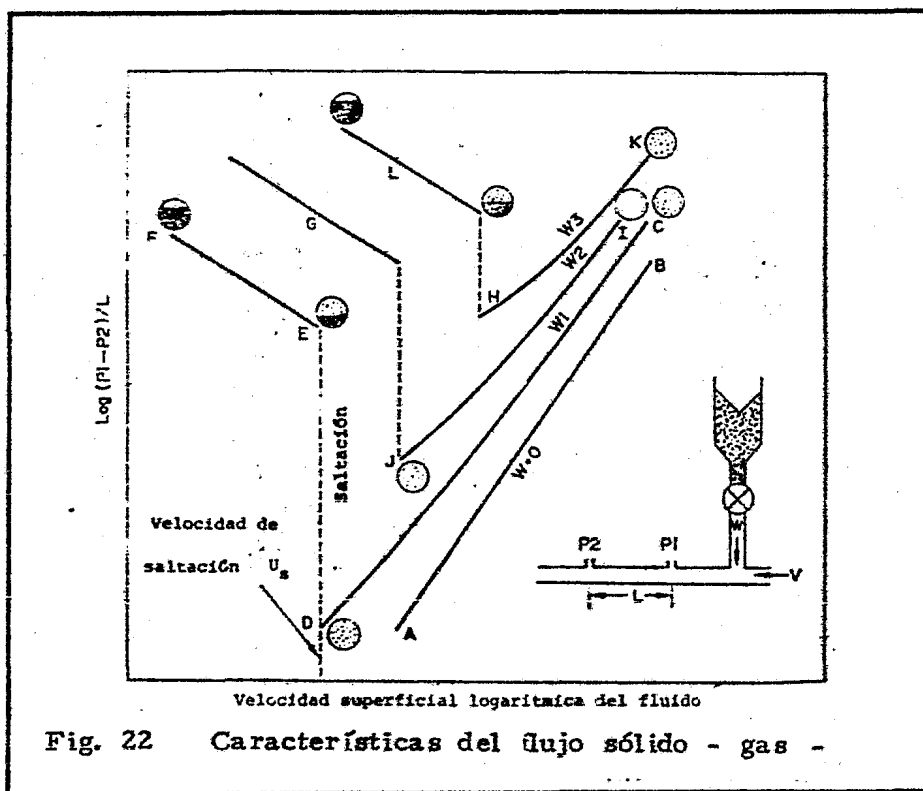
Como se muestra a relaciones bajas de aire-material existe un comportamiento uniforme, al aumentarse esta relación las partículas tienden a fijarse en el fondo de la tubería y encima de otras partículas, cuando la segregación de partículas llega a cierta extensión los sólidos se mueven de una duna a la siguiente. Si se continúa aumentando la relación sólido-gas, puede resultar un flujo lento, con carácter de intermitente.

Con altas relaciones, obviamente se llena gran parte de la tubería, en estos casos con alta carga en el fluido, existe un flujo en forma de ola.

La carga de sólidos en una región de ola puede llegar a ser hasta de $900 \frac{\text{lb sólido}}{\text{lb gas}}$, en estos casos el flujo es inestable, existiendo grandes fluctuaciones en la caída de presión.

Por lo anterior, las relaciones propuestas por varios investigadores, deben ser usadas con precaución para una región limitada, con determinadas condiciones de flujo y extendida a otra región con un cuidadoso análisis de las condiciones actuales de flujo.

Las características del flujo sólido-gas puede ser ilustrada más claramente por la representación esquemática presentada por Zenz, que nos muestra la caída de presión por unidad de longitud de tubería horizontal, a medida que la velocidad superficial del gas es cambiada.



W = Velocidad de masa de sólidos estacionarios.

AB Línea de caída de presión $W = 0$ para gas sólo en la tubería.

La caída de presión para distintos rangos W_1 , W_2 , W_3 mayores cada vez, muestra discontinuidad en los puntos D, J, H., respectivamente.

Estos puntos corresponden a diferentes relaciones sólido-gas y representan la capacidad de saturación de acarreo del gas.

A medida que la velocidad es disminuida hasta llegar al punto de saturación, el depósito de sólidos o la saltación ocurre y la caída de presión sube bruscamente.

Los puntos D, J, H., representan el comienzo del depósito de sólidos en la parte baja de la tubería y la velocidad del gas correspondiente a estos puntos es llamada Velocidad de saltación.

TRANSPORTE DE SOLIDOS EN FASE DILUIDA.

a) Distribución de velocidades flujo sólido-gas.

Usando el dispositivo de medición mostrado. (Ver figura 23).

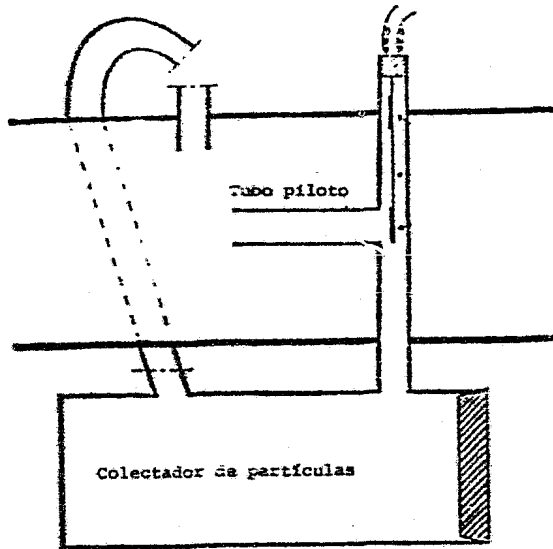
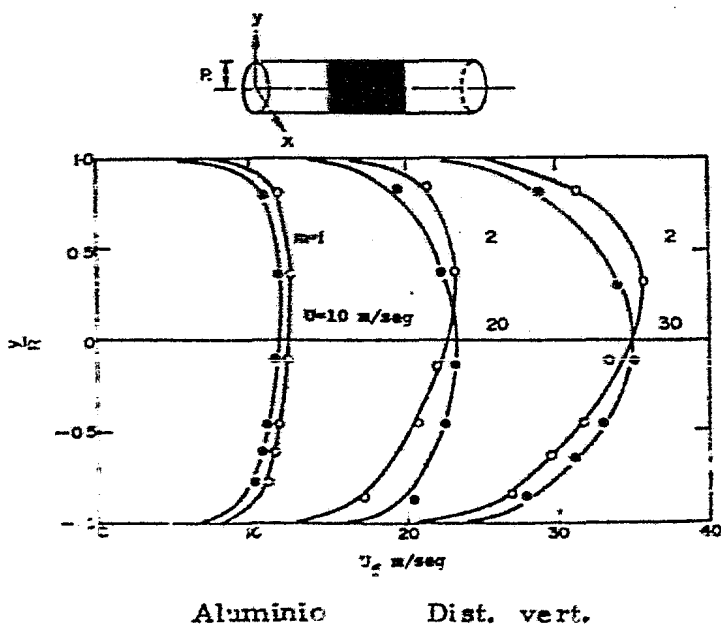


Fig. 23 Dispositivo de medición para distribución de velocidades

Coto y Tinoya (1964) obtuvieron la gráfica de distribución de velocidades para transporte horizontal.

Se muestran gráficas para tres materiales diferentes. (Ver figura 24).



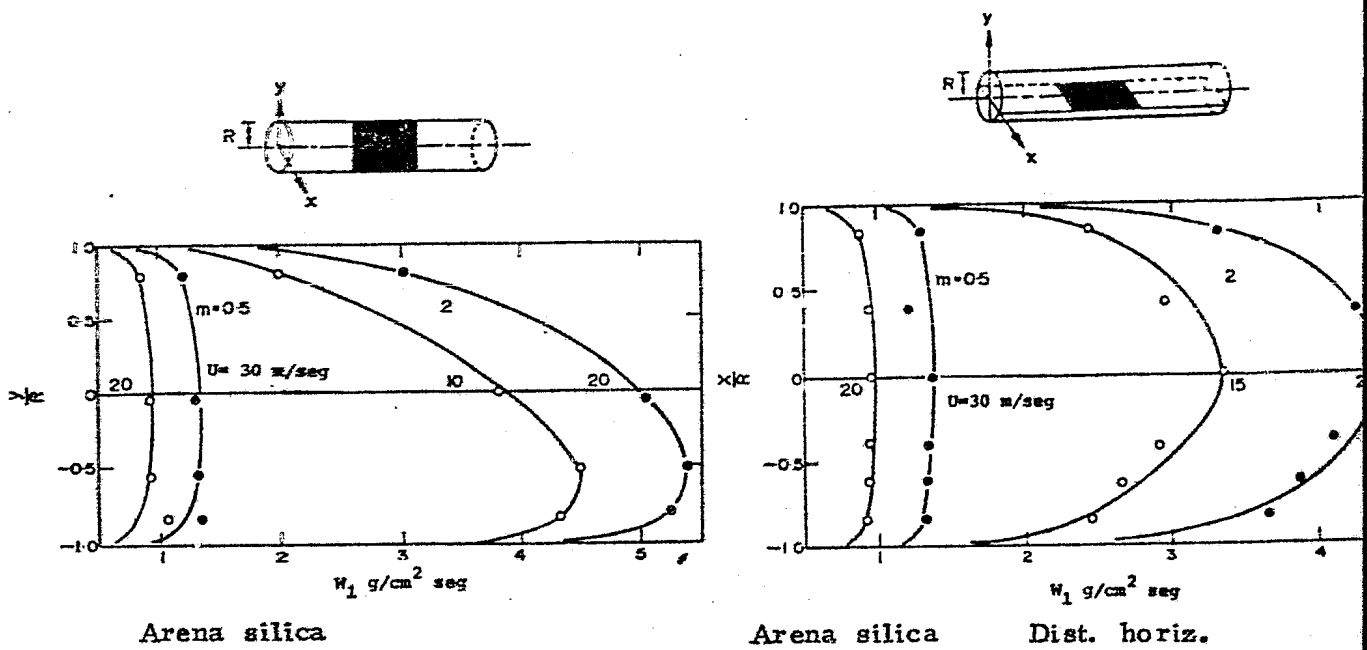


Fig. 24 Distribución de Velocidades

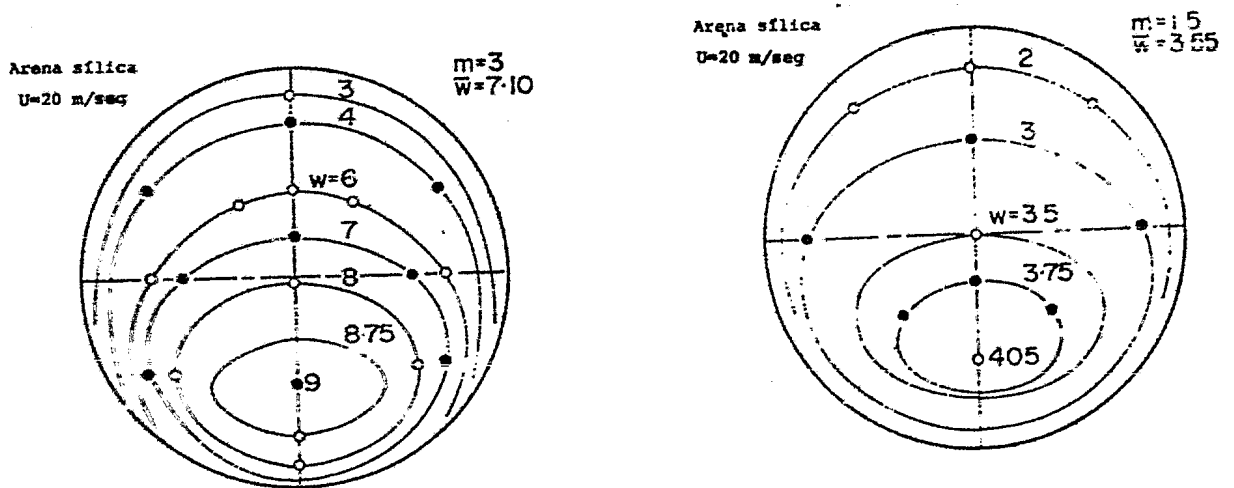


Fig. 25 Líneas de Velocidad de Sólidos

La figura anterior muestra velocidades de aire con y sin partículas de aluminio.

Los círculos o representan la velocidad del aire y los círculos rellenos • velocidad del aire con partículas.

El símbolo m es la relación aire-sólido $\frac{\text{lb material}}{\text{lb aire}}$

en las figuras se ve que el perfil de velocidades es alterado por la relación gas-mat pero no por la velocidad del aire.

Las líneas de velocidad sólido, son mostradas enseguida. (Ver figura 25) La velocidad media de flujo por unidad de área fue encontrada igual que la velocidad del flujo en el centro de la tubería.

w es el promedio de velocidad de flujo ($g / \text{cm}^2\text{-seg}$)

b) FUERZA DE ARRASTRE Y CAIDA DE PRESION. (lineas horizontales).

En esta sección se trata de obtener una relación entre la velocidad de la partícula, la velocidad del gas y la caída de presión usando consideraciones de la fuerza de arrastre. Se usarán datos experimentales obtenidos de diferentes literaturas para verificar la validez de las ecuaciones desarrolladas:

1. FUERZA DE ARRASTRE EN LA PARTICULA.

Las fuerzas de arrastre que actuan en una partícula sencilla, en un tramo infinito han sido estudiadas detenidamente y pueden ser expresadas en términos del coeficiente de arrastre C_d

$$(3.1) \quad F_{ds} = c_d s (\pi d_p^2/4) \rho_f (u_f - u_p)^2 / (2g_c)$$

g_c = factor de conversión

Donde

$$C_{ds} = 24 \text{ NRe}^{-1} + 3.6 \text{ NRe}^{-0.133}$$

$$\text{para NRe} = d_p (U_f - U_p) \rho_f / \mu \quad 2000$$

NRe = # Reynolds U_f = Vel fluido ρ_f = Densid fluido

d_p = ϕ partícula U_p = " partícula μ = viscosidad.

La fórmula anterior, es válida para el cálculo de la fuerza de arrastre, en una partícula en unión con otras, siempre y cuando la concentración de partículas sea pequeña.

En general la fuerza de arrastre para una densidad relativa gas-sólido es grande y puede ser relacionada con la fracción de huecos de la mezcla.

$$(3.2) \quad F_d = C_d (\pi d_p^2 / 4) \rho_f (u_f + u_p)^2 / (zgc)$$

$$\text{donde } C_d = f(\epsilon) C_{ds} \approx C_{ds} \epsilon^{-4.7}$$

C_d = (coef. de arrastre sistema múltiple de partículas)

donde en general $\epsilon = 0.6 - 1.0$

C_d aumentará siempre que aumente la concentración de partículas. En este caso ambas velocidades (fluidos y partícula) son el promedio de las componentes horizontales de

velocidad. La fórmula anterior es aplicable para flujos homogéneos.

Si dG_s es el peso efectivo de partículas sólidas en una longitud dl . El número de partículas N en esta sección está dada por

$$(3.3) \quad \eta = \frac{dG_s}{(p_s - p_f) \pi d_p^3 / 6}$$

de este modo si dG_s es la velocidad de flujo de sólidos en lb/seg.

Tenemos

$$(3.4) \quad dG_s = G_s dl / u_p$$

$$(3.5) \quad \eta = \frac{G_s dl}{(p_s - p_f) \pi d_p^3 u_p}$$

La fracción de huecos ϵ es calculada para sección dl .

$$(3.6) \quad \epsilon = \frac{(\pi D^2 dl / 4) - (n \pi d_p^3 / 6)}{\pi D^2 dl / 4} = 1 - \frac{4 G_s}{(p_s - p_f) \pi D^2 u_p}$$

Para calcular la fuerza total de arrastre, se efectúa una suma de todas las fuerzas que actúan en cada partícula.

Por lo que basándose en las ecuaciones anteriores.

$$dF_d = \frac{C_d \pi d_p^2 \rho_f (u_f - u_p)^2 n}{2g_c}$$

$$(3.7) \quad dF_d = \frac{3}{4} C_d s \frac{G_s \rho_f (u_f - u_p)^2 dL}{(\rho_s - \rho_f) d_p u_p g_c} \left[1 - \frac{4G_s}{(\rho_s - \rho_f) \pi D^2 u_p} \right]^{-4.7}$$

La caída de presión causada por la fuerza de arrastre de la corrientes de gas en las partículas está dada por

$$\frac{dP_d}{dL} = \frac{dF_d/dL}{\pi D^2/4}$$

por lo tanto

$$(3.8) \quad \frac{dP_d}{dL} = \frac{3C_d s G_s \rho_f (u_f - u_p)^2}{(\rho_s - \rho_f) (d_p u_p \pi D^2 g_c)} \left[1 - \frac{4G_s}{(\rho_s - \rho_f) \pi D^2 u_p} \right]^{-4.7}$$

P_d = presión de descarga

Si sustituimos la relación gas-sólido $m = G_s \frac{\pi D^2}{4} U_p \rho_f$

$$(3.9) \quad \frac{dP_d}{dL} = 3 C_d s \left(\frac{\rho_f z^2}{(\rho_s - \rho_f)} \right) \cdot \frac{(u_f - u_p)^2}{d p g_c} \cdot m \left[1 - \frac{4 \rho_f m}{\rho_s - \rho_f} \right]$$

La caída de presión total bajo condiciones de flujo estable, es la suma de la caída de presión por la fuerza de arrastre en las partículas, y la caída de presión causada por la fricción del gas a lo largo de las paredes de la tubería.

$$(3.10) \quad \Delta P_T = \Delta P_d + \Delta P_f$$

La caída de presión por fricción puede ser calculada por el factor de fricción de Fanning basado en la velocidad de flujo correspondiente, sin transporte de partículas.

Los datos obtenidos experimentalmente por Richardson y McLeman (1960) son usados para probar esta ecuación, ellos midieron caída de presión, velocidad partícula y velocidad del gas en tubería horizontal (

En la figura 26 se muestran las caídas de presión calculadas basándose en las ecs (3.8) y (3.10), comparándose

éstas, con los datos obtenidos experimentalmente transportando carbón. La aproximación debe considerarse como buena en vista de las variaciones en la medición.

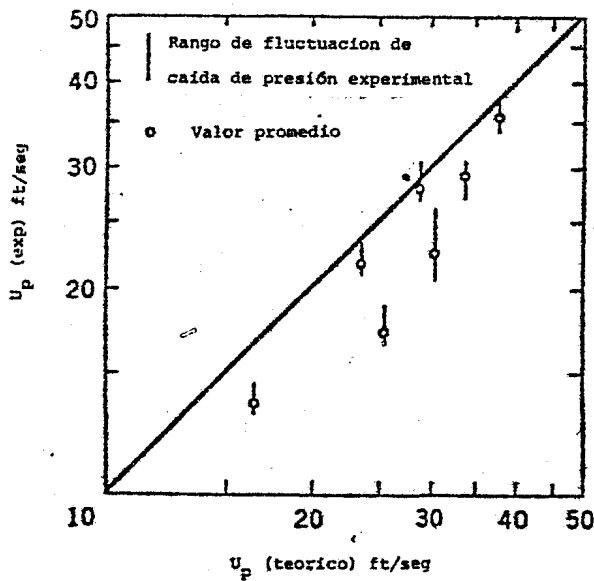


Figura 26.

Comparación entre ΔP_T Teórico ec. (3.8) y el calculado experimentalmente con (3.10)

Tubería de 1" y carbón con diámetro 0.02 in (Wen 1965).

c) FUERZA GRAVITACIONAL.

Si U_t es la velocidad libre de caída para un grupo de

partículas, las cuales tienen un promedio horizontal de velocidad U_p . Las partículas que viajan a través de la tubería una distancia dL , caerán una distancia vertical $u_t(dL/U_p)$ consecuentemente el gas debe levantar la caída de las partículas contra la fuerza gravitacional dF_g .

$$(3.11) \quad dF_g = u_t d G_s g / (U_p g_c)$$

La velocidad libre de caída para un grupo de partículas está expresada por la ecuación:

$$(3.12) \quad u_t = \sqrt{\frac{4}{3} g d_p \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{E^{4.7}}{C_{dsT}}}$$

C_{dsT} = coef. de arrastre para una parte sencilla donde:

$$C_{dsT} = 24 N Re^{-1} + 3.6 N Re^{-0.215} \quad N Re = d_p u_{Ts} \rho_f / \mu$$

El término u_{Ts} es la velocidad libre de caída para una partícula sencilla en un tramo infinito de flujo y puede ser obtenido por:

$$(3.13) \quad u_{Ts} = \sqrt{\frac{4}{3} g d_p \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) / C_{ds}}$$

d) FUERZA DE FRICCIÓN EN LA PARED.

Si λ es el coeficiente de fricción existente en el choque de las partículas contra la pared de la tubería. La fuerza de fricción de las partículas puede ser representada por:

$$(3.14) \quad dF_f = \pi D L T_s = \frac{\lambda}{D} \frac{u_p}{2g_c} dG_s = \frac{\lambda}{D} \frac{u_p G_s}{2 g_c} dL$$

Barth (1958 (1960) cálculo valores de λ para carbón, coke y partículas de trigo con medidas 0.005, 0.005 y 0.003 - 0.013 respectivamente.

La ecuación para el movimiento de las partículas en la sección dL está dada por:

$$(3.15) \quad dF_d = dF_y - dF_f = \frac{dG_s}{g_c} \frac{du_p}{dt}$$

bajo condiciones estables la ec. anterior

$$(3.16) \quad dF_d = dF_g + dF_f$$

substituyendo las ecuaciones anteriores en la ec. 3.16 :

$$(3.17) \quad \frac{\varepsilon}{\phi} \left(\frac{C d_s}{\varepsilon^{4.7}} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \right) \cdot \frac{(u_f - u_b)}{d_p g} \frac{\lambda}{2} \left(\frac{u_p^2}{D_g} \right) = \sqrt{\frac{4}{3}} \left(\frac{g d_p}{u_p^3} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \left(\frac{\varepsilon^{4.7}}{C d_s t} \right)$$

(3.17) donde:

dFd = diferencial fuerza de arrastre

dFg = diferencial fuerza gravitacional

dFf = diferencial fuerza de fricción.

La ecuación anterior nos da una relación entre la velocidad de la partícula y la velocidad del gas.

Las velocidades de partícula usando la ecuación 3.17 se comparan con las obtenidas experimentalmente por Richardson y McLellan (1960) en la gráfica número 27, indicando una buena aproximación, por lo que la ecuación puede ser usada para calcular la velocidad de la partícula cuando tenemos λ disponible:

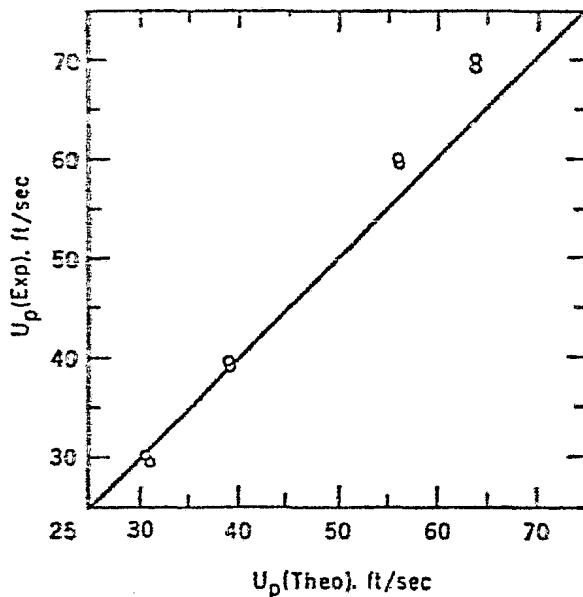


Fig. 27 Comparación de datos obtenidos con la ecuación 3.17 con los observados por Richardson y Mc Leman (1960)

e) VELOCIDAD DE SALTACION.

Las ecuaciones enunciadas anteriormente, son para sistemas sólido-gas en fase diluida en transporte horizontal. Como siempre a medida que la relación sólido-gas se incrementa o, si la velocidad del flujo de transporte se reduce, los sólidos comienzan a depositarse en la parte baja de la tubería y a lo largo de esta, obstruyendo parcialmente el área de flujo. La mínima velocidad de fluido para llevar sólidos con una velocidad específica sin que estos se depositen es la "Velocidad de Saltación" la cual

es muy importante en los diseños de transporte neumático.

Zenz (1964) presentó una correlación empírica de la velocidad de saltación para una partícula en transporte horizontal. (Ver figura 28)

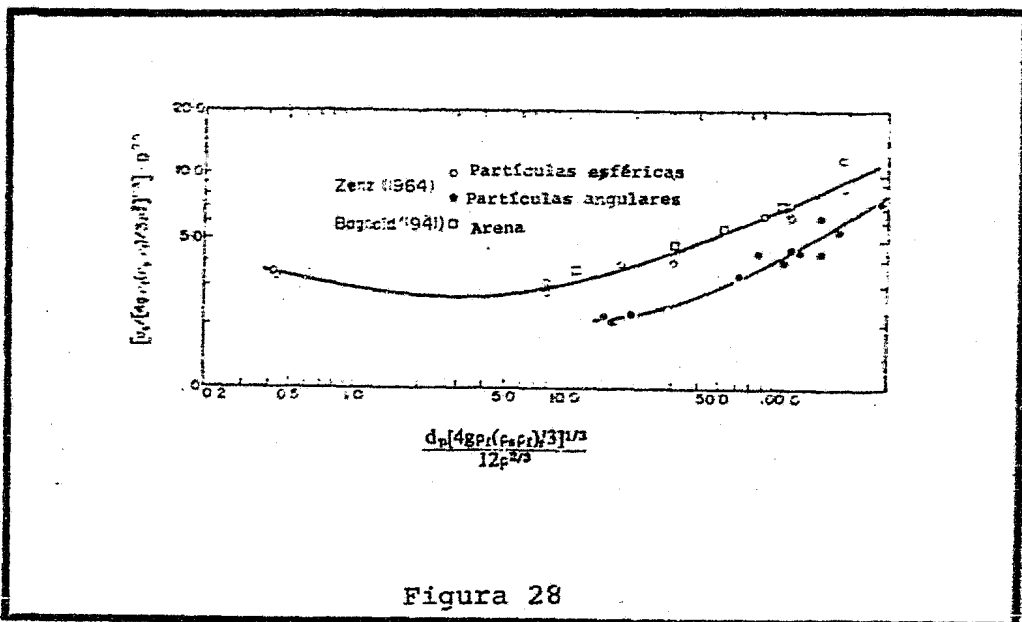


Figura 28

La velocidad de saltación decrece con tamaños menores de partícula, pero bajo cierto tamaño de partícula se incrementa.

En la gráfica se muestra la velocidad de saltación contra tamaño de partícula, y en la cual se muestra una región

mínima en la cual las partículas finas son más difíciles de mantenerse en suspensión y necesitan altas velocidades para transporte en fase diluida. Esta característica se atribuye a la influencia de los efectos de superficie y los efectos de carga electrostática con pequeñas partículas (Corn 1966).

Para el cálculo de la velocidad de saltación para una mezcla con diferentes tamaños Zenz sugirió un método en el cual la velocidad de saltación para las partículas más chicas y las más grandes, son evaluadas por la gráfica anterior (28), entonces se unen los dos puntos localizados y se traza una línea de la que se encuentra su pendiente. Se escoge el valor mas grande de la velocidad de saltación entre los dos puntos y con la pendiente previamente obtenida se aplica la siguiente ecuación:

$$(3.18) \quad \frac{d_p [4g p_f (p_s p_f) / 3]}{12 p^{2/3}}$$

W = Velocidad de sólidos masa

S = Número de grados de compresión (Number of compressions Tapes).

Up' = Vel. saltación bajo cond. de carga.

Us = Vel. saltación para una partícula sencilla.

3.3. SISTEMA EN FASE DENSA.

Cuando la velocidad del gas disminuye antes de la velocidad de saltación y la relación sólido gas es muy alta, las partículas comienzan a asentarse en la parte inferior del tubo, esta transportación en fase densa es usualmente realizada a través de alimentadores de lecho fluidizado.

Un tubo de entrega en forma de embudo (hacia arriba o invertido) ha sido usado para la entrega de gas-sólido en fase densa en lechos fluidizados.

En los sistemas convencionales de transporte neumático las relaciones gas-sólido, están en el orden de 0.1 a 5.0, las líneas transportadoras que usan lechos fluidizados pueden operar con relaciones gas-sólido desde 25 a 900

En la parte cercana a los alimentadores fluidizados, los sólidos aparentemente están dispersados uniformemente, pero en las zonas siguientes tienden a asentarse y comienzan a formar especie de fortificaciones a intervalos periódicos, ante tales irregularidades, es de esperarse

cambios en los perfiles de velocidad, al igual que en la caída de presión.

Debido a que los sólidos transportados en fase densa se mueven más o menos en conjunto, en lugar de individualmente, el efecto de las propiedades de las partículas tales como medidas y contextura puede verse afectado (Wen y Miller 1960).

Consecuentemente es lógico expresar la velocidad de partículas como un promedio de velocidad de la masa a lo largo de la tubería, basada en la densidad de dispersión de los sólidos.

La densidad de dispersión de sólidos Pds se define como:

$$Pds = \frac{\text{Peso de sólidos atrapados en sección de pruebas}}{\text{Volumen tubo usado en la sección de prueba}}$$

El promedio de velocidad de partículas:

U_p puede ser calculado por:

$$(3.20) \quad U_p = \frac{W}{Pds}$$

La densidad de dispersión de los sólidos fue encontrada por Wen y Simons (1959) en fase densa y resultó ser 2 ó 3 veces más grande que en fase diluida, también investigaron la caída de presión y velocidad de sólidos, usando tubería de vidrio con 3 diferentes diámetros.

En este sistema existen grandes pérdidas entre la velocidad del sólido y del gas, a tal extremo que la velocidad del gas llega a ser el doble de la velocidad del sólido, y ésta es prácticamente independiente de las dimensiones de las partículas.

En la gráfica 29 se muestra la correlación empírica de la velocidad de masa de sólidos y el promedio de velocidad de las partículas.

La caída de presión está correlacionada empíricamente por dos grupos adimensionales, a la velocidad de la partícula (ft/seg) como se muestra en la figura 30, la tendencia puede ser aproximadamente representada por:

$$(3.21) \quad \left(\frac{\Delta P_2}{L \rho ds} \right) \left(\frac{D}{dp} \right)^{1/4} = 2.5 U_p^{0.45}$$

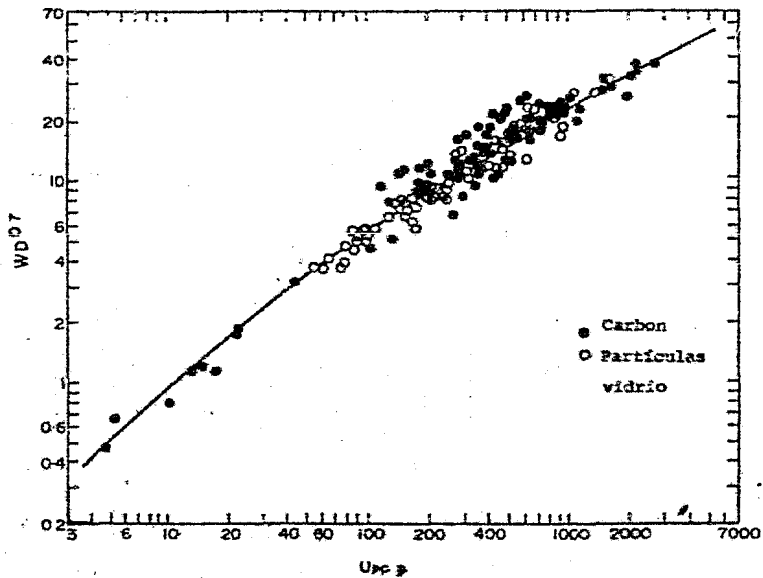


Fig. 29 Velocidad de masa de solidos y velocidad de las particulas (Wen y Simons, 1959)

C. Y. WEN AND A. P. GALLI

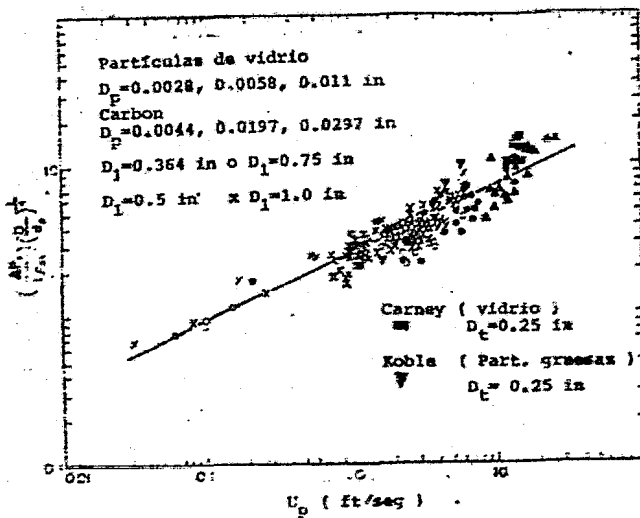


Fig. 30 Correlación de la caída de presión para Transporte en fase densa - - - - - (Wen y Simons, 1959)

El efecto de la forma y medidas de las partículas en la caída de presión, es mas bien pequeño, debido al hecho de que los sólidos viajan predominantemente a lo largo de la parte bajo de los tubos (formando masas aglomeradas).

Combinando las figuras 29 y 30 y las ecuaciones (3.20) y (3.21) y si $u_f \approx u_p$ se puede obtener la caída de presión en términos de la velocidad del gas:

$$(3.22) \quad \left(\frac{\Delta P t}{L W} \right) \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0.25} = 3.8 (u_f)^{-0.55}$$

Los datos obtenidos mediante esta ecuación son comparados con datos obtenidos experimentalmente en la figura 31.

En la figura 32 se establecen datos de caída de presión obtenidos por el U.D. Bureau of Mines, Holden (1969) presentados con la ecuación (3.22) esta información fue obtenida transportando polvo de carbón a lo largo de 200 ft de tubería a presiones arriba de 200 lb/in².

Aun cuando la tendencia general está de acuerdo con la ec. (3.22) existen otros datos en los que parece existir una mayor influencia del diámetro del tubo. Las correlaciones empíricas por otros investigadores están enunciadas

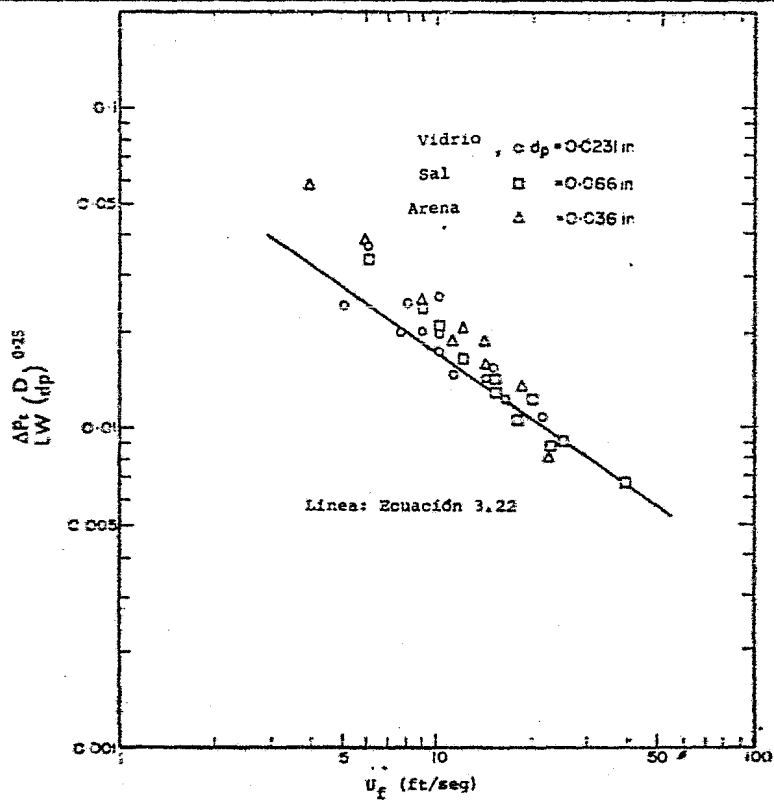


Fig. 31 Comparación de los datos obtenidos con la ec. 3.22, con los observados por -- Zenz para transporte en fase densa ---

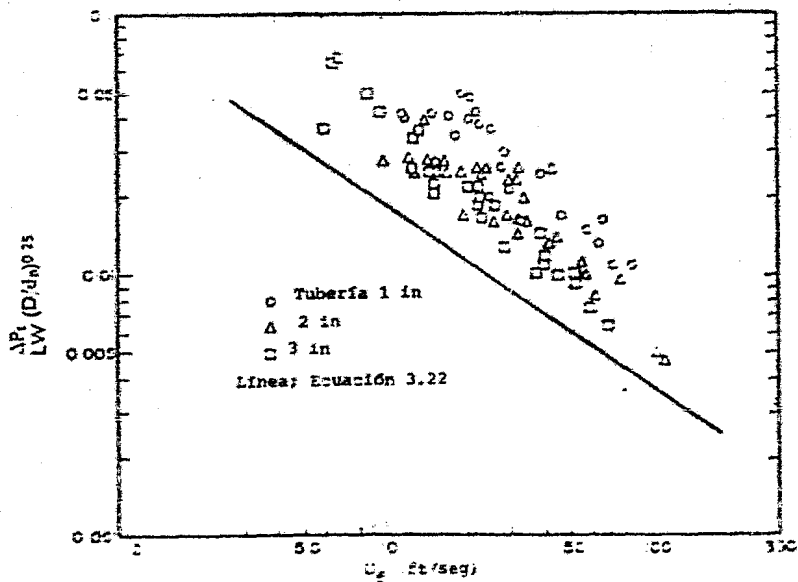


Fig. 32 Comparación de los datos obtenidos con la ec 3.22 con los observados por la - U.S Bureau of mines (Holden 1969)

a continuación:

$$(3.23) \quad \frac{\Delta P t}{L} = \frac{0.022 w^{1.12}}{D^{0.94} \text{ pm}} \quad \text{para } w (\Delta P t \text{ pm})^{0.35} > 1950$$

$$\frac{\Delta P t}{L} = \frac{3.5 w^{0.35}}{D^{0.73} \text{ pm}} \quad \text{para } w (\Delta P t \text{ pm})^{0.35} < 1950$$

$$(3.24) \quad \frac{\Delta P t \text{ pm}}{L} = 0.19 w^{1.48} \quad \text{para flujo menor de } 153 \text{ lb/hr}$$

$$\frac{\Delta P t \text{ pm}}{L} = 385 \times 10^{-4} w^{2.64} \quad \text{para flujo mayor de } 153 \text{ lb/hr}$$

$$(3.25) \quad \frac{\Delta P t}{L} = \frac{0.0081 \text{ ufpm}}{D}$$

Estas ecuaciones muestran estar de acuerdo solamente en el nivel de magnitud, los errores aparentemente se encuentran en el método en que se obtuvo la caída de presión experimentalmente.

Mientras algunos miden la diferencia de presión estática entre el fluidizador y el receptor, otros determinaron la caída de presión a través de uniones directamente agregadas a la línea, aumentando a esto las entradas y salidas

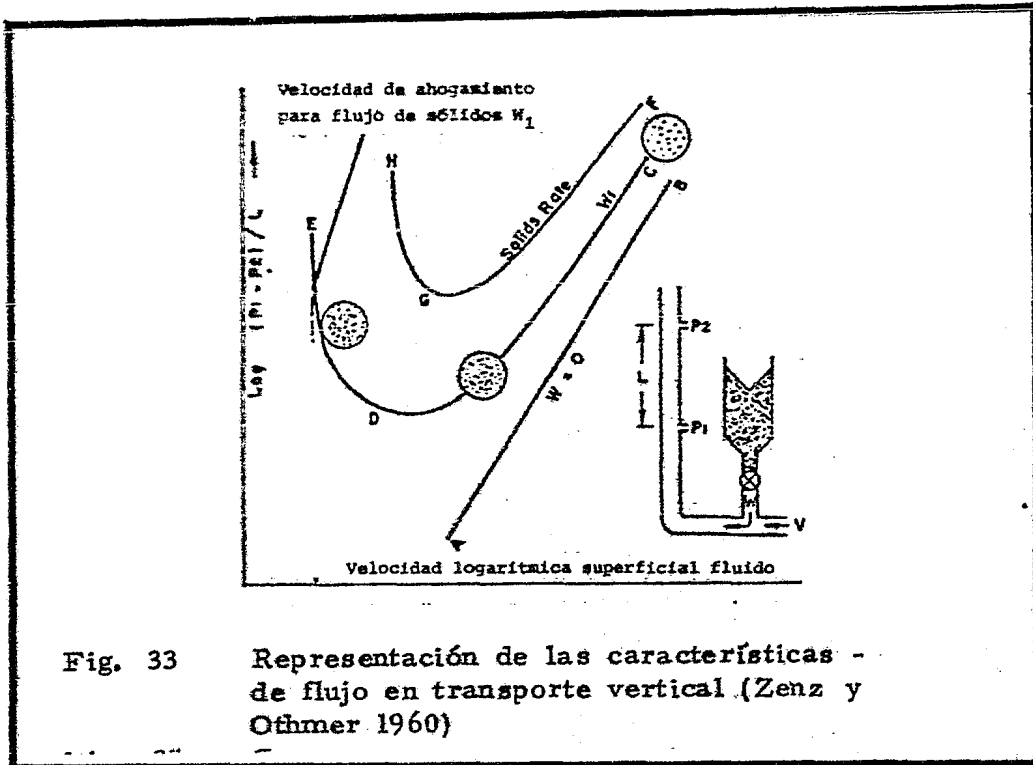
de aire, causadas por el sistema de medición. Ambos métodos pueden estar influenciados y son inconsistentes, debido a la aceleración de las partículas.

Otra fuente de error, es la electricidad estática generada mientras las partículas sólidas pasan a través del tubo, esto es afectado directamente por el grado de sequedad del gas acarreador, por lo que se requieren instalaciones conectadas a tierra para minimizar los efectos de la estática, especialmente cuando se usa gas seco y partículas con poca conductividad.

3.4 CARACTERISTICAS DEL FLUJO EN TRANSPORTE VERTICAL.

Se encuentra evidentemente en sistemas en los cuales se necesita transportar material a otra altura.

Las características de flujo fueron estudiadas por Zenz y Othmer's y se muestran en la gráfica 33 Zenz y Othmer's (1960).



Para una masa estacionaria de sólidos W_1 , W_2 , la caída de presión decrece tal y como la velocidad del gas es reducida desde los puntos C o F a los puntos D y G respectivamente. Simultáneamente la velocidad de las partículas decrece mientras la carga estática aumenta.

En los puntos D o G la carga de sólidos comienza a exceder la fricción del gas y una baja repentina en el flujo de gas causa un rizo en la caída de presión.

En los puntos E o H es donde la velocidad de los sólidos

ha decrecido tanto que el gas no puede soportar la alta densidad de la suspensión, lo que ocasiona un flujo de partículas contrario al precipitarse éstas hacia abajo.

La realidad del gas en los puntos E o H es llamada velocidad de ahogamiento, representa la capacidad de saturación de acarreo de la corriente de gas.

De acuerdo a Zenz y Othmen (1960) la velocidad de ahogamiento puede ser calculada por:

$$(3.26) \quad u_{ch} = \rho_s (1 - E_{ch})(u_{ch} - u_T)$$

Donde: ρ_s = densidad de sólidos
 E_{ch} = fracción húmeda a velocidad ahogamiento
 u_{ch} = Velocidad ahogamiento
 w = velocidad ahogamiento sólidos-masa

E Crítico es independiente del diámetro de la partícula (0.0066-0.066 in) pero depende fuertemente de la densidad de sólidos y puede ser calculada por (Ver Kunii y Levenspiel (1969) y Zenz y Othner (1960)).

$$E_{ch} \approx 0.03 \rho_s + 0.91$$

DONDE ρ_s [g/cc] PARA $d_p > 0.17 \text{ mm}$

$$0.045 < E_{ch} < 0.987$$

Para tamaños uniformes de partículas Zenz y Othmer identificaron la velocidad de ahogamiento aproximadamente igual a la velocidad de saltación, pero para mezclar con diferentes tamaños de partículas, la velocidad de saltación resultó ser de 3 a 6 veces más grande que la velocidad de ahogamiento.

CAIDA DE PRESION EN TRANSPORTE VERTICAL.

La diferencia entre el transporte horizontal y el vertical, es que las partículas están suspendidas y se encuentran relativamente dispersas, al menos antes de que empiecen a caer.

De esta manera es razonable considerar el transporte vertical como gas fluyendo a través de un lecho expandido a una velocidad relativa $U_f - U_p$.

La caída de presión debido a la fricción entre el fluido y las partículas, puede ser descrita por la ecuación de Ergon.

$$(3.27) \quad \frac{\Delta P_f g_c}{L} = \frac{150M (u_f - u_p)(1-\epsilon)^2}{d_p^2 \phi_s^2 \epsilon^2} + \frac{1.75 (1-\epsilon) \rho_f (u_f - u_p)^2}{d_p \phi_s \epsilon}$$

donde:

ϕ_s = factor de forma de partícula

ΔP_f = caída de presión gas solo

g_c = factor de conversión

L = longitud

M = viscosidad.

La pérdida por fricción entre el fluido y la pared del tubo, no puede ser exactamente evaluada debido a la presencia de partículas sólidas. Sin embargo este término es usualmente pequeño en comparación con otros términos y puede ser aproximadamente calculado por la ecuación convencional del factor de fanning de fricción, de esta manera:

$$(3.29) \quad \frac{\Delta P_w g_c}{L} = \frac{\rho_f u_f^2 f}{2D}$$

f = factor de fricción de fanning

g_c = factor conversión

D = diámetro tubería

ΔP_w = caída de presión fricción.

La pérdida por carga estática del fluido para sostener las partículas puede ser calculado por:

$$(3.28) \quad \frac{\Delta P_s g_c}{L} = (1-\epsilon)(\rho_s - \rho_f)g$$

ΔP_s = caída de presión por carga estática.

g = aceleración gravedad.

El total de la caída de presión se convierte ΔP_t (caída de presión total)

$$(3.30) \quad \frac{\Delta P_t g_c}{L} = \frac{150 \left(\frac{u_o}{\epsilon} - u_p \right) (1-\epsilon)^2}{d_p^2 \phi_s^2 \epsilon^2} + \frac{1.75 (1-\epsilon) \rho_f \left(\frac{u_o}{\epsilon} - u_p \right)^2}{d_p \phi_s \epsilon} + (1-\epsilon)(\rho_s - \rho_f)g + \frac{\rho_f u_f f}{2D}$$

El factor de huecos E puede ser calculado por las siguientes ecuaciones:

$$(3.31) \quad 1 - \epsilon = \frac{4G_s}{\pi D^2 \rho_s U_p}$$

$$(3.32) \quad \epsilon^{4.7} \cdot \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{18} = \frac{18 d_p (\rho_s - \epsilon U_p) \rho_f}{M} + 2.7 \left[\frac{d_p (\rho_s - \epsilon U_p) \rho_f}{M} \right]^{1.689}$$

La ecuación (3.32) es una ecuación semi-empírica obtenida a base de la fuerza de arrastre en un sistema de partículas múltiples (Wen Yc 1966).

Aun cuando los cálculos para transporte vertical requieren solamente de las propiedades del sistema, el método es muy sensitivo a la variación de la fracción de huecos.

La Tabla 34 muestra una comparación para la caída de presión usando las ecs. (3.30), (3.31) y (3.32) y los datos obtenidos experimentalmente por Sandy (1969), el estudio fue solamente ordinario, sugiriéndose investigaciones futuras en este campo.

TABLA 34

<u>Flujo de sólidos (lb/hr)</u>	<u>Flujo de gas (lb/hr)</u>	<u>Presión observ. (lb/in²)</u>	<u>Presión calc. (lb/in²)</u>	<u>E calc. P/sø</u>	<u>Presión observ. (lb/in²)</u>	<u>Presión calc. (lb/in²)</u>
66.8	.4078	8.45	15.20	.683	4.43	4.54
63.4	.4968	8.72	16.43	.671	6.30	3.53
52.2	.4719	8.46	15.84	.668	6.39	5.32
96.0	.5358	9.59	16.63	.645	7.02	4.84
61.1	.5690	11.17	13.56	.632	7.07	4.96
52.6	.5409	11.14	28.30	.645	6.89	7.03

3.5. POTENCIA REQUERIDA PARA LA MEZCLA SOLIDO-GAS.

En un sistema convencional de transporte neumático de sólidos, el gas puede ser comprimido antes de que los sólidos sean agregados, o después de que los sólidos han sido separados del gas. En este caso la energía para mover el sólido, es mucho mayor que la que se utiliza cuando el aire pasa a través del compresor.

En el diseño de la tubería la caída de presión y la velocidad de flujo del gas son establecidas, esto da la carga y la velocidad de flujo que debe manejar el compresor.

Estos valores pueden ser usados en las ecuaciones standar de caballos de potencia, para calcular la misma del compresor.

$$(3.33) \quad \dot{Q} \text{ HP} = \frac{G_g H_c}{33000 \eta_H}$$

donde

$$H_c = \left[\left(\frac{P_D}{P_S} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \right]^{3H} \frac{T_S Z R^{-1}}{\frac{k-1}{k} \eta_H}$$

donde:

H_c = Carga politrópica del compresor.

- PA = Presión de descarga
 Ps = Presión de succión
 3H = Eficiencia hidráulica del compresor.
 Gg = Rango de flujo de gas (lb/hr)
 Ts = Temp. de succión
 Rl = Constante del gas 145/ml paso.
 Z = Factor de compresibilidad del gas.

La forma más directa de comprimir la mezcla sólido-gas sería la de hacer pasar ésta a través del compresor sin separarse.

Estos compresores han sido hechos industrialmente, sólo para sistemas en fase diluida a bajas presiones. Las severas condiciones de erosión y los evidentes problemas mecánicos, han ocasionado muy poco uso para los mismos.

La U. S. Bureau of Mines ha hecho considerables investigaciones para calcular la potencia necesaria para circular mezclas de aire-material; de las anteriores surgió la siguiente ecuación:

$$(334) \quad (HP)_t = (HP)_a \left(\frac{G_s}{G_a} + 1 \right)$$

donde:

(HP)_t = HP Totales.

(HP)_g = HP para gas del compresor

G_s = Flujo de sólidos

G_g = Flujo de gas.

La ecuación anterior cubre rangos de relación sólido-gas arriba de 2.2 y relaciones de compresión arriba de 1.10, usando un diseño especial de compresor centrífugo.

Patterson (1958) propuso otro método para el cálculo de potencia.

$$(HP)_t = \frac{G_r H_c}{30,000}$$

donde:

G_r = Peso del flujo de sólido y gas (lb/hr).

H_c = Carga politrópica.

Esta ecuación checa perfectamente con los datos obtenidos usando un tipo de compresor de paletas radiales de baja velocidad, usando aire-carbón y con una presión baja de 1.03.

La segunda ecuación es útil con bajas presiones, si se incrementan éstas; existen grandes diferencias con la ecuación del U.S. Bureau of Mines (3,34) que es más recomendada.

3.6 LECHOS FLUIDIZADOS.

Consisten en hacer pasar una corriente ascendente de gas a través de una placa o malla con pequeños orificios, sobre la cual se encuentra una capa de material.

La corriente ascendente del fluido ocasiona un aumento de volumen en el lecho estacionario a bajas velocidades, pero si la velocidad es lo suficientemente grande, las partículas estarán libremente suspendidas en el fluido, dando origen a un lecho fluidizado.

Si la velocidad del flujo de gas, se incrementa arriba del mínimo requerido para producir un lecho fluidizado, pueden ocurrir dos cosas diferentes, ya sea que el lecho continúe expandiéndose de manera que la distancia promedio, entre partículas aumente, o que al existir un exceso de fluido, este pase a través del lecho en forma de burbujas, ocasionando un sistema de dos fases. (giving rise).

Estos dos tipos de fluidización se conocen por sistema particulado y sistema agregativo respectivamente.

En general el sistema particulado ocurre con sistemas líquidos-sólidos y en sistemas gas-sólido cuando las partículas son muy finas.

La fluidización agregativa ocurre con todos los demás sistemas gas-sólido y algunas veces en sist. líquido-sólido cuando estas últimas tienen alta densidad.

Jackson (1963), Pigford, Barón y Murray (1965) hicieron estudios teóricos sobre la estabilidad de pequeñas perturbancias en la concentración uniforme de partículas en lechos fluidizados, mostrándose mayores porcentajes de pequeñas burbujas en sistemas gas-sólido que en líquido-sólido.

Harrison et al (1961) sugirió que el tipo de fluidización obtenido sea relacionado con el tamaño máximo estable de la burbuja, que pueda existir en un lecho fluidizado.

Si la velocidad de circulación del gas, entre las burbujas (la cual es normalmente igual a la velocidad de flujo de

las burbujas) excede la velocidad terminal de caída de las partículas (terminal falling velocity) las partículas serán absorvidas en la parte alta de la burbuja, que entonces tiende a desaparecer.

El máximo tamaño estable de burbuja, aumenta con la velocidad terminal de caída de las partículas, si esta medida de la burbuja, excede digamos 10 veces el diámetro de la partícula, obviamente se formará la burbuja y la fluidización será agregativa, pero si es del mismo orden del diámetro de la partícula, no pudiendo ser distinguida entre el gas, la fluidización será particulada.

Wilhelm y Kwauk (1948) sugirieron usar el grupo Froude (Umf^2/gd) como criterio para determinar el tipo de sistema operante. En general la fluidización agregativa se obtiene con valores arriba de la unidad y fluidización particulada con valores menores de 1.

Si se consideran las propiedades de los sistemas particulados, de tal manera que se analicen los cambios de la caída de presión con respecto a la velocidad del fluido, los comentarios anteriores se aplican solamente asistencias ideales.

Es necesario también saber el rango de condiciones para que exista un sistema particulado, ya que de esta manera estaremos en condiciones de predecir la mínima velocidad de flujo a la cual ocurre la fluidización (velocidad mínima de fluidización U_{mf}) y la velocidad mínima a la cual aparecen las burbujas en el lecho. (Velocidad mínima de burbujas U_{mb}) ya que esta marca el límite máximo de velocidad para sistemas particulados.

De esta manera a la velocidad mínima de fluidización, que marca una transición entre un lecho estacionario a un estado fluidizado, puede esperarse que las relaciones de flujo para el lecho estacionario puedan ser aplicables al lecho fluidizado.

En resumen en los lechos fluidizados existen condiciones favorables para rápido calentamiento y transferencia de masa entre sólidos y fluido, generalmente ocurre una rápida mezcla de sólidos y los coeficientes para la transferencia de calor en las cercanías de la superficie son muy altos. Por lo tanto los lechos fluidizados son muy usados en cambiadores de calor especiales, reactores químicos y otros elementos enfocados generalmente en procesos químicos.

a) RELACION CAIDA DE PRESION VELOCIDAD.

Comportamiento ideal.

Si el fluido es pasado verticalmente hacia arriba a través de un lecho de partículas, la caída de presión ΔP_B inicialmente crecerá cuando la velocidad U se aumente, Ver figura 35.

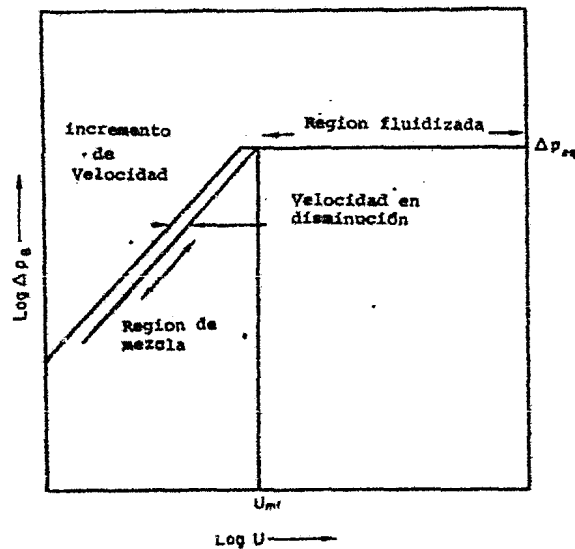


Fig. 35 Caída de presión - Velocidad

La relación entre la caída de presión y la velocidad es la que se aplica a un lecho estacionario, para partículas finas.

Cuando la velocidad alcanza un valor tal que la caída de presión por fricción es igual al peso de partículas por unidad de área ΔP_B , de cualquier aumento de velocidad posterior debe resultar un leve movimiento ascendente, formando el lecho. Las partículas se re-arreglan de manera que la resistencia al flujo del fluido decrece, en general en un sistema ideal la caída de presión permanece constante ΔP_{eq} .

Los aumentos posteriores en la velocidad ocasionan una expansión continua del lecho, hasta que eventualmente cualquier separación posterior de las partículas, solamente es posible, si ellas físicamente se separan una de otra. En este momento el lecho está solamente fluidizado, se dice que es el punto de fluidización incipiente y la velocidad superficial del fluido es conocida como velocidad mínima de fluidización, a partir de aquí con aumentos en la velocidad, la caída de presión permanece constante.

Si la velocidad del fluido es progresivamente disminuida, la presión permanece constante hasta el punto de fluidización incipiente. Las reducciones posteriores de velocidad son acompañadas con progresivas decreciones en la caída de presión, pero la curva de caída de presión-

velocidad será generalmente mas baja, que aquella en la que la velocidad es aumentada.

b) DESVIACIONES DEL COMPORTAMIENTO IDEAL.

Los comportamientos antes descritos son casos ideales, en la práctica se presentan diferentes variaciones al comportamiento ideal.

1. Cuando la velocidad se acerca a la mínima de fluidización ocurre una mala expansión antes de que la caída de presión haya alcanzado el peso por unidad de área en el lecho, este efecto es más marcado cuando en el lecho las partículas están altamente consolidadas.
2. Debido a la tendencia de las partículas a juntarse una con otra, un puente parcial puede ocurrir, particularmente en lechos con diámetro pequeño, resultando fuerzas de fricción en las paredes de los contenedores del lecho. Debido a lo anterior existirá un pequeño aumento en la caída de presión del valor teórico y la curva tendrá la siguiente forma:

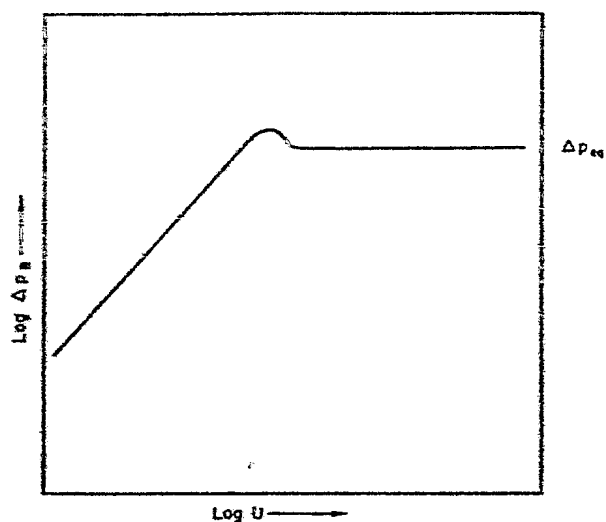
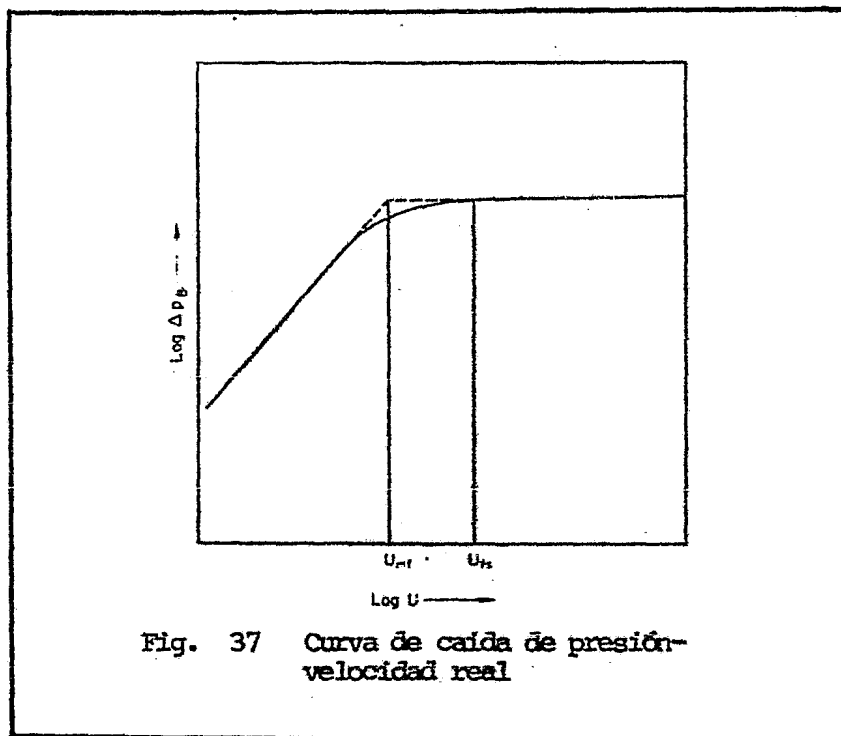


Fig. 36 Caída de presión - Velocidad-Real

3. La falta de uniformidad en el lecho ocasiona que el flujo se dirija por determinadas áreas, teniendo como resultado zonas estacionarias y zonas fluidizadas. Por lo que la caída de presión estará abajo del valor esperado.

Efecto de la presencia de regiones no fluidizadas en el lecho.

d) Puede ocurrir canalización entre las partículas del lecho, con el resultado que una alta proporción del fluido pueda tener flujo libre a través de los canales.



NOMENCLATURA

C_2	Velocidad absoluta de sólidos a la salida
C_d	Coefficiente de arrastre para sist. partículas-múltiples
C_{ds}	Coefficiente de arrastre para sist. partícula sencilla
C_{dst}	Coefficiente de arrastre para partícula cayendo
D	Dímetro de tubería
d_p	Dímetro de partícula
f	Factor de fricción de fanning
F_d	Fuerza de arrastre sobre una partícula en sist. mult.
F_{ds}	Fuerza de arrastre en sist. de partícula sencilla
F_f	Fuerza de fricción (F)
F_g	Fuerza gravitacional (F)
g	Aceleración de la gravedad (L/θ^2)
g_c	Factor de conversión ($ML/F\theta^2$)
G_g	Flujo de gas (M/θ)
G_s	Flujo de sólidos (M/θ)
G_t	Flujo de gas y sólidos (M/θ)
H_c	Carga politrópica del compresor (L)
$(HP)_g$	HP para gas del compresor (ML/θ)
$(HP)_s$	HP para sólidos (ML/θ)
$(HP)_t$	HP totales (ML/θ)
K	Relación específica de carga, C_p/C_v
L	Longitud de tubería (L)
m	Relación sólido-gas (M/M)
n	Número de partículas
N_{Re}	Número de Reynolds

P_D	Presión de descarga (F/L^2)
P_S	Presión de succión (F/L^2)
P_d	Caída de presión por la fuerza de arrastre (F/L^2)
P_f	Caída de presión por el flujo de gas solo (F/L^2)
P_s	Caída de presión por la carga estática (F/L^2)
P_t	Caída de presión total con sólido-gas (F/L^2)
P_w	Caída de presión por la fricción entre tubería y flujo
R	Radio de la tubería (L)
R'	Constante del gas, 1545/mol peso
S	Número de pasos de compresión
t	Tiempo (θ)
T_s	Temperatura de succión °R
u_{ch}	Velocidad de ahogamiento (L/θ)
u_f	Velocidad del fluido (L/θ)
u_p	Velocidad de la partícula (L/θ)
u_p'	Velocidad de saltación bajo condiciones de carga (L/θ)
u_s	Velocidad de saltación para una partícula (L/θ)
u_t	Velocidad final de partícula para sist. mult. (L/θ)
u_{ts}	Velocidad final de partícula para sist. sencillo (L/θ)
\bar{u}	Velocidad promedio de gas (L/θ)
W	Velocidad de masa de sólidos
W_{ch}	Velocidad de ahogamiento sólidos masa $M/L^2\theta$)
Z	Factor de compresibilidad del gas
ϵ	Factor de huecos
ϵ_{ch}	Factor de huecos a velocidad de ahogamiento

- λ Coeficiente de fricción
- μ Viscosidad ($F\theta/L^2$)
- ρ_{ds} Densidad de sólidos dispersos (M/L^3)
- ρ_f Densidad del fluido (M/L^3)
- ρ_m Densidad de la mezcla (M/L^3)
- ρ_s Densidad de sólidos (M/L^3)
- τ_s Esfuerzo cortante en la pared de la tubería (F/L^2)
- η_f Eficiencia de fricción de los sólidos
- η_h Eficiencia hidraulica del compresor

CAPITULO IV

SELECCION DEL EQUIPO NECESARIO

- 4.1 Selección de Sistema
- 4.2 Selección de Impulsores de Aire.
- 4.3 Selección de Alimentadores Rotatorios.
- 4.4. Cálculo de Colectores de Polvo.
 - 4.4.1 Colectores de Bolsas.
 - 4.4.2 Ciclones.
- 4.5 Cálculo de Tubería.

SELECCION DEL SISTEMA Y EQUIPO.

Las propiedades y características de los materiales son elementos muy importantes para determinar si el material puede o no ser transportado neumáticamente. Estos aspectos influyen en el diseño y en la correcta selección del equipo para sistemas de transportación neumática, de esto depende el correcto funcionamiento del sistema.

Las propiedades que afectan la densidad del material no necesariamente afectan las características de flujo del material.

La variedad de los materiales que son transportados fácilmente por métodos neumáticos, demuestran que cualquier material granular, polvoso, etc., que pueda ser introducido dentro de tubos, puede ser transportado neumáticamente, aunque algunos materiales presentan ciertos problemas para su transporte. El material debe ser transportado, sin que se ocasione algún daño y será fácilmente separado de la mezcla al llegar a su destino final.

Por todo lo anterior antes de seleccionar o calcular el equipo necesario, se deben conocer exactamente algunas

características físicas y químicas del material a transportar.

A continuación se enuncian algunas de las pruebas más comunes para calcular diversos parámetros necesarios acerca del material.

Densidad Relativa: La densidad relativa de un material, es la relación de su densidad, con respecto a la densidad del agua.

Peso Especifico: Este es el peso por unidad de volumen, de polvo o materiales granulares. Este peso puede ser usado para determinar: el peso aproximado del material descargado por el alimentador con una determinada capacidad volumétrica, o el peso aproximado del material en un depósito de volumen conocido, inmediatamente después de llenarlo neumáticamente, o también para conocer el volumen de una tolva para recibir una cantidad específica de material.

Tamaño de Partícula: La distribución de los tamaños de partículas de materiales granulares o polvosos, es determinado tomando una muestra de material y haciendo pasar esta por una criba vibradora con espacios graduados. Este procedimiento da la distribución de tamaños basada en el peso y volumen de las fracciones, retiradas, o que pasan a través de la malla. Los resultados son expresados por porcentaje de peso, entre los diferentes tamaños de malla.

Las mallas son hechas de acuerdo con los estándares o normas propuestos por la American Society of Testing Materials y las medidas pueden ser expresadas como Malla Tyler y van de 3 1/3 hasta el No. 325. El número menor de malla es el No. 325, aunque muchos materiales pueden tener mezcladas partículas con un tamaño todavía menor, lo cual afecta directamente en la selección de los receptores de polvo.

Abrasividad. La abrasividad de un material es determinada por el efecto abrasivo que tenga este sobre la superficie del metal con el cual el material está en contacto, por choque o deflexión durante el transporte. Las características de abrasividad del material de ciertos

granos y cereales son conocidas y deben tomarse las prevenciones necesarias para reducir la erosión del metal. La abrasividad de los minerales pulverizados depende de la clase de partícula después de que sus cristales son fracturados, de la fuente del material, y de la velocidad de choque.

Una prueba para calcular la abrasividad relativa es descargar una muestra de material a través de una pistola sopladora de arena, sobre una plancha a una distancia determinada, posteriormente se determina la pérdida de peso sufrida por la plancha, al estar en contacto con el chorro por un determinado tiempo. Esta pérdida de peso en la plancha nos da la medida de abrasividad del material, o la resistencia de la plancha a la abrasividad.

Cuando se trata de un material abrasivo, es necesario tener una velocidad baja de transporte, para reducir los efectos de choque.

Contenido de Humedad: El contenido de humedad de muchos materiales, se incrementa al estar en contacto con el medio ambiente, lo cual cambia las propiedades de flujo.

Cada material manejado en estos sistemas, tiene sus propios rangos máximos de humedad.

Algunos materiales deben ser transportados y almacenados bajo un secador de humedad para evitar alguna variación en las características de flujo.

Corrosividad: La corrosividad de los metales acorta la vida del equipo de transporte. Los materiales manejados en sistemas neumáticos están generalmente secos, pero algunos materiales como anteriormente se vió, tienden a humedecerse, al entrar en contacto con el medio ambiente.

El material disociado forma átomos-iones los cuales están eléctricamente cargados. Los átomos con carga positiva son llamados iones de hidrógeno y los que tienen carga negativa se llaman iones de hidroxilo. La relativa concentración de estos iones en una solución, determina el grado de acidez o de reacción con los metales.

La acidez de un material es la medida de las concentraciones de iones de hidrógeno, los cuales causan la corrosión del metal.

El potencial de iones de hidrógeno se expresa en el PH, el cual se mide fácilmente.

El ángulo de reposo es un factor importante en el diseño de las tolvas alimentadoras y queda especificado por el ángulo que existe entre la horizontal y el formado por la línea natural de una pila de material.

Además de los factores anteriores deben tomarse en cuenta algunas otras características del material no menos importantes como son la adhesividad, que es la tendencia de algunos materiales a adherirse en las superficies del equipo con el cual entra en contacto (tolvas, alimentadores, tubería, colectores, etc.) creando serios problemas de taponamiento en algunos casos, o esfuerzos de torsión en la flecha del rotor, por pegarse el material en las cuchillas de este mismo.

Como un resumen de todo lo anterior se presenta la Tabla 38 en la cual se enlistan las características físicas del material y la forma en que afectan estas en la selección del equipo.

TABLA 3R

EFFECTO DE LAS CARACTERISTICAS DEL MATERIAL
EN LA SELECCION DEL EQUIPO

Propiedad o característica	Usado para determinar
+ Peso específico	Requisitos de potencia
+ Peso específico en depósito	Requisitos de potencia
+ Peso específico aereado	Volumenes de almacenes y tolvas, capacidades de alimentación.
+ Analisis de malla	Requisitos de colección de polvos, claros en alimentadores, tipos de sellos y velocidad minima transporte.
+ Abrasividad relativa	Tipo de sistema, materiales de construcción, alimentador tipo de sellos, requisitos de potencia, tipo protección.
+ Contenido de la mezcla y fragibilidad	Tipo de sistema, colección de polvos, almacenaje, venteo secado de aire, alimentación inductores de flujo.
+ PH o corrosividad	Mats. construcción, venteo
+ Angulo reposo	Tolvas, almacenadores
+ Forma partícula	Tipo sist., tipo alimentador

Las características anteriores también son muy importantes para la selección del sistema óptimo para transporte neumático. La compañía Fuller ha publicado las tres siguientes Tablas para la selección de un sistema adecuado. (La cruz significa que ese material puede ser transportado por este sistema

A). De acuerdo al tamaño de partícula.

Tamaño de
partícula.

	Vacío	Baja Presión	Sist. Combinado	Alta Presión	Aire Activado
Fino	X	X	X	X	X
Granular	X	X	X	X	X
Partículas	X	X	No	No	No

La Tabla anterior así como las siguientes fueron elaboradas de acuerdo a conocimientos prácticos de dicha compañía.

B) De acuerdo a las características físicas.

Característica	Vacío	Baja Presión	Sist. Combinado	Alta Presión	Aire Activado
No abrasivo	X	X	X	X	X
Poco-abrasivo	X	X	X	X	X
Abrasivo	No	No	No	X	X
Muy abrasivo	No	No	No	X	X
Higroscópico	X	X	No	No	No
Combustible	X	X	X	?	X
Explosivo	X	X	X	No	No
PH	X	X	X	X	X
Frágil	X	X	No	X	X
Corrosivo	?	?	?	?	?
Termo plástico	X	X	No	No	No
Tóxico	X	Totalmente encerrado			

Ahora como un resumen de las dos Tablas anteriores está la Tabla 39 con la cual y entre las tres se dará una idea de qué sistema deberá diseñarse.

TABLA 39

MATERIAL	Vacío	Baja Presión	Vacío- Presión	Alta Presión	Flui- dizado
Gluten	x	x	no	no	no
Grafito	x	x	no	no	no
Grano-entero	x	x	no	no	no
Grano-molido	x	x	no	no	x
Grits.	x	x	no	no	no
Harina de trigo	x	x	no	no	x
Hidrato de aluminio	x	no	no	x	x
Hule en perlas	x	x	no	no	no
Jabón en polvo	x	x	no	?	?
Leche en polvo	x	x	no	no	no
Lino en semilla	x	x	no	no	no
Madera-astillas	no	x	no	no	no
Madera-viruta	x	x	no	no	no
Malta	x	x	no	no	no
Mineral-pulverizado	no	no	no	x	x
Oxido de Aluminio	no	no	no	x	x
Oxido de Arsénico	x	x	no	no	no
Oxido de Magnesio	x	x	no	x	x
Oxido de Titanio	?	?	?	?	?
Oxido de Zinc	x	x	x	x	x
Pedernal	no	no	no	x	x
Pirita	no	no	no	x	x
Poliétileno	x	x	x	x	no

Material	Baja		Vacío- Alta		
	Vacío	Presión	Presión	Presión	Fluidiza
Remolacha	x	no	no	no	no
Resinas	x	x	x	x	x
Roca Fosfórica	no	no	no	x	x
Sal	x	x	no	no	no
Semillas	x	x	no	no	no
Semolina	x	x	no	no	x
Sílica	no	no	no	x	x
Soda Ash lig.	x	x	x	no	no
Sosa Ash pes.	?	?	no	no	no
Sulfato de Sodio	x	x	no	no	x
Sulfito de Sodio	x	x	no	no	no
Talco	x	x	x	x	x
Tierras Fuller	x	x	no	x	x
Virutas	x	x	no	no	no
Yeso	x	x	no	x	x
Acetato de Celulosa	x	x	x	x	x
Algodón (semilla)	x	x	no	no	no
Almidón	x	x	x	x	x
Alumbre	x	x	no	no	no
Aluminio-Granular	x	no	no	no	x
Alúmina-Polvo	x	no	x	x	x
Arcillas	x	x	no	x	x
Arroz	x	x	no	no	no
Asbesto en Polvo	x	no	no	no	no
Azúcar	x	x	no	x	x

Material	Vacío	Baja Presión	Vacío- Presión	Alta Presión	Flui- dizado
Baritas	no	no	no	x	x
Bauxita	x	no	no	x	x
Bentonita	x	x	x	x	x
Bórax	x	x	no	x	?
Café grano	x	x	no	no	no
Cal hidratada	x	x	x	x	x
Cal piedra	x	x	no	no	no
Caliza	no	no	no	x	x
Caolín	x	x	x	x	x
Carbón activado	x	x	x	x	x
Carbón peletizado	?	?	no	no	no
Carbón pulverizado	no	no	no	x	no
Carbonato de Calcio	x	x	x	x	x
Carbonato de Sodio Lig.	x	x	x	no	no
Carbonato de Sodio pesado	?	?	no	no	no
Catalizador	x	no	no	x	no
Cemento Mat. Prima	no	no	no	x	x
Cemento Portland	no	no	no	x	x
Cenizas volátiles	no	no	no	x	x
Cereales	x	x	no	no	no
Coke finos	x	x	no	no	no
Coke petróleo	x	x	no	no	x
Detergentes	x	x	no	x	x
Diafomitas	x	x	x	x	x
dióxido de Tilanio	?	?	no	no	?
Dolomita	no	no	no	x	x

Material	Baja		Vacío-		Alta
	Vacío	Presión	Presión	Presión	Fluidizado
Fosfato de Calcio	no	no	no	x	x
Fosfato de Sodio	x	x	no	x	x
Feldespató	x	no	no	x	x
Fluorespató	no	no	no	x	x
Fertilizante	?	?	?	?	?

4.2. SELECCION DE IMPULSORES DE AIRE.

El tipo de impulsor de aire necesario para un sistema de transporte neumático específico, se determina principalmente por la corriente de aire y la presión necesaria para transportar un material dado, por un sistema de tuberías y a una cantidad determinada, se deben tomar en cuenta las fugas internas o externas.

Dependiendo del tipo de impulsor de aire seleccionado, cada uno debe tener el siguiente equipo:

- Ventilador Centrífugo. Motor impulsor, transmisión de banda en V y filtro de succión.
- Soplador rotatorio de desplazamiento positivo. Motor impulsor, transmisión de banda en V, filtro de entrada, silenciadores en la descarga y entrada, válvula de alivio de presión o vacío, válvula check, indicadores de presión y montaje para la unidad.
- Compresores reciprocantes: motor impulsor, transmisión de banda en V, receptor de aire con switch de arranque, unidad enfriadora, válvula de alivio, indicadores de

presión, trampa para humedad y sistema mecánico de lubricación.

Por lo general los motores que proporcionan el movimiento mecánico necesario a el impulsor de aire, están contruidos de tal manera que puedan prever: mover con rapidez el impulsor de tal manera que se puedan tener garantías de transporte, reservar potencia para soplar en otra línea de transporte y debe tener capacidad para un aumento de potencia en el caso de carga negativa.

En estos sistemas en los cuales el material entra en la corriente de aire, se requieren grandes volúmenes de aire a relativa baja presión, debido a que se usa una relación aire-material elevada.

Estos sistemas ya sea que operen en vacío o con presión positiva están generalmente provistos con sopladores rotatorios de desplazamiento positivo o ventiladores centrifugos.

Estas unidades se pueden obtener en una amplia gama de medidas y capacidades, con transmisión de banda, para

operar a diferentes velocidades, siendo una de estas óptima para las condiciones de operación. El soplador rotatorio de desplazamiento positivo es el mas usado debido a que puede producir alta presión (arriba de 18 psig.) y con capacidad suficiente para mover el material cuando la línea de transporte se bloquea. Estos sopladores presentan la característica de que disminuye la cantidad de aire cuando aumenta la resistencia al flujo de aire en el sistema (Ver figuras 40 y 41).

Los sistemas en los cuales el aire mueve una masa de material, constan generalmente de un soplador de desplazamiento positivo que tiene bajo flujo de aire con una presión mediana, lo cual, es ideal para un tanque soplador. Sin embargo para un bajo flujo de aire, con requisitos de alta presión para un tanque soplador de este tipo, usando una baja relación aire-material, se escogen compresores reciprocantes o compresores de paleta múltiple.

Los sistemas que trabajan con bajas relaciones de aire material, utilizan dos sopladores de presión positiva operando en tandem con un motor común con bajo flujo de aire, con mediana presión de servicio (arriba de 40 psig.)

Fig. 40 Curvas de comportamiento para un soplador centrifugo

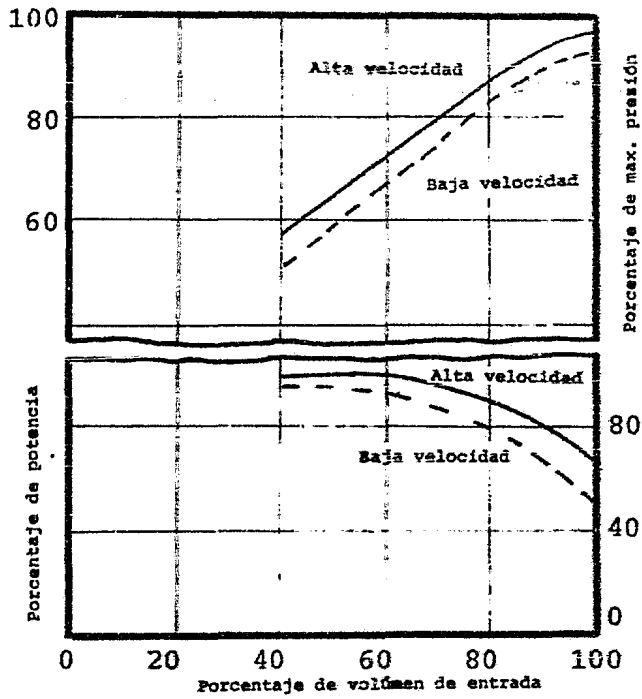
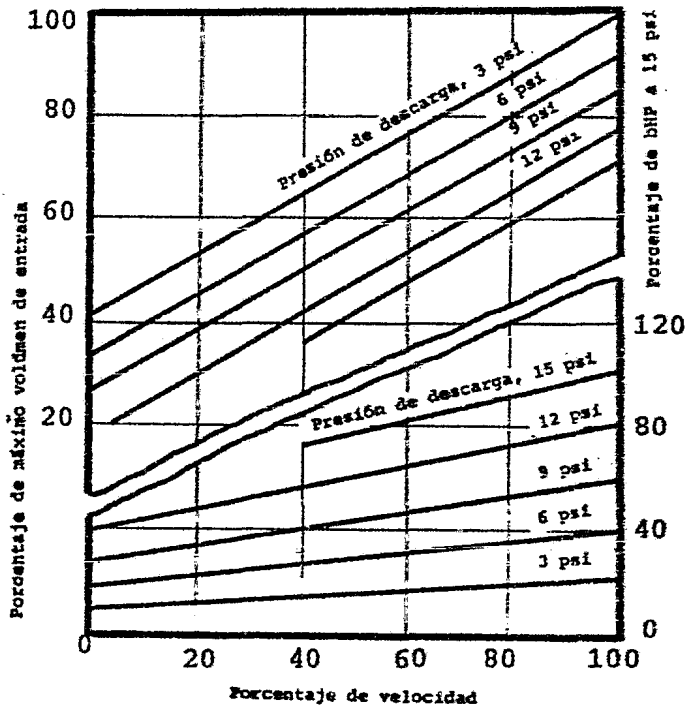


Fig. 41 Curvas de comportamiento para soplador rotatorio desplazamiento positivo



- Ventiladores Centrífugos:

Los ventiladores centrífugos fueron originalmente usados para el transporte neumático de astillas de madera, algodón, papel o algunos otros materiales ligeros o esponjosos.

La presión desarrollada en el ventilador y el volumen de aire manejado a una velocidad determinada, varían de acuerdo a la resistencia al flujo de cada sistema, existen gráficas que manejan los parámetros anteriores, y en las cuales para una misma velocidad nos muestra la variación de potencia con el gasto de aire manejado. Cada velocidad en el ventilador requiere de un juego diferente de curvas para mostrar los cambios en las características peculiares del ventilador a esa velocidad. Estas curvas características se aplican solamente al flujo producido por el ventilador y no a la mezcla aire material.

La principal aplicación de los ventiladores centrífugos en la transportación neumática es en el manejo de material pequeño, operando a vacío o a presión positiva.

De acuerdo a como se instale un ventilador este tendrá

cambios sensibles en su funcionamiento, el ventilador tenderá a operar en otro punto diferente al de su máximo rendimiento, de acuerdo principalmente a la resistencia al flujo específico del sistema. La potencia correspondiente bajará (Fig. 42)

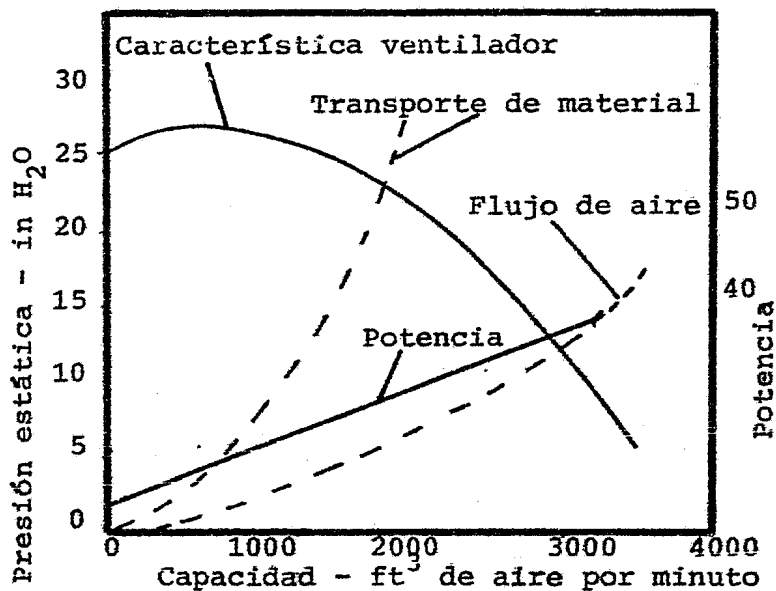


Fig 42 Efecto de las características del sistema en el flujo de aire

Si durante el transporte se perdiera mucho material, el volumen de aire expulsado por el ventilador, bajará tanto que el material se sedimentará en la línea, debido a la

baja velocidad de transporte. Esto requiere que la alimentación de material al sistema esté controlada.

- Selección y potencia de Ventiladores.

La mayoría de los ventiladores usados para transporte neumático son del tipo radial, de hojas planas y ruedas. A una velocidad dada, estos ventiladores generan el mismo volumen de aire, a una determinada presión, medida en ft^3 de aire, sin importar la densidad del aire. La potencia, la presión medida en pulgadas de agua y el peso del aire manejado, variarán con la densidad del aire.

Las medidas y capacidades de los ventiladores, son generalmente seleccionados de tablas, para diferentes medidas, diferentes presiones estáticas, velocidades y H. P. Estas tablas están basadas para condiciones standards de aire. Cualquier variación en temperatura, densidad, etc. afectará directamente la selección adecuada del ventilador. Para todos estos casos deben seleccionarse los factores apropiados de corrección ya sea para temperatura, por presión de entrada (presión atmosférica, ver Tabla de presiones barométricas (Tabla 43) o por cambio de densidad (Tabla altitud-densidad)

TABLA N° 43 / PRESIONES BAROMETRICAS /

Altitud ft.	In-Hg.	Altitud ft.	In-Hg.	Altitud ft.	In-Hg.
0	29.92	4000	25.84	8000	22.22
100	29.81	4100	25.74	8100	22.14
200	29.71	4200	25.65	8200	22.05
300	29.60	4300	25.55	8300	21.97
400	29.49	4400	25.46	8400	21.89
500	29.38	4500	25.36	8500	21.80
600	29.28	4600	25.27	8600	21.72
700	29.17	4700	25.17	8700	21.64
800	29.07	4800	25.08	8800	21.55
900	28.96	4900	24.99	8900	21.47
1000	28.86	5000	24.89	9000	21.38
1100	28.75	5100	24.80	9100	21.30
1200	28.65	5200	24.71	9200	21.22
1300	28.54	5300	24.61	9300	21.14
1400	28.44	5400	24.52	9400	21.06
1500	28.33	5500	24.43	9500	20.98
1600	28.23	5600	24.34	9600	20.90
1700	28.13	5700	24.25	9700	20.82
1800	28.02	5800	24.16	9800	20.74
1900	27.92	5900	24.07	9900	20.66
2000	27.82	6000	23.98	10000	20.58
2100	27.72	6100	23.89	10100	20.50
2200	27.62	6200	23.80	10200	20.42
2300	27.52	6300	23.71	10300	20.34
2400	27.41	6400	23.62	10400	20.26
2500	27.31	6500	23.53	10500	20.18
2600	27.21	6600	23.44	10600	20.10
2700	27.11	6700	23.35	10700	20.02
2800	27.01	6800	23.26	10800	19.95
2900	26.91	6900	23.17	10900	19.87
3000	26.81	7000	23.08	11000	19.79
3100	26.72	7100	23.00	11100	19.71
3200	26.62	7200	22.91	11200	19.64
3300	26.52	7300	22.82	11300	19.56
3400	26.42	7400	22.74	11400	19.48
3500	26.32	7500	22.65	11500	19.40
3600	26.23	7600	22.56	11600	19.33
3700	26.13	7700	22.48	11700	19.25
3800	26.03	7800	22.39	11800	19.18
3900	25.94	7900	22.31	11900	19.10

Con los factores de corrección se calcula la presión estática equivalente.

Con esta presión y con la capacidad (cfm) (cubic feet per minute) se consultan tablas de fabricantes como la siguiente :

Capacidad (cfm)	Velocidad entrada	9 in S.P.		10 in S.P.	
		rpm	H.P.	rpm	H.P.
10,640	3,000	941	21.8	985	24.4

El comportamiento de un ventilador para una capacidad determinada a una velocidad constante, se muestra en curvas características publicadas por los fabricantes. Para cada sistema de trabajo, existe un punto óptimo de operación del ventilador, cualquier aumento en la resistencia al flujo del sistema variará sensiblemente el punto óptimo (ejemplo variación de resistencia al flujo por un aumento de resistencia en un filtro de polvo).

- Cálculo de Potencia de un Compresor.

Existe un método bastante simple para calcular la potencia necesaria de cualquier tipo de compresor, este método se ilustra en la Tabla 44 en donde se muestra la potencia teórica necesaria para comprimir 100 cfm de aire libre a diferentes presiones, desde la presión atmosférica. Para otras condiciones que las mostradas en la Tabla, o otras altitudes deben usarse las correcciones necesarias.

La figura 45 muestra un diagrama teórico de presión contra volumen en un ciclo completo de un compresor, el cual puede ser tomado de una prueba. Las presiones P_1 y P_2 son absolutas de carga y descarga, dependiendo de las condiciones externas del compresor. El volumen restante al final de la carrera del pistón es conocido como espacio muerto V_C , relativamente pequeño comparado con la carrera del pistón vs. Los factores que reducen la cantidad de aire libre en la entrada del compresor son: caída de presión a través de la válvula de entrada y salida de aire, aumento de temperatura del aire al estar en contacto con las paredes calientes del cilindro, y la expansión del aire a alta presión atrapado en el espacio muerto. El volumen V_e representa las condiciones

TABLA 44

H. P. TEORICOS NECESARIOS

Presión de descarga		Compresión Isotermica		Compresión adiabatica			
		paso sencillo		paso sencillo		doble paso	
		Mep+	HP/100ft ³ teoricos	Mep	HP/100 Ft ³ teoricos	Mep psi Baja presión	HP/100ft ³ teoricos
Psig	Psia						
1	19.7	4.13	1.8	4.48	1.96		
10	24.7	7.57	3.3	8.21	3.58		
15	29.7	10.31	4.5	11.4	5.0		
20	34.7	12.62	5.5	14.3	6.2		
25	39.7	14.66	6.4	16.9	7.4		
30	44.7	16.30	7.1	19.2	8.4		
35	49.7	17.90	7.8	21.4	9.3		
40	54.7	19.28	8.4	23.4	10.2		
45	59.7	20.65	9.0	25.2	11.0		
50	64.7	21.80	9.5	27.0	11.8		
55	69.7	22.95	10.0	28.7	12.6		
60	74.7	23.90	10.4	30.3	13.3		
65	79.7	24.80	10.8	31.9	13.9		
70	84.7	25.70	11.2	33.3	14.6	29.2	12.8
75	89.7	26.62	11.6	34.7	15.2	30.3	13.3
80	94.7	27.52	12.0	36.0	15.7	31.3	13.7
85	99.7	28.21	12.3	37.3	16.3	32.3	14.1
90	104.7	28.93	12.6	38.6	16.9	33.2	14.5
95	109.7	29.60	12.9	39.8	17.4	34.2	14.9
100	114.7	30.30	13.2	40.9	17.9	35.0	15.3
110	124.7	31.42	13.7	43.2	18.9	36.7	16.1
120	134.7	32.60	14.2	45.2	19.8	38.3	16.8
130	144.7	33.75	14.7	47.2	20.7	39.6	17.3
140	154.7	34.67	15.1	49.2	21.5	40.8	17.9
150	164.7	35.59	15.5	51.0	22.3	42.3	18.5

* Basada con una relación de CP/Cv de 3947.

+ Presión efectiva deseada

(Tomada de Compressed Air and Gas Handbook, 1973.)

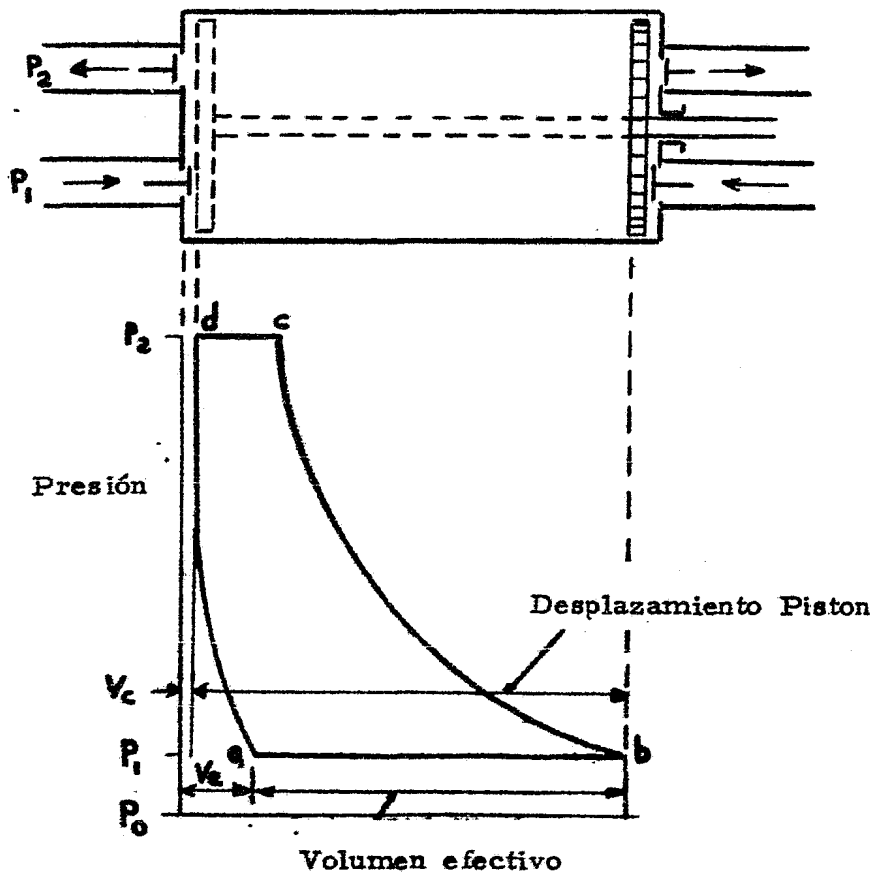


Fig. 45 Diagrama teorico Presión - Volumen

del aire a alta presión atrapado en el espacio muerto.

El volumen V_e representa las condiciones del aire de espacio muerto después del instante en que se abre la válvula de entrada. La curva d-a de re-expansión es generalmente expresada por la curva exponencial $Pv^{1.35} = c$. La línea CP es la presión en el cilindro durante al salida antes de la compresión.

La potencia necesaria por ciclo puede ser calculada directamente del área del diagrama.

$$W = \int_b^e V dp - \int_a^d V dp$$

$$\int_b^a V dp = \frac{\eta}{\eta-1} P_b V_b \left[\left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{\eta-1}{\eta}} - 1 \right] \quad \eta = 1.35$$

$$\int_a^d V dp = \frac{\eta'}{\eta'-1} P_a V_a \left[\left(\frac{P_d}{P_a} \right)^{\frac{\eta'-1}{\eta'}} - 1 \right] \quad \eta' = 1.2$$

si se toma el exponente η' igual a η , combinamos las dos ecuaciones anteriores y obtenemos la ecuación para trabajo por ciclo

$$\text{TRABAJO INDICADO POR CICLO} = \frac{\eta}{\eta-1} P_b (V_b - V_d) \left[1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{1/\eta} \right] \times \left[\left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{\eta-1}{\eta}} - 1 \right]$$

donde:

$V_b - V_d$ = desplazamiento del pistón por carrera.

$$\left[1 + C - C \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{1/n} \right] = \text{EFICIENCIA VOLUMETRICA}$$

C = relación de espacio muerto.

El área del diagrama es equivalente a los términos $P_m L A$ en la siguiente fórmula para calcular la potencia en H. P.

donde:

$$\text{H.P.} = \frac{P_m L A N}{33,000}$$

P_m = Presión media efectiva

L = Carrera del Pistón

A = Area del Pistón

N = No. de carreras x minuto.

N = rpm para efecto sencillo

N = rpm x 2 para doble efecto.

Una vez instalado el compresor es recomendable evaluar su capacidad real de descarga.

La manera más sencilla y aproximada es introducir el aire en un tanque de volumen conocido, se incrementa la presión en el Tanque en dos intervalos predeterminados simultáneamente se efectúan lecturas de temperatura y presión en el Tanque. El peso del aire bombeado durante el intervalo $W_2 - W_1$ es calculado por medio de la ecuación de los gases perfectos, siendo V el volumen del Tanque

$$W_2 - W_1 = \frac{V}{R} \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right)$$

$W_2 - W_1$ Incremento de peso en Δ segundos (lbs. peso).

Este peso se convierte mediante un factor a lb/min. y utilizando la siguiente fórmula a cfm (cubic feet per minute, pies cúbicos por minuto)

$$\text{cfm} = \frac{\text{lb/min}}{\text{densidad aire}}$$

El método anterior es aproximado debido principalmente a las variaciones en la medición de temperatura.

4.3. SELECCION DE ALIMENTADORES ROTATORIOS.

Los alimentadores rotatorios de cualquier tipo de sistema de transporte neumático, constituyen una parte esencial, el buen funcionamiento de todo el equipo depende directamente del funcionamiento del alimentador.

A continuación se enunciarán los factores más importantes que deben ser tomados en cuenta para una correcta selección del alimentador rotatorio.

Un alimentador, podrá tener diferentes funcionamientos de acuerdo al tipo de sistema en el cual se esté trabajando.

Enseguida se analizarán las cuatro diferentes maneras de operación de un alimentador.

En sistemas de Presión (como sello de aire).

Cuando el alimentador funciona como sello de aire, sus objetivos son, minimizar la corriente de aire entre los dos puntos con diferente presiones, (Parte inferior de la Tolva, y la línea de Transporte), mientras permite el

paso continuo de sólidos secos. Son cuatro los factores principales que afectan la pérdida de aire a través del alimentador:

- + La presión diferencial entre la entrada y la salida.
- + El espacio entre el rotor, la envoltura y las placas finales.
- + Las medidas del alimentador.
- + Y por último el número de cuchillas en el rotor del alimentador.

La pérdida de aire es muy importante cuando se utiliza el alimentador, en esta función, ya que al escaparse el aire que se utiliza para transportar el material, se ocasiona una disminución considerable en la eficiencia volumétrica del alimentador.

- Como alimentador (Servicio Atmosférico).

Cuando un alimentador funciona únicamente como proveedor

de material al sistema, su propósito es regular el fluido continuo de los sólidos secos de un lugar a otro. Como resultado, las medidas y las rpm del alimentador deberán ser exactas y dentro de los límites del diseño para el cual no se deberá tomar en cuenta la presión diferencial y la pérdida de aire, debido a que el alimentador no estará en contacto directo con el sistema de transportación.

Los factores que afectan la capacidad del alimentador usado únicamente como tal, son los siguientes:

Se debe considerar el desplazamiento del rotor, o sea el volumen que puede ser entregado por este, si el rotor gira a muy altas rpm, los espacios entre las cuchillas, no se llenarán ocasionando una baja sensible en la eficiencia volumétrica del alimentador.

Asimismo será de importancia la densidad del material, generalmente materiales más pesados, gravitan más en los espacios entre cuchillas, lo que afecta la velocidad del rotor.

Otro factor importante es la eficiencia volumétrica siendo esta última la relación entre el desplazamiento de material

calculado y el entregado realmente para un determinado tipo de material. Los elementos que afectan dicha eficiencia son: el área del alimentador, pérdidas de aire (aplicación como sello de aire), diseño de rotores, los espacios entre cuchillas poco profundos se llenan más fácilmente que los largos y, el tipo de equipo arriba del alimentador.

La capacidad de un alimentador rotatorio puede ser expresada por la siguiente fórmula:

Capacidad $\left(\frac{\text{lb}}{\text{min.}} \right) = \text{Velocidad del rotor (rpm)} \times \text{desplazamiento del rotor (cu. ft./rev)} \times \text{pérdida por cambio en la densidad de masa (lb/cu.ft)} \times \text{eficiencia volumétrica del alimentador rotatorio.}$

Un alimentador utilizado únicamente como tal, generalmente se instala abajo de la tolva almacenadora llena de material y llevando el mismo a un transportador de banda ϕ de tornillo.

- En sistemas de presión negativa (vacío).

La función de un alimentador en sistemas de vacío es semejante a la del sistema anterior; excepto que el alimentador regula el fluido del material dentro del sistema vacío. Para los propósitos prácticos, la pérdida de aire a través del alimentador funcionando a vacío es mínima, porque la presión diferencial será en la misma dirección, que la corriente del material. En estos sistemas se tendrá una excelente eficiencia volumétrica, debido a que el vacío en el sistema estará asistiendo al flujo de material. Por lo anterior deberá tomarse especial cuidado al diseñar las medidas del alimentador, pues la eficiencia volumétrica del mismo aumentada, tiende a sobre-alimentar el sistema, taponeandolo eventualmente.

- Consideraciones acerca del medio ambiente.

El segundo aspecto que se debe considerar antes de seleccionar un alimentador son las condiciones del medio ambiente en las que operará el alimentador. En muchos procesos, la temperatura ambiente puede llegar arriba de 130° F normalmente, aunado a la alta temperatura con la que se maneja el material. Ambos aspectos deben considerarse antes de seleccionar un alimentador; ya que afectan seriamente diferentes características como son: los sellos de rotor, y la

lubricación principalmente. Asimismo, la exposición del material a condiciones de humedad, pueden afectar seriamente la fluidez del material, así como producir atascamiento o corrosión en el interior del alimentador.

- Consideraciones acerca de las características físicas del material.

Este es el tercer aspecto que se debe considerar antes de seleccionar un alimentador. A continuación, se enuncia una lista descriptiva de las características físicas del material que pueden afectar de una manera y otra el funcionamiento de un alimentador rotatorio.

+ **Fluidez . -** Los materiales pegagosos, adhesivos, debido a la presión, tenderán a amontonarse, afectando seriamente la fluidez . El alimentador no es una bomba de succión, por lo que el diseño de la tolva alimentadora arriba del alimentador deberá permitir el flujo de material por gravedad dentro del alimentador.

+ **Abrasividad.** Un alimentador rotatorio es una pieza maquinada con gran precisión para minimizar las pérdidas de aire. Si el material es abrasivo, se hará un diseño

especial de alimentador, o de lo contrario se efectuará un rápido desgaste del rotor, o de los empaques de las cuchillas.

+ Corrosión. Los materiales corrosivos pueden afectar al hierro o al acero, al carbón a temperaturas normales, o condiciones de humedad. Estos materiales requerirán, de una selección especial de materiales de construcción, como el acero inoxidable o otros. También algunos materiales desprenden gases que por sí mismos pueden causar daños.

+ Temperatura. La temperatura del material puede afectar drásticamente las tolerancias del alimentador, debido a que se expande el material de construcción, afectando también la vida de los sellos del rotor.

+ Degradación. Si el material a manejarse es fácilmente degradable, esto podría afectar directamente el funcionamiento del alimentador. Esto ocurre debido a la fuerza a la que se somete el material, mientras pasa por las cuchillas. En estos casos se podrá colocar un protector, en la parte superior para evitar el cizallamiento

del material.

+ Adherencias. Algunos materiales tienden a formar adherencias en las cuchillas del rotor, lo que ocasiona severas fuerzas de torsión en la flecha del rotor.

Ejemplos típicos de materiales que tienden a crear dichos efectos son por ejemplo azúcar, polietileno, fosfatos, Óxido de antimonio, leche en polvo, etc.

+ Densidad. Para materiales ligeros o esponjosos con densidades abajo de 23 lb/ft^3 , se tendrá que especificar un alimentador con dimensiones especiales y bajas rpm en el rotor. No se deben usar altos vacíos a presiones diferenciales, que reducirán la eficiencia del alimentador y evitaran que el material esponjoso caiga en la entrada del mismo. Ejemplo de materiales ligeros: arroz, salvado, trigo y germen de maíz, etc.

En resumen para efectuar una correcta selección de un alimentador rotatorio, la marca Young recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Características del Producto.

El producto a manejar establece la primera consideración a ser hecha.

- es polvo, granular, en forma de hojuelas, etc.
- abrasividad
- adhesividad.

2. Los alimentadores pueden ser usados de dos maneras, dosificando la entrada de material o simplemente descargándolo.

3. Volumen y peso.

Estos aspectos determinan el tamaño del alimentador. Primero se determina el peso del producto en lb/ft^3 y el volumen necesario en ft^3/hr .

La capacidad de salida es calculada de la siguiente manera:

$$\text{Capacidad (lb/hr)} = \text{Densidad (lb/ft}^3) \times \text{Vol. (ft}^3/\text{hr)}$$

Para determinar el rango de capacidad de salida se usa:

$$\text{Capacidad alimentador (ft}^3\text{/hr)} = \text{Capacidad Rotor} \\ (\text{ft}^3\text{/rev)} \times \text{RPM} \times 60 \frac{\text{rev}}{\text{hr}}$$

4. Diferencia de presiones a través del rotor.
5. Temperatura de uso.

Con los datos anteriores se procede a seleccionar el alimentador rotatorio mediante el uso de Tablas, dependiendo del fabricante.

4.4.1 COLECTORES DE BOLSAS.

Para la separación de polvo en la industria se usan filtros hechos de fibras sintéticas o naturales. Estos elementos de filtrado son bolsas y el lugar donde se encuentran instalados se les conoce comunmente como " Baghouse ".

Además de las bolsas de filtrado se dispone de deflectores

para dirigir el aire dentro o fuera de estos elementos, equipos de limpiado; tolvas de recolección de polvos o zonas de descarga de polvos.

Estos colectores se emplean en el control de polvos cuando se descarga aire a la atmósfera después de algún proceso, o para recobrar polvos muy caros en procesos con venteo. Los tamaños son muy variables, de tolvas pequeñas de filtrado, hasta largos compartimientos de filtros, con recibidores o largos ductos de recolección.

El tamaño y la selección de filtros de polvos está basado en pasadas experiencias y en actuales pruebas hechas por los fabricantes con diferentes tipos de aire y polvo, debido a que existen numerosas propiedades que afectan el efecto de filtrado.

PRINCIPIO DE LA SEPARACION EN FILTROS.

El aire pasa a través del filtro donde el polvo es retenido en la superficie, al mismo tiempo que se reduce el área de filtrado, formando una capa de polvo y reduciendo el paso del flujo. La limpieza de estos filtros se efectúa por medio de aire, el cual mueve el filtro o simplemente por el mismo paso del aire que empuja la capa de polvo.

El criterio para escoger el filtro es mediante la llamada relación aire-tela, esta es la relación que existe en el flujo continuo que pasa por la tela con respecto al área.

El sistema de limpieza de los "baghouse" se clasifica como continuo o intermitente.

PROPIEDADES DE LOS FILTROS.

Las propiedades que deben cumplir los filtros son las siguientes:

- Permeabilidad. El filtro debe tener porosidad suficiente, para que permita el flujo de aire. La permeabilidad

del tejido es generalmente una condición que depende del flujo de material-aire en $\frac{ft^3/min}{ft^2}$ de tejido con una presión diferencial de $0.5^* H_2O$, la cual fue determinada por la prueba de Frazier. La permeabilidad de Frazier no es una guía para la selección del filtro, debido a que, materiales con la misma permeabilidad, difieren en otras características para el filtrado.

- RESISTENCIA MECANICA. Los tejidos deben resistir las fuerzas de tensión causadas por la diferencia de presiones durante la operación por el sacudimiento para la limpieza o por el movimiento pulsante del flujo de aire de regreso.

- RESISTENCIA A LA CORROSION. El filtro debe resistir al ataque y la reacciones químicas que se ocasionan entre las fibras y los materiales filtrados.

- RESISTENCIA AL CALOR. Para los procesos, que tienen temperaturas altas de escape, los filtros deben resistir estas temperaturas, cada tejido tiene diferentes temperaturas, máximas de operación.

- LIMPIEZA. Los tejidos deben tener una superficie rápida de limpiar. Debido a que si no se limpian rápido se forman capas de material lo cual complica el filtrado. Además deben tener un alto rango de disipación de cargas electrostáticas.

- DIMENSIONES ESTABLES. El tejido debe resistir el encogimiento o alargamiento, lo cual cambiaría el efecto de permeabilidad.

- SELECCION DE FILTROS.

Especificaciones del proceso. Es necesario obtener la información del polvo que se va a manejar en el proceso, debido a que con esta información sabremos de que tipo, será el tejido a utilizarse. Los datos y especificaciones que se deben tener para escoger la tela y el filtrado, tanto físicos como químicas son: la densidad, el tamaño de partícula, temperatura, contenido de mezcla, el PH o si es corrosivo, tóxico, abrasivo o si tiene cargas -

electrostáticas.

Otros datos que son necesarios se incluyan para el sistema de colección de polvos son: el medio de transporte la mezcla aire-material, la caída de presión a través de las bolsas filtradoras la presión máxima de diseño.

- ESPECIFICACIONES MECANICAS . Los factores que intervienen en las especificaciones mecánicas son :

construcción, localización de los accesos, el tamaño del colector, métodos de fabricación, tipos de protección contra fuego o explosión, accesos de plataforma, soportes estructurales, tipos de pintura.

- ESPECIFICACIONES ELECTRICAS. Los tipos de especificaciones necesarios son, tipos de controles que se van a usar para los diferentes instrumentos eléctricos, como finners, relevadores, datos del motor, etc.

RANGO ESTIMADO DE FILTRADO.

La guía para estimar el rango de filtrado consta de cinco factores que son:

- FACTOR MATERIAL, F_m . De la tabla 47 se obtienen las propiedades y características del material, o la tendencia a formar plastas de filtrado durante un flujo normal de aire-material.

- FACTOR DE APLICACION, F_a . De la tabla 48 tendencia del material a causar pandeo de las fibras por aplastamiento.

- EFECTO DE TEMPERATURA, o . De la figura 49, la compensación de la viscosidad del aire a altas temperaturas, previniendo la expansión.

- FACTOR DEL TAMAÑO DE PARTICULA, F_f . De la Tabla 50 las partículas con mayor tamaño tendrán una mayor facilidad para filtrarse que las pequeñas.

- FACTOR DEL EFECTO DE CARGA-POLVO, F_d . De la figura 51 es la típica curva de rendimiento, la cual se aplica a este tipo de colectores de polvos a presión diferencial constante.

TABLA 47 FACTOR DE MATERIAL F_m

<u>15</u>	<u>12</u>	<u>10</u>	<u>9</u>	<u>6</u>
Polvo carbon	Asbestos	Alumina	Fertilizantes	Carbon activado
Cocoa	Fibras	Carbon fino	Coque	Carbon negro M.
Alimentos	Celulosas	Cemento	Tierra	Detergentes
Flour	Yeso	Cerámicas	Oxidos metal	LEche en polvo
Granos	Cal	Fluorita	Pigmentos	Jabónes en polvo
Aserrín	Perlita	Hulla	Plásticos	
Tabaco	Sal	Caolín	Resinas	
	Arena	Piedra cal	Silicátos	
	Sosa	Sílica		
	Talco	Azúcar		
		Polvos roca		

TABLA 48 FACTOR DE APLICACION

<u>PROCESO</u>	<u>FACTOR F_a</u>
Relevo de puntos de transferencia, transportadores, estaciones de empaque .	1.0
Colección de productos Secadores, clasificadores Venteo aire de transpote	0.9
Filtración del gas de proceso Secadores de rocío, hornos reactores	0.3

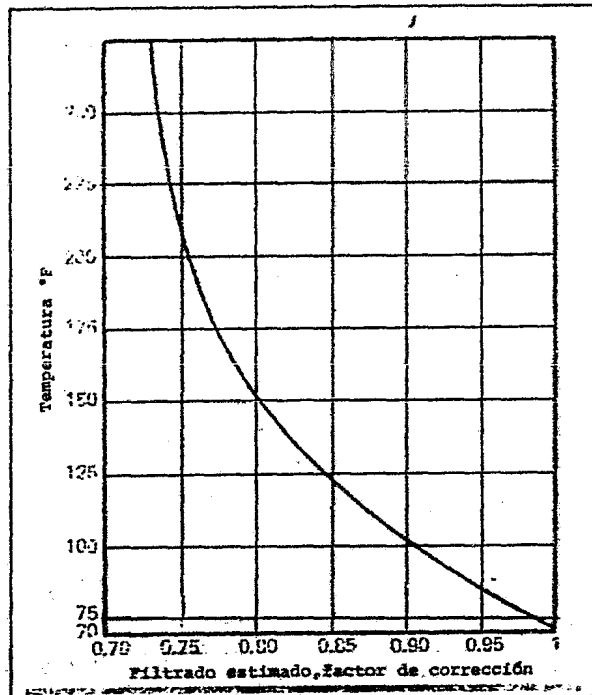


Fig. 49 FACTOR DE CORRECCION POR TEMPERATURA

<u>TAMAÑO</u>	<u>FACTOR F_f</u>
Más de 100 micrones	1.2
de 50 a 100 micrones	1.1
de 10 a 50 micrones	1.0
de 3 a 10 micrones	0.9
menos de 3 micrones	0.8

TABLA 50 FACTOR DEL TAMAÑO DE PARTICULA

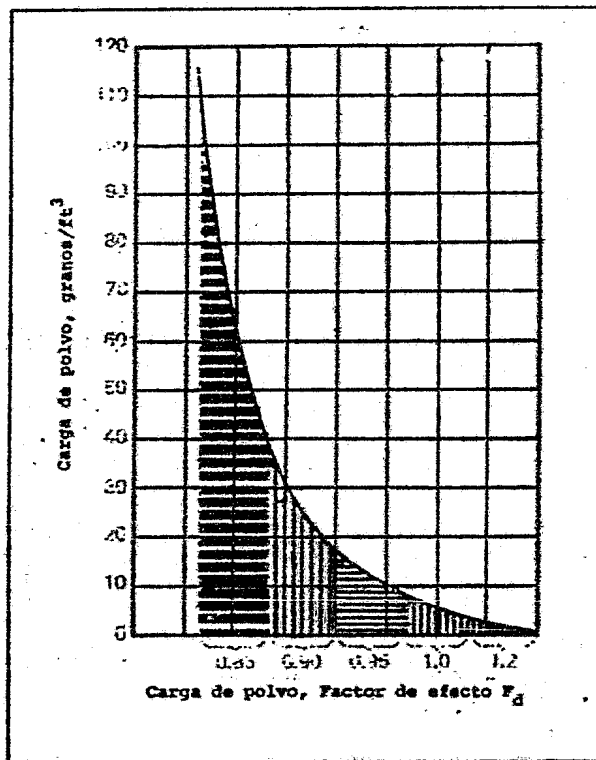


Fig. 51 FACTOR F_d PARA EL EFECTO DE LA RELACION POLVO-CARGA

CALCULO DEL AREA DE FILTRADO.

El cálculo del área de filtrado está basado experimentalmente. Uno de los factores que afectan directamente al área de filtrado, es la temperatura, debido a que con el aumento de esta aumenta directamente la viscosidad del fluido,

En general el factor de corrección para el rango de filtrado es:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

Donde:

F_1 = Es el rango de filtrado a la temperatura y con una caída de presión de 3.5" H₂O.

F_2 = Es el factor de corrección, del rango de filtrado

ϕ_1 = Es el factor de corrección del rango de filtrado para la temperatura ambiente.

ϕ_2 = Factor de corrección del rango de filtrado a la temperatura deseada.

Después de corregir el rango de filtrado por temperatura, por separado se calcula la expansión del aire debido a la alta temperatura y así se obtiene el actual rango filtrado.

El área de filtrado para colectores de polvos a tamaño lleno, se basa en datos experimentales y se calcula como sigue:

$$A_c = V_T / F_2 F_a$$

Donde:

A_c = El área total de la tela ft^2

V_T = El volumen total del gas a la temperatura de operación ft^3/min

F_2 = Es el correcto rango de filtrado.

F_a = Es la aplicación del factor de corrección de la tabla 48.

4.4.2 CICLONES

Dentro de los diferentes aspectos que intervienen en el diseño, Lfith y Licht crearon un nuevo enfoque teórico que predice el grado de eficiencia de las diferentes propiedades físicas y los parámetros que afectan el diseño del ciclón, asimismo predice las curvas de eficiencia de colección. Sin embargo esta teoría no se aplica a altas velocidades de entrada o cuando se trata de flujo constante.

Predice una eficiencia del 100 % mientras la velocidad se acerca al infinito, debido a que las partículas se arrastran a velocidades.

Investigando la conducción de partículas en tuberías horizontales, Zenz, estableció un modelo experimental para la velocidad de saltación de partículas en términos del Número de Reynolds y el coeficiente de arrastre. Extendiendo la relación al diseño de ciclones, el modelo de Kalen y Zenz, predice un valor óptimo para la velocidad de admisión para la velocidad en la cual el arrastre de partículas se vuelve importante.

El punto de vista presentado, combina el método teórico

de eficiencia de colección de Lith y Licht con la relación de velocidad de saltación propuesto por Kalen y Zenz. De la interrelación de estos modelos, resulta un diseño de ciclón óptimo con un mínimo de cálculos al tanteo. Se presenta un método para determinar gráficamente la velocidad óptima de admisión y el diámetro del ciclón para lograr la operación deseada. Este nuevo punto de vista es eficaz para un diseño inicial ya que simplifica, todos los métodos complicados de control de polución de aire.

- CALCULO DE LA EFICIENCIA DE COLECCION.

Para calcular la eficiencia de colección del ciclón hallada por Lith y Licht, la cual está basada en flujo continuo radial, "backmixing" en la recolección, junto con un cálculo del tiempo promedio de permanencia del gas en el ciclón, teniendo una admisión tangencial. La tabla 52 presenta un ciclón típico con todas las dimensiones relativas de varios diseños.

La eficiencia "gradual" o "fraccional" del ciclón puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$(4.1) \quad \eta_e = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{0.7 \eta_e Q}{D_c^3} (n+1) \right]^{0.5 / (n+1)} \right\}$$

$$(4.2) \quad \tau_e = \rho_p (d_p)^2 / (18 \mu)$$

$$(4.3) \quad G = 8 K_c / K_a^2 K_b^2$$

N_c = Eficiencia gradual

G = Factor de forma del ciclón

T_i = Relación de tiempo (seg.)

Q = Flujo total de aire

D_c = Diámetro ciclón

ρ_p = Densidad de partícula

μ = Viscosidad fluido

d_p = Tamaño de partícula

K_c = Constante de volumen de ciclón

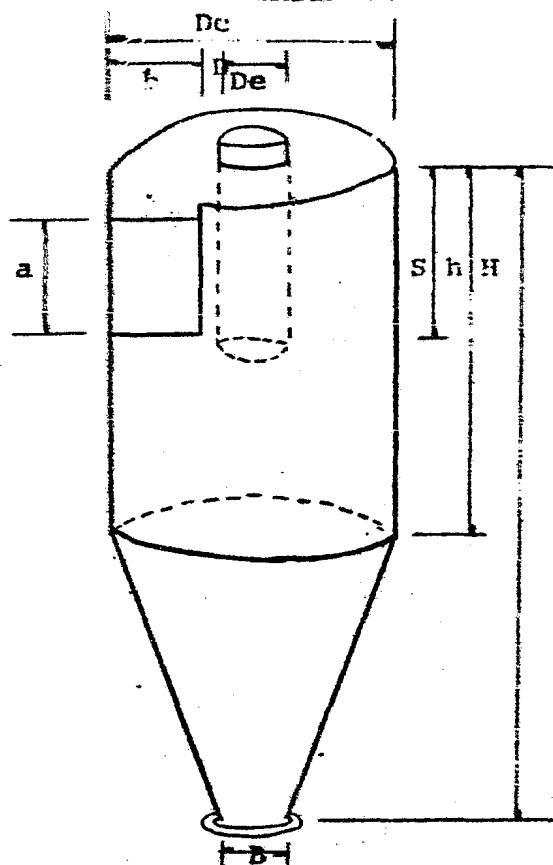
K_a = a/D_c

a = Altura de entrada

K_b = b/D_c

b = Ancho de entrada.

TABLA 52



ALTA EFICIENCIA

USO GENERAL

NOMENCL.	STAIRMAND	SWIFT	LAPPLE	SWIFT	PETERSON&WHITBY
Dc Diam. ciclón	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a Altura entrada	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583
b Ancho entrada	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208
S Largo salida	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
De Diam. salida	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
h Altura cilindro	1.5	1.4	1.2	1.75	1.333
H Altura total	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
B Diam. sal. polvos	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5
I Largo natural	2.48	2.04	2.30	2.30	1.80
$G \frac{8K_c}{K_a^2} / K_b^2$	551.300	699.20	402.90	381.80	324.800
$N_H \frac{16ab}{D_e^2}$	6.40	9.24	8.00	8.00	7.76
G / N_H	86.14	75.67	50.36	47.70	41.86

TABLA 52 CONFIGURACIONES DE DISEÑO PARA UN CICLÓN DE ENTRADA TANGENCIAL

El exponente N de vórtice puede ser calculado, como una función del diámetro del ciclón, con D_c en pies, y temperatura T en grados °F

$$(4.4) \quad \eta = 1 - \left[1 - \frac{(12D_c)^{0.14}}{2.5} \right] \left[\frac{T+460}{530} \right]$$

El factor de configuración del ciclón "G" es solo una función de la configuración especificada por los siete radios geométricos que describen su forma. Se conoce que la eficiencia de recolección aumenta con mayor cantidad de carga de polvo el modelo "G" no toma en cuenta la variable adicional.

Las eficiencias "graduales" pueden calcularse como una función de los parámetros de diseños del ciclón y de las condiciones de operación. Para encontrar el rendimiento total de una determinada distribución de partículas se usa la ecuación (4.5)

$$(4.5) \quad \eta_T = \sum m_i \eta_i$$

Este modelo es el resultado de experimentos observados, se predice un aumento en la eficiencia con un aumento

en la densidad de las partículas, en la velocidad de admisión o en la altura del ciclón, la eficiencia baja con el aumento de la viscosidad del fluido, el diámetro del ciclón, el de salida o el ancho de la admisión. Las figuras 53, 54 y 55 presentan cálculos de curvas típicas de eficiencia gradual para el diseño Stairman (Tabla 52) como una función del tamaño de las partículas, velocidad de admisión y diámetro del ciclón, también se muestra como depende la eficiencia gradual de la densidad de las partículas y de la temperatura del fluido.

A pesar de que los aumentos de eficiencia para una mayor densidad pueden ser determinados directamente con las ecuaciones 4.1 y 4.2. Los efectos de la temperatura son un poco más complicados. Un aumento en la temperatura aumenta la viscosidad del fluido, lo cual baja la magnitud del tiempo de descarga (Y), por lo que el exponente de vórtice también disminuye, ocasionando una baja en la eficiencia.

Las figuras 54 y 55 demuestran que el efecto de la temperatura en la eficiencia, es mucho menor que el de la densidad de las partículas. La magnitud de ambos efectos

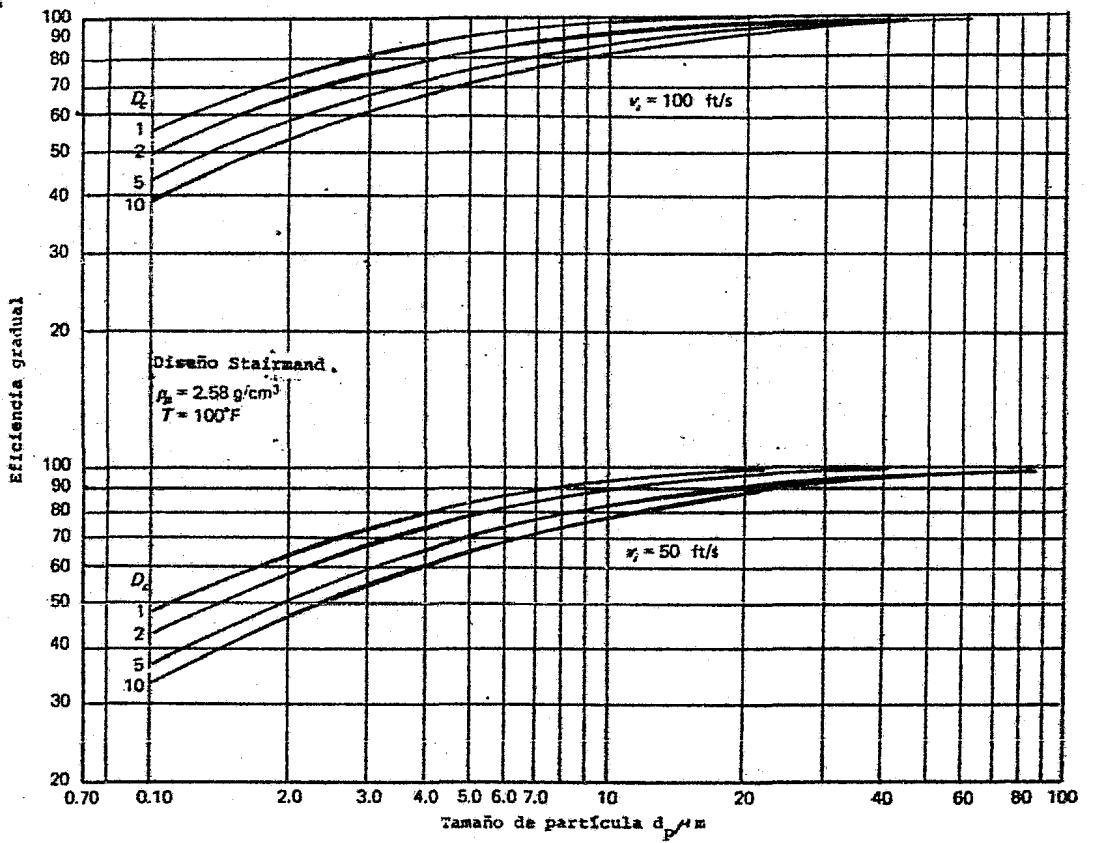


Fig. 53

Eficiencia gradual para el ciclón stairmand relacionada con tamaño de partícula, veloc. de entrada y diámetro del ciclón

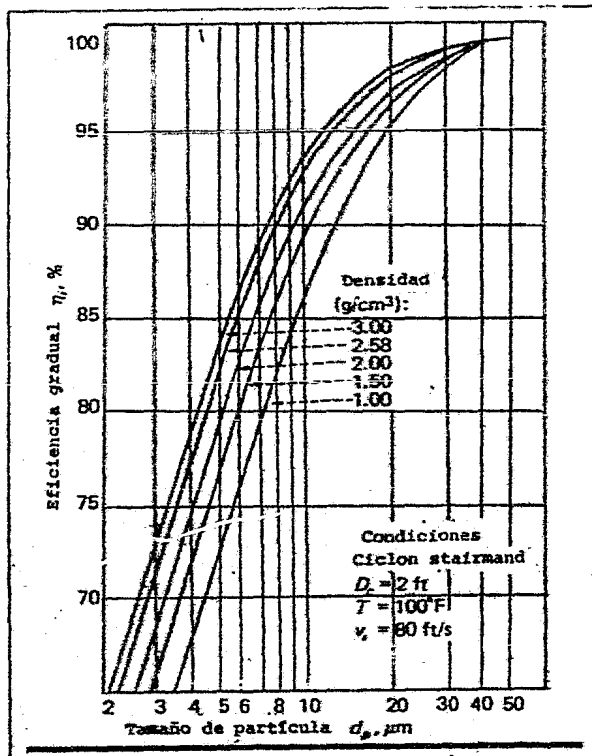


Fig. 54

Eficiencia gradual - densidad de partícula

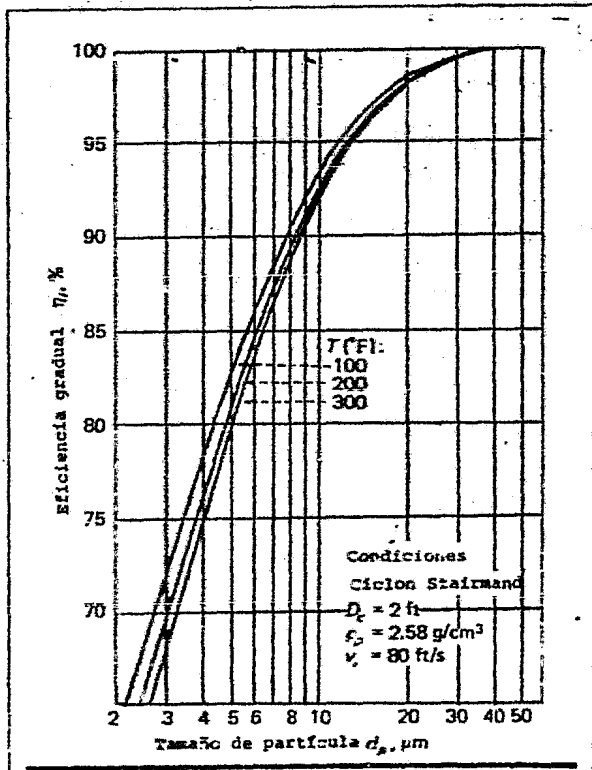


Fig. 55

Efecto de la temperatura

T A B L A 56

DISTRIBUCION ESTANDAR PARA TAMAÑO DE PARTICULA

<u>Diam Part</u>	<u>PARCENTAJE POR PESO</u>			
	<u>Superfino</u>	<u>Fino</u>	<u>Grueso</u>	<u>Ej.</u>
150	-	100	-	-
104	-	97	-	-
75	100	90	46	94
60	95	80	40	92
40	97	65	32	86
30	96	55	27	79
20	95	45	21	67
15	94	38	16	58
10	90	30	12	44
7.5	85	26	9	34
5.0	75	20	6	22
2.5	56	12	3	8

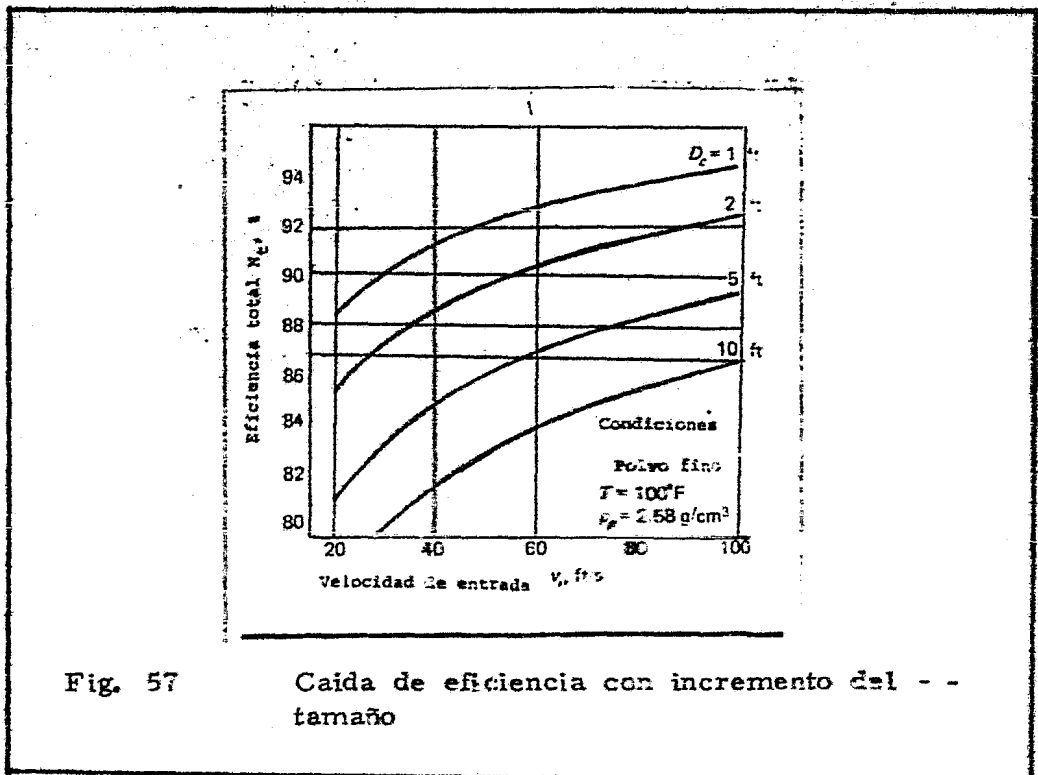


Fig. 57

Caida de eficiencia con incremento del tamaño

disminuye con el aumento del tamaño de las partículas. La figura 57 revela el cálculo del rendimiento total de recolección de un ciclón Stairmond, tratando "polvo fino" de acuerdo a la Tabla 56.

- EFECTO DE LA VELOCIDAD DE SALTACION.

El concepto de saltación se produce en el transporte de sólidos en tuberías horizontales. La velocidad se puede definir en varias formas una de las cuales se aplican en el diseño de ciclones.

Es la velocidad mínima del fluido necesario para prevenir la sedimentación de partículas sólidas, llevadas por la corriente.

- Zenz desarrollo una correlación, relacionando la velocidad de saltación en tuberías con las propiedades de las partículas y fluidos.

$$4.6 \quad V_s/W = (\text{constante}) (d_p/A)^{S_A}$$

En la ecuación (6), la constante de saltación, S_A , depende de la distribución del tamaño de partícula y de la forma de la misma, y "W" y "A" son función del fluido y de las

propiedades de la partícula. Datos experimentales indicaron una fuerte dependencia en la geometría de la partícula.

Para aplicar el concepto de saltación y la correlación al diseño de ciclones, Kalen y Zenz, realizaron las siguientes anotaciones.

- 1) No hay pérdidas de velocidad entre el fluido y las partículas.
- 2) En la línea de entrada del ciclón, es efectivo el diámetro de la tubería para el cálculo del efecto de saltación.
- 3) La carga de grano es menor a 10 granos/ft^3
- 4) El efecto del diámetro en la velocidad de saltación es proporcional al 0.4 de la fuerza en el ancho de la entrada.

En vista de los datos experimentales de Zenz, la cuarta suposición representa una aproximación que, al aumentar la forma esférica de las partículas, se torna mas precisa. Si se dá el tamaño de las partículas como equivalente

al diámetro esférico aerodinámico, se debe aumentar la efectividad del modelo.

Para aproximar el volumen del fluido adentro del ciclón, con un modelo de tubería de serpentín, Kalan y Zenz, revelan una correlación empírica para la velocidad de saltación.

$$(4.7) \quad \frac{V_s}{w(\text{No de } g_s)^{1/3}} = 5.19 b^{0.4}$$

$$(4.8) \quad w = \left[4gM (P_p - P_f) / 3 \rho_f^2 \right]^{1/3}$$

$$(4.9) \quad \text{No de } g_s = \sqrt{L} / 32.2 r$$

$$(4.10) \quad r = 1/2 (D_c - b)$$

Definiéndola en tamaño dimensional a la relación b/D_c y substituyéndola en las ec. 5.8, 5.9 y 5.10 e introduciéndolas en 4.7.

$$(4.11) \quad V_s = 2.055 w \left[\frac{b/D_c}{(1-b/D_c)^{1/3}} \right] D_c^{0.067} V_c^{2/3}$$

donde:

$W = Ec \ 4.8 \text{ (ft/seg)}$

$gs = \text{aceleración de la gravedad } 32.2 \text{ ft/seg}^2$

$r = \text{radio efectivo.}$

Entonces, la velocidad de saltación está en función de las propiedades del fluido, de la partícula y también de las dimensiones del ciclón.

Kalen y Zenz, muestran que la máxima eficiencia de colección ocurre cuando $v_i/v_s = 1.25$ y Zenz determina experimentalmente que ocurre cuando $v_i/v_s = 1.36$.

En la figura 58 se muestra la relación v_i/v_s calculada con la ecuación 4.11 en función de la velocidad de entrada y diámetro del ciclón, para una relación de entrada de $b/D_c = 0.2$.

Los rangos más comunes aceptables de velocidades de entrada de trabajo son de 50 a 90 ft/seg dependiendo del diámetro del ciclón.

La figura 59 muestra el factor de corrección para la relación v_i/v_s por temperatura y densidad de la partícula,

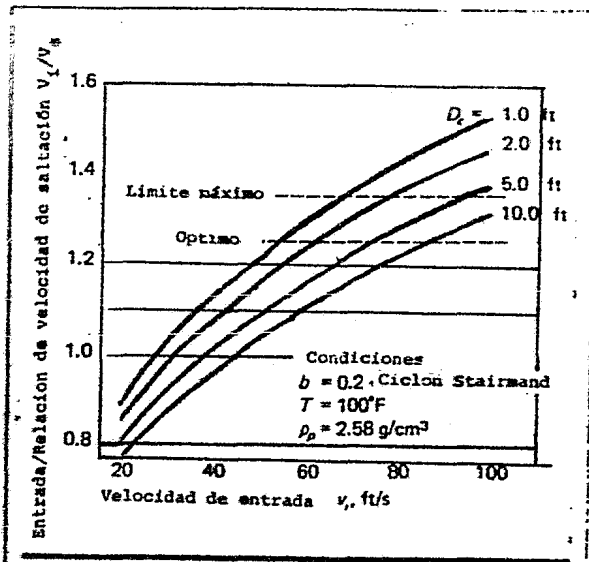


Fig. 58

Relación V_i/V_s en función de la velocidad de entrada y diametro del ciclon

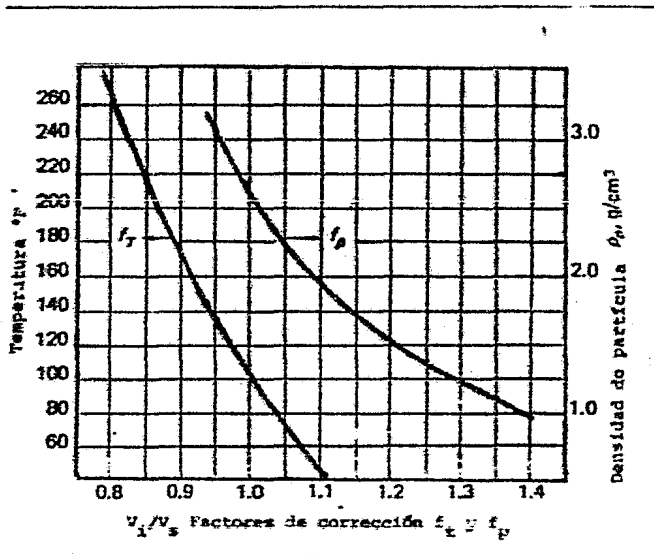


Fig. 59

Factor de corrección por temperatura

usando $T = 100^{\circ}\text{F}$ y $\rho_p = 2.58 \text{ g/cm}^3$,

Para obtener la correcta relación $\frac{V_i}{V_s}$ se puede calcular con la ecuación 4.12.

$$(4.12) \quad V_e/V_s = f_r f_p (V_i/V_s)$$

Los factores de corrección f_r y f_p , son por temperatura y por densidad.

Donde:

V_i = Velocidad de entrada

V_s = Velocidad de saltación.

- CALCULO DE LA CAIDA DE PRESION.

Es necesario obtener, basándose en la eficiencia de colección, un cálculo correcto de la caída de presión.

Un rango de operación es aceptable con magnitudes de 10 in de agua o menos.

Las teorías de caídas de presión realizadas por Stroussy en comparación con las enunciadas por Leith y Mehta, revelan una aproximación a las de Shapherd y Lapple que son simples, comparadas con las primeras. Esta correlación que estima la caída de presión en ciclones se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$(4.13) \quad \Delta P = \left(\rho_f \sqrt{v}^2 / 2g \right) (N_H / \rho_{H_2O})$$

Donde:

$$(4.14) \quad N_H = K (ab/De)$$

El número de la carga de velocidad a la entrada depende solamente de tres de las siete relaciones geométricas de diseño.

Cuando en la entrada no tienen aletas $K = 16$; cuando tiene aletas neutras en la entrada $K = 7.5$. La ecuación 4.14 se puede simplificar, usando apropiados factores de conversión.

$$\Delta P = 0.003 \rho_f \sqrt{v}^2 N_H$$

- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE CICLONES.

Para facilitar las estimaciones preliminares del cálculo de los parámetros, en condiciones extremas de eficiencia de colección para tres polvos estandares, se muestran las figuras 60, 61, 62 que son velocidad de entrada contra diámetro del ciclón, a eficiencia extrema constante y con velocidad de saltación constante en la entrada.

Como resumen los siguientes pasos son recomendados para el diseño de un ciclón :

1. Calcular la eficiencia extrema requerida.
2. Comparar la distribución del tamaño de partícula con los estandares de aerosol, y formar el más aproximado al que tiene (Fig. 63 y Tabla 56)
3. Corregir la eficiencia extrema, basada en 100°F y $P_p = 2.58 \text{ g/cm}^3$ (usando Fig. 54 y 55) y la masa media del diámetro de partícula. La correcta relación óptima, $V_i/V_s = 1.25$ se usa para condiciones actuales de operación, usando la Figura 59 y la ecuación 4.12.

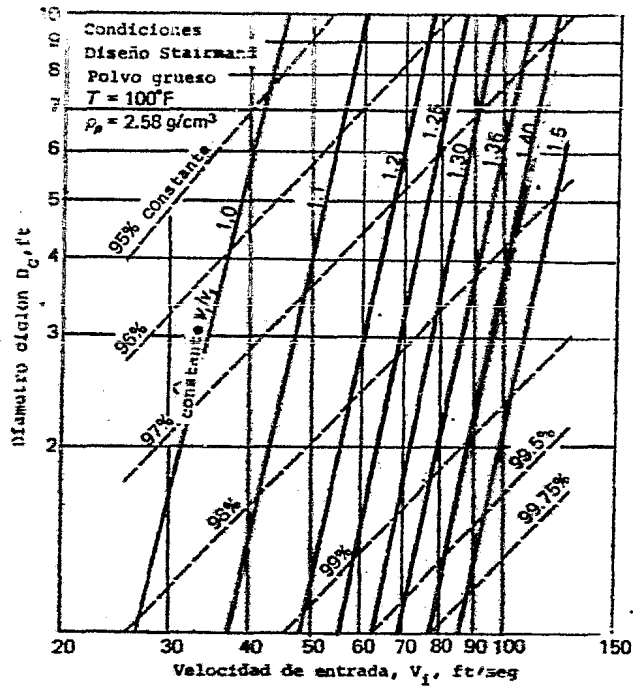


Fig. 60 Diseño ciclón Stairmand para polvo grueso

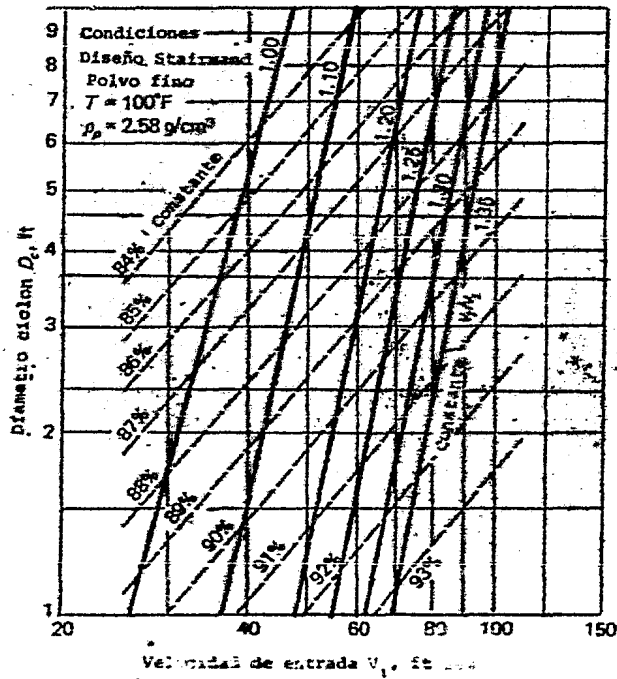
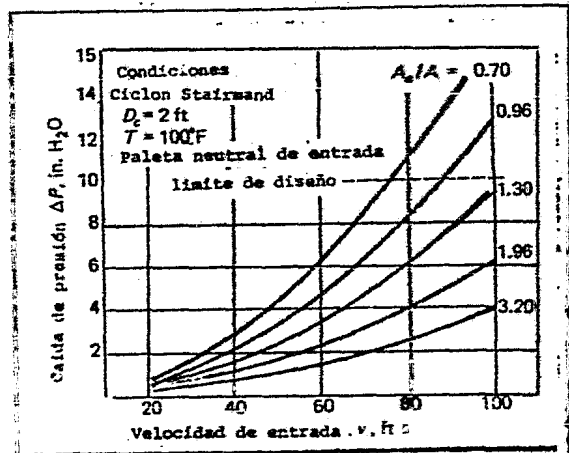
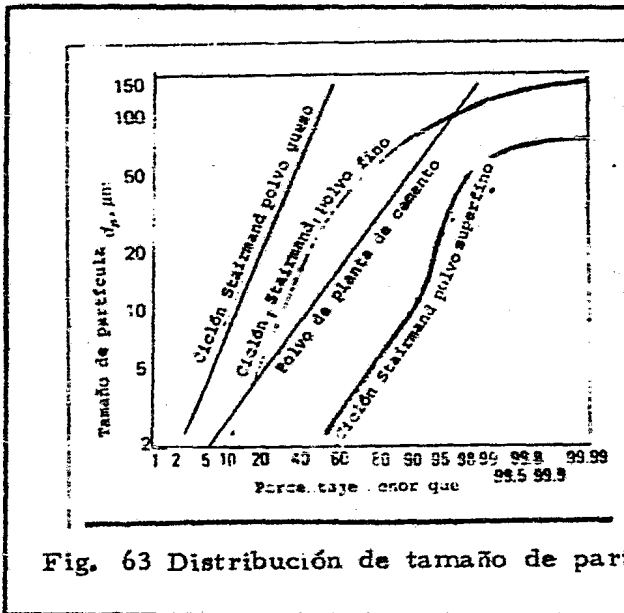
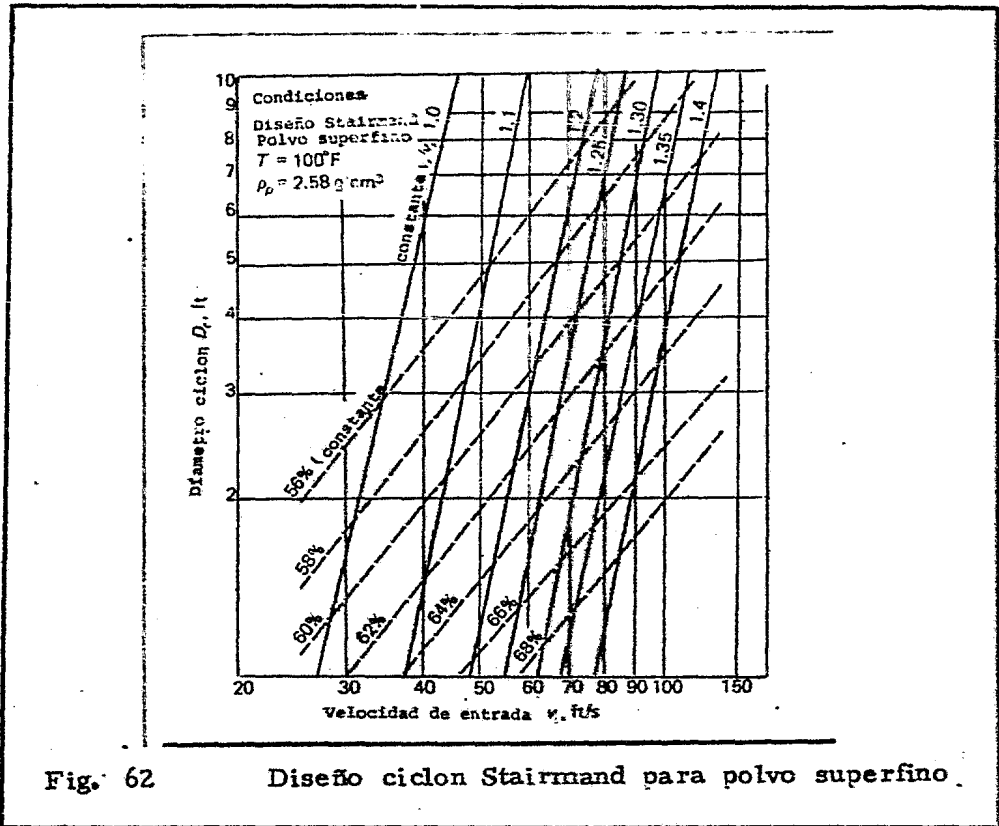


Fig. 61 Diseño ciclón Stairmand para polvo fino



4. De las figuras 60, 61 y 62, depende el estandar apropiado de aerosol y con η_T y v_i/\sqrt{s} calculadas en el inciso dos, sacar D_c y \sqrt{s}
5. Tomar la relación de diseño del ciclón de acuerdo a la tabla 52
6. Calcular $Q_c = abv_c$ (flujo volúmetrico por ciclón).
7. Calcular el número de ciclones requeridos en paralelo

$$N_o = Q/Q_c$$
8. Calcular v_s con la ecuación 4.11 u obtenerla de la figura 58.
9. Si $v_c/\sqrt{s} > 1.35$ (ajustado), recalculé la relación de diseño y V_i .
10. Calcular h , b y T con las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4.
11. Calcular el grado de eficiencia con la ecuación 4.1.

12. Repetir los incisos 10 y 11 para otro tamaño de partícula.
13. Calcular la eficiencia extrema con la ecuación 4.5.
14. Comparar resultados con la eficiencia requerida.
15. Calcular la caída de presión con la ecuación 4.14 u obtenerla de la Figura 64. Si es necesario hacer ajustes de A_o/A_i , V_i , D_c , o del rango de diseño.

4.5 Cálculo de tubería.

Una vez seleccionado el tipo de tubería a usarse, dependiendo del material a transportar, siendo lo más usual instalar tuberías usando cedula 40 para diámetros de 2 a 7 pulgadas y cédula 30 para diámetros de 8 a 12 pulgs., se procede a calcular el diámetro adecuado para determinado sistema.

Existen diferentes y variados métodos para el cálculo de dicho diámetro, en todos estos el principal parámetro a considerarse son los ACFM (actual cubic feet per minute) que es el volumen real de aire manejado. Con este dato y con la velocidad del aire dentro de la tubería se calcula una constante, con la cual se consultan tablas de las que se obtiene el diámetro.

El procedimiento anterior se muestra más ampliamente en el Capítulo VI.

CAPITULO V

SISTEMAS DE CONTROL.

5.1 Introducción.

5.1.1 Tipos de Sistemas de Control.

5.1.2 Funciones Típicas de Control.

5.1.3 Componentes.

5.2 Aplicaciones de Control.

5.2.1 Dispositivos de Control

5.3 Tableros de Control

5.4 Controles eléctricos.

5.1 INTRODUCCION.

Los requisitos para diseñar e instalar, conductores y métodos de alambrados de sistemas de distribución eléctrica están completamente cubiertas por la NATIONAL ELECTRICAL CODE y respaldados por la FIRE PROTECTION ASSOCIATION.

El alambrado de sistemas de control también debe cumplir con estos. El diseño de circuitos de control, para los requisitos de funcionalidad de sistemas de transporte neumático, están limitados solamente por los conocimientos del diseñador y de la disponibilidad de los equipos.

Para la correcta selección de los componentes de un sistema, de acuerdo a los requisitos de funcionalidad, se depende de varios factores: la rápida disponibilidad de partes de repuesto, personal capacitado para dar mantenimiento.

El costo de los sistemas de control y del cableado eléctrico representan el 50% del capital invertido para muchos de los sistemas de transporte neumático.

El mejor camino para seleccionar el sistema de control, para un sistema de transporte neumático, es preparar una lista básica de las operaciones mecánicas requeridas, de paros y arranques del sistema y una lista de funciones establecidas por el departamento de producción, para facilitar las operaciones. Los diagramas preliminares de cableado, se incorporan a estos requisitos y se integran a los sistemas de control, revelando la dificultad que puede tener un sistema de control.

5.1.1 TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL.

Los tipos básicos de los sistemas de control son: manual, semi-automático y automático.

Control manual. Los indicadores de nivel y las alarmas permiten que el operador del proceso, se percate del nivel de material. Entonces el operador abre la compuerta que permite la entrada de material de la alimentación a la entrada del sistema y directamente al punto de descarga. Este recibe una señal de alarma del indicador que está lleno el punto de descarga. El proceso de paro, es en operación inversa de como se arrancó, dando un tiempo

necesario para que el flujo de aire limpie la línea de transporte.

Control semi-automático. El operador alinea el equipo, para que permita el flujo de material de la fuente, al punto de descarga y oprimiendo un botón o un switch selector, inicia el arranque de los demás equipos con la secuencia propia. Cuando el punto de descarga está lleno, recibe una señal del indicador de alto nivel y se desconecta el equipo en la secuencia de regreso, dando tiempo para que la línea de transporte se limpie. Entonces el operador al terminar la secuencia regresa el selector a su posición original o selecciona otro tipo de sistema.

Control automático. El indicador de bajo nivel en la tolva, en el punto de descarga, inicia el arranque del sistema. Las compuertas necesarias para que el material fluya, de la fuente de alimentación, de los puntos de recibo y de los puntos de descarga funcionan automáticamente.

Posteriormente viene la señal del indicador de alto -

en el punto de descarga, el equipo se para, con su secuencia propia, dejando tiempo para que fluya el aire, para la limpieza de la línea de transporte.

La secuencia de operación de todos estos equipos, es básicamente, la misma y es como sigue:

1. Colocación de controles de tipos de función, para su ejecución, tales como los que se ponen en la descarga o en la fuente de alimentación.
2. Poner en posición las compuertas, para que el material fluya, en la dirección correcta.
3. Prender el soplador de aire, hasta que se estabilice el flujo de aire en la tubería de transporte, en el tanque soplador y en el sistema colector de polvos.
4. Prender el equipo, para alimentar el sistema de transporte, primero el equipo de abajo y después el de arriba.
5. Cuando se indica el alto nivel de la descarga, se

para primero el de arriba y después el de abajo. Permi-
tiendo así, el tiempo adecuado para la limpieza de la
línea de transporte.

6. Parar los impulsores de aire, tanto los de la línea
de transporte, como los de los colectores de polvos.

7. La fuente de alimentación es aislada, mediante el
cierre de las compuertas.

A los sistemas de control se les incorporan dispositivos
como, relevadores, indicadores de alarma y de nivel,
switches de presión diferencial, válvulas solenoides,
etc.

5.1.2 FUNCIONES TÍPICAS DE CONTROL.

Algunas de las funciones típicas de control, que se re-
quieran son:

1. Botones de arranque para cada unidad motora.
2. Posición automática para válvulas y compuertas con

prioridades de encendido.

3. Paro automático a nivel alto, de alguna tolva.
4. Arranque automático a bajo nivel.
5. Paro automático, debido a problemas en el transporte.
6. Doble control, para una operación segura de la estación, con un control maestro, para operaciones particulares.

Cualquier función, requiere la incorporación de sistemas eléctricos y electrónicos de control. En la mayoría de los casos, todos estos mecanismos se diseñan para circuitos de bajo voltaje, que energizan algún elemento. (normalmente solenoide).

El armazón de la solenoide debe actuar para conectarse, para energizar circuitos de alto voltaje, para el arranque de un motor, para aplicar un freno, abrir o cerrar una serie de contactos y de cierres internos con uno o varios circuitos de contra adicionales.

FUENTE DE PODER.

Los circuitos de control son adaptados a la corriente

trifásica.

Estos circuitos casi siempre incluyen, batería de arranque de motor, contactos disparadores de sobre carga, estaciones de botones u otros mecanismos de control para energizar el circuito, estos mecanismos operan con voltaje suministrado, se prefiere que operen a 110 volts. para seguridad y por la gran variedad de dispositivos de control que existen. Existen dos métodos para obtener voltajes bajos:

- Un transformador de control individual y una batería retenedora de bajo voltaje.

- Un simple control de transformadores, para energizar todo el sistema de control y a cada equipo de encendido de motor con retenedores de batería de bajo voltaje.

Los tamaños de los transformadores, deben mostrarse en los dibujos de los mecanismos de control, ya que son particulares a cada Circuito. En los circuitos de control se debe incluir solenoides de arranque de motor y contactos disparadores de sobre carga, estos se colocan entre la solenoide y las líneas alimentadoras de igual

manera como los "by-pass".

5.1.3 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.

ESTACION DE MANEJO POR BOTONES.

En adición a las estaciones estandares de arranque, paro de motores, hay muchos tipos de unidades de control por botones que están disponibles con contactos múltiples, teniendo varias combinaciones de contactos múltiples, abiertos o normalmente cerrados, contactos momentáneos o permanentes. Los más comunes son los "Lock-stop" y botones basculantes para control de motores.

Los botones "lock-stop" son mas usados con vista a los motores de control remoto y mecanismos de cierre. Esto permite que el personal pueda trabajar sin peligro de accidente. Estos botones tienen un contacto normalmente cerrado y son colocados en la línea alimentadora, adelante de cualquier otro mecanismo de control.

El botón basculante (Jog) es usado para "by-pass" en series de contactos, en circuitos de orden de operación, independientes a todos los demás equipos. Se tiene un

contacto normalmente cerrado (N.C.) y uno normalmente abierto (N.O.) Cuando se presiona, el contacto N.O. este se cierra y permanece cerrado el tiempo que dure la presión en el botón, el contacto N.C. se abre simultáneamente.

El botón oscilante se instala en los siguientes casos:

1. Al separar el alimentador de la fuente alimentadora. Al parar el alimentador, funciona únicamente el ventilador, dejando pasar el aire por la línea de transporte.
2. En operaciones a distancia y controles de desviación o puerta de flujo, para que los switches de límite en estas unidades, puedan ser ajustados en operaciones de emergencia.
3. En la sacudida de los filtros de polvo, para sacudirlos antes de que entren en servicio las unidades.

4. En bandas transportadoras, ventiladores o sopladores, para revisar la tensión de la banda.

UNIDAD SELECTORA DE SWITCHES.

Los switches selectores pueden ser obtenidos en varios tipos y formas, dependiendo del número y posiciones de los contactos. El propósito es mantener la sección de contactos o grupo de contactos en posición de abierto o cerrado, para realizar las funciones de control, esto permite el rápido cierre de los contactos y reagrupamiento, en diferentes series de funciones de control, cuando el mismo equipo mecánico es usado para manejar diferentes materiales.

Los switches selectores más comunes son de 2 y 3 posiciones, son del tipo de leva, que cuando se le da vuelta, a la derecha o izquierda conecta o desconecta, la posición central es casi siempre la posición de apagado. Otro tipo con función similar es el tipo de botón, este tiene alrededor de la manga del botón una perilla, que dá vuelta, seleccionando así el tipo de función deseada. Para un lado realiza la función normal y para el otro

normalmente cierra el contacto normalmente abierto momentáneamente, según el tiempo de presión del botón.

Las normas usadas para este tipo de switches, en funciones de control :

1. Conectando de la posición de apagado a la posición de manual o automático.
2. Conectando de la posición de apagado a la posición de adelanto o atraso.
3. Conectando de la posición de apagado a la posición de cerrado o abierto.
4. Conectando de la posición de apagado a la posición de seguridad.

Cuando las mismas piezas del equipo son usadas para transportar diversos materiales, los controles deben estar entrecerrados de manera semejante, de esta manera se pueda seleccionar el equipo de transporte para el tipo de material específico. Aquí es donde se usan --

switches selectores especiales, con múltiples hileras de contactos normalmente abiertos. Estos contactos se cerrarán con secuencias predeterminadas, que se indicarán en el frente del switch.

Los usos de los switches selectores para su rendimiento en operaciones preliminares son :

1. En la colocación de compuertas desviadoras de flujo para una posición propia.
2. Para abrir o cerrar las compuertas de la fuente de material.
3. En la colocación de mecanismos de seguridad para el paro de la secuencia.
4. En la colocación de relevadores inter-cerrados para operaciones particulares, donde el sistema pueda transportar más de un material o puede transportar material a diversos recibidores.

5.2 APLICACIONES DE CONTROL.

Cuando se desarrolla el diseño de un sistema de transporte neumático, se debe tomar en cuenta los siguientes detalles.

Se debe contar con una fuente para dar energía a todos los equipos del sistema, ésta será usada cuando sea necesario, asegurando de esta manera el funcionamiento de cualquier elemento de control.

En ventiladores que funcionan de manera inversa, que mantienen una presión negativa, en los colectores de polvo o en los receptores de un sistema de presión deben instalarse switches para controlar el flujo de aire en los ductos de succión, interconectados al sistema de arranque. Lo anterior es para asegurar que se mantenga constante la presión negativa en los colectores de polvo, durante todo un período de operación, desde el arranque, hasta que el ventilador es parado. La Fig. 65 muestra la manera usual de conectar un circuito de control, que opera de la manera antes descrita. También muestra el diagrama esquemático para controlar un sistema con

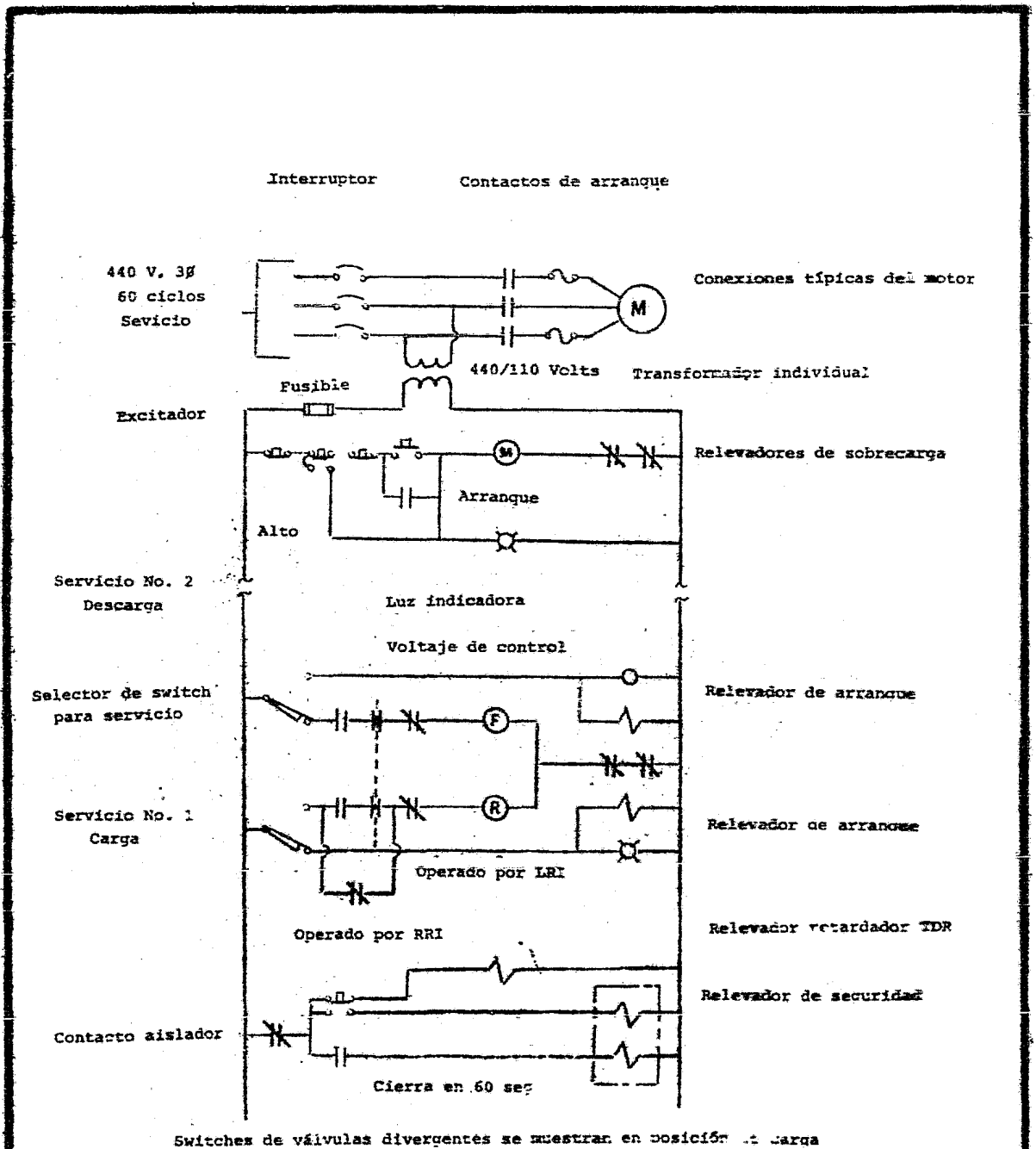


Fig. 65 CIRCUITO QUE MUESTRA LA APLICACION DE LOS DE LOS COMPONENTES DE CONTROL

válvulas divergentes de dos vías. Este control, está diseñado para permitir el funcionamiento de un switch en la tubería, la cual recibe el material por vacío, y de ahí lo entrega al sistema.

En el panel de control el operador podrá escoger fácilmente el camino que seguirá el material con el simple accionamiento de un relevador, formado por dos bobinas, una de las cuales recibe un impulso energizante al accionarse el botón, en este caso la armadura cierra una serie de contactos para operar otras funciones de control. Sin embargo, aquí la bobina de acción, es desenergizada por un tiempo predeterminado, por un relevador de tiempo diferido, hasta que el alimentador rotatorio es arrancado. El circuito arrancador de la alimentación, energiza el relevador que abre los contactos en varios circuitos, en otros equipos, para prevenir la operación de los mismos durante el período de transporte.

Este relevador, es puesto fuera, después de que la bobina ha sido desenergizada, y el mecanismo de contacto, no puede volver a cerrar, hasta que el tiempo predeterminado en el relevador ha terminado. Todo lo anterior y otros movimientos extras se realizan simultáneamente para la

selección adecuada de la compuerta necesaria.

ESPECIFICACIONES DE CONTROL ELECTRICO.

Los paneles de control eléctrico deben ser especificados en detalle, y de acuerdo a las normas estandares NEMA, dependiendo del total de protección deseada. Para servicio exterior los paneles deben ser cerrados, con espacio para relevadores futuros. El voltaje de control tiene que ser mas bajo, que el de la fuente de poder, preferentemente 110 volts.

A continuación se enuncian algunos aspectos que deben ser especificados:

- Un diagrama gráfico de flujo, completo y de fácil factura.
- Luces que indiquen los switchs, incorporados al diagrama anterior, de tal manera que el operador pueda fácilmente visualizar el estado del sistema.
- Luces también en el diagrama anterior que indiquen

la posición de todas las válvulas divergentes.

- Botones de Paro-arranque, y luces rojas que indiquen el control manual del impulsor.
- Sistema de luces que indiquen en el diagrama de flujo, los niveles de material en receptores y tolvas. Para operación manual, estas luces se usan en conjunto con chicharras de alarma.
- Sistema detector de tierras, para dividir en dos o más circuitos separados.
- Un circuito de prueba con botones de prueba para checar las luces indicadoras.

5.2.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL.

En cualquier sistema de transporte neumático se necesitan diferentes dispositivos, para efectuar todas las mediciones, indicadores de nivel de material en los receptores, los cuales sirven para la operación manual del sistema, o para arrancar o parar el sistema -

automáticamente. Un switch de movimiento es impulsado directamente por el rotor, indicando si este está girando libremente, o si sufre algún problema.

Otro switch nos indica que el ventilador está en operación. Un detector de presión diferencial a través del filtro de polvo, es usado para detectar acumulamiento de polvo en el filtro.

A continuación se describen algunos de los principales dispositivos de control en un sistema de transporte neumático.

CONTROL DE NIVEL DE MATERIAL.

Este es sin duda el más importante de los dispositivos de control, usado en receptores y tolvas alimentadoras. En un sistema de transporte neumático casi todos los dispositivos son para determinar los puntos de nivel. Para algunos casos, en controles cerrados de nivel, pueden instalarse varios detectores de nivel en el mismo depósito, localizados en diferentes puntos a diferentes elevaciones, con el objeto de obtener una idea del

material.

La manera de transferir, la señal de los elementos detectores, a los circuitos externos, varía con el principio de operación del detector. Los mas usuales son los siguientes:

- De diafragma.

Un metal flexible o diafragma de plástico va montado en una envoltura venteada, que contiene un resorte de contacto, ensamblado a un switch interruptor de resorte. El movimiento del diafragma al entrar en contacto con el material, acciona los contactos que a su vez operan los circuitos externos.

- De paletas rotatorias.

Un motor sincrónico impulsa a una paleta agregada a la flecha del rotor, la rotación de la paleta se detiene cuando está inmersa en material y reanuda cuando se encuentra libre. Un embrague centrífugo interconstruido actúa un juego de contactos para parar el motor y operar el

respectivo circuito externo.

- Tipo capacitor.

El elemento que detecta el nivel es un capacitor, el cual forma parte de un circuito puente con la unidad detectora. La unidad detectora contiene un oscilador transistorizado el cual está acoplado a el puente, una frecuencia pura lo mantiene balanceado.

Cuando el material entra en contacto, aumenta la capacitancia y el puente se desbalancea. Parte de la energía de salida del puente es rectificadas para operar un relevador el cual actúa los controles externos necesarios.

- Tipo Piezo eléctrico.

Una horquilla sincronizada es impulsada mecánicamente a su frecuencia de resonancia, por un cristal de piezo-cerámica montado en la membrana de la horquilla, el cual está sujeto a un campo eléctrico alterno. Otro cristal montado similarmente, recibe las vibraciones mecánicas y las convierte a oscilaciones eléctricas, las que son alimentadas a un amplificador que opera el switch de un

relevador. El material que se adhiere a la sonda reduce la frecuencia de las oscilaciones y a consecuencia de eso, tambien la corriente del amplificador. El relevador es entonces desenergizado para actuar los circuitos externos.

- Tipo radioactivo.

Una fuente protegida de material radioactivo (Cesio 137, - Radio 226 o Cobalto 60) se localiza al nivel deseado fuera del deposito, dirigida a un detector de rayos gama, que es ta montado diametralmente opuesto a la fuente en el mismo plano horizontal. Cualquier material puesto arriba de este plano dentro del depósito, reducirá el total de la radiación recibida por el detector causando que el relevador actue los circuitos se control externo.

SWITCHES DE MOVIMIENTO.

Estos Switches son generalmente usados, para cortar el sistema de transporte neumático por alguna falla o taponamiento del alimentador rotatorio, estos prueban que el rotor esta en movimiento.

Hay varios tipos de switch de movimiento. Todos los cuales requieren de ciertas conexiones al impulsor de cadena o de banda.

Los funcionamientos principales de algunos de estos switches son los siguientes:

- La flecha rotatoria conectada a una banda de aceite, envía una señal de presión por medio de la bomba contra un embolo de resorte, el cual actúa un switch sensitivo.

- La flecha impulsa un pequeño generador, el cual manda una señal eléctrica, a un circuito amplificador, el que opera un relevador conectado al circuito externo.

- La flecha impulsa un embrague centrífugo enlazado a un collar con resorte, que actúa un switch sensitivo.

En la selección de un switch de movimiento se deben tomar en cuenta los siguientes factores: las unidades que funcionen con aceite, trabajan con pérdidas por lo que requieren de un mantenimiento constante. El switch de embrague no funciona si la flecha es frenada. Se

puede instalar una banda o cadena impulsora para aumentar la velocidad de operación de cualquier switch, si es que el rotor trabaja a bajas velocidades.

5.3 TABLEROS DE CONTROL.

Los tableros de control deben ser probados antes de ser instalados energizando todos los circuitos con el voltaje proporcional del sistema de control. Generalmente cada circuito contiene, un relevador o una bobina de arranque con botón de empuje o contacto, relevador o dispositivos de control instalados a lo largo de las líneas de transporte para abrir o cerrar el circuito de acuerdo con los requisitos de funcionamiento.

Algunos de estos elementos pueden estar en el tablero, tales como botones o relevadores de secuencia, mientras que otros pueden estar en los dispositivos de control externo o en botones remotos y relevadores.

Todos los contactos externos deben ser conectados a una terminal alambrada, con postes numerados durante su -

instalación. Cuando se prueba un circuito, el objetivo es el tener continuidad de la fuente de control, pasando por la bobina arrancadora del motor y los relevadores de sobrecarga. Estas pruebas pueden ser hechas antes de la instalación puentando todos los contactos abiertos, en los postes terminales, energizando u operando a mano los émbolos de los relevadores y los arrancadores del circuito. La continuidad se prueba cuando todos los contactos del circuito se cierran y el relevador o arrancador de bobina está energizado.

Si el relevador o el arrancador del motor inicia la secuencia de otros circuitos, se debe revisar los circuitos entrelazados, para obtener continuidad en la propia secuencia operacional y en seguida los dispositivos energizantes:

- Abriendo los circuitos de parada de seguridad o en los contactos que representen dispositivos de control externo.

- Desenergizar el primer relevador o bobina de arranque del motor. Es necesario hacer funcionar los relevadores retardadores, a la hora aproximada para su funcio-

miento, con el objeto de completar los circuitos mostrados en la figura 65 cuando se prueba el Tablero de control junto con el equipo externo es necesario para probar continuidad, cerrar el switch de presión, el relevador de arranque se puede cerrar empujando su émbolo, activando este el circuito del impulsor. Cuando todos los contactos estén cerrados, y el botón de arranque se empuja, la bobina de arranque se energiza y las luces indicadoras mostrarán "conectado".

El circuito puede ser abierto de una o varias maneras, empujando el botón de cerrado o parado, parando el ventilador, abriendo el circuito del relevador de arranque, cerrando el enfriador de agua en el compresor, si existe este, o variando el switch de presión, para que este abra sus contactos.

PROCEDIMIENTOS BASICOS DE OPERACION.

El procedimiento de arranque, es común a los diferentes sistemas de transporte. Las luces de bajo nivel, alarmas en el receptor o en las tolvas de pesaje indican que el material puede ser recibido. Si las Tolvas o receptores están vacías, las compuertas divergentes estarán

puestas para dirigir el fluido de material a la Tolva o silo apropiada. Enseguida se arranca el soplador o impulsor de aire para establecer una corriente de aire a través de la línea de transporte, en un tanque presurizado, arrancar el compresor de aire. Finalmente arrancar el equipo que alimenta el material al sistema transportador.

Cuando la luz indicadora de alto nivel o la alarma, indican que el receptor está lleno, parar la entrada de material dentro del sistema, esperar un determinado tiempo a que la corriente de aire limpie la línea y posteriormente detener el impulsor.

En los sistemas de tanque presurizado el residuo de aire vaciará el tanque.

Finalmente se debe aislar el material del sistema, cerrando el receptor o las puertas alimentadoras, el objeto de estas operaciones es evitar que haya material atrapado en alguna parte de la línea de transporte.

En el caso en que exista algún taponamiento para limpiar

la línea, se cierra la válvula de salida y entonces se deja que la presión o la succión limpie la línea, si persiste el taponamiento, hay que desconectar la línea de descarga y sondear la válvula de salida. En general, una línea taponeada puede ser limpiada aplicando la mayor presión o succión posible sin entrada de material. En algunos casos en que el taponeamiento continúe es necesario localizar el lugar aproximado del taponeamiento y golpear la línea en repetidas ocasiones o en casos muy extremos recurrir a desmantelar la línea y limpiarla mecánica o manualmente.

Debe tenerse especial cuidado cuando se trata de limpiar el sistema aumentando la presión o succión, debido a que como se le proporciona una fuerza extra al impulsor, el motor de este mismo tiende a sobrecargarse, con la consecuente elevación de temperatura, por lo que se recomienda arrancar y rearrancar el sistema, las veces necesarias hasta que la línea de transporte sea limpiada.

Los taponeamientos generalmente ocurren en los codos con poco radio en algunas válvulas de funcionamiento deficiente, donde existan juntas o rebordes o en las uniones de tubería hechas con soldadura.

5.4 CONTROLES ELECTRICOS.

Es necesario tabular todos los motores y enlistar sus clasificaciones indicadas. Antes de instalar los relevadores de sobrecarga y calentadores en los arrancadores, es necesario calcular de acuerdo con sus capacidades la corriente máxima, tomando en cuenta una temperatura ambiental permisible en el arranque. Preveer que los motores no operen al oprimir los botones de arranque, desconectando todos los alambres y las terminales de carga de cada motor, de manera que estos no puedan ser operados, aun cuando el arrancador esté energizado. Es necesario instalar fusibles para proteger el sistema de control, cerrar todas las puertas de acceso y aplicar entonces voltaje de control a todo el sistema, debido a que todos los receptores y tolvias estarán vacías, las luces de nivel bajo deben indicar encendido, las luces de nivel alto por supuesto estarán en fuera. Si es posible se deben ajustar y probar a mano todos los indicadores de nivel. Si no se pueden alcanzar los niveles indicadores, será necesario remover las tapas de los contactos actuantes y entonces se simularán altas y bajas de material mediante puentes en los contactos; todo lo anterior para checar la indicación de nivel en el panel

de control.

EVALUACION DEL FUNCIONAMIENTO.

La prueba más importante para un buen funcionamiento de un sistema de transporte neumático es la evaluación del mismo. Los métodos principales de prueba son los siguientes:

- El tiempo de descarga para un material que ha sido pesado, dentro y fuera se registra en un record. Esto se efectúa para varios transportes, sobre un período de tiempo, que cubra diferentes condiciones ambientales. Con los datos anteriores se calcula una gráfica de total de material recibido contra la suma total del tiempo de descarga, en ésta aparecerá una línea con una inclinación constante. En el record debe mantenerse una constante de tiempo usada durante la maniobra de descarga incluyendo períodos de descarga reducida debido a fallas en la fluidez del material al ser transportado, o por alguna otra causa.

- Todo el material que entra al sistema es pesado y

calibrado en las tolvas, detectándose el material atrapado en el equipo, tal como filtros de polvo, alimentadores rotatorios o transportadores de tornillo.

- Se instala un aparato para obtener el tiempo de operación en los alimentadores volumetricos calibrados. El volumen entregado calculado se compara contra el volumen real entregado en almacenadores, la conversión de volumen a peso, debe hacerse pesando un volumen conocido de material aereado. El volumen calculado entregado por el sistema transportador alimentador debe compararse con el total de material suministrado por el proceso de gosisificación o medición en cual el ingrediente es pesado; aquí nuevamente se construye una gráfica, en la que aparece una recta con inclinación constante.

El tiempo necesario para llenar un receptor de un volumen conocido, debe ser determinado y el volumen convertido a peso, usando la densidad aereada de alguna muestra de material extraída del receptor.

Cuando el transporte es alimentado de varios lados, la cantidad de material debe determinarse para cada fuente de alimentación, porque existen para cada línea diferente

resistencias al transporte.

Cuando el material no ha sido previamente alimentado al sistema, la cantidad alimentada debe empezar lentamente, debiendo incrementarse gradualmente. Esto puede hacerse en sistemas, donde los alimentadores están equipados con impulsor de velocidad variable, o en donde los almacenadores tengan puertas de corte, en el lado de entrada del alimentador.

En los transportes presurizados el material debe ser descargado usando la presión de aire mas baja, con la que se pueda transportar el material. En los sistemas de vacío igualmente se debe aumentar la presión de vacío gradualmente hasta alcanzar la presión designada para el óptimo funcionamiento de todos los equipos instalados.

C A P I T U L O VI

CALCULO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMATICO

6.1 Procedimiento de diseño

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Ya que en determinado proceso se ha elegido instalar un sistema de transporte neumático, basándose en las ventajas y desventajas del mismo, o por algún requisito propio del sistema, es necesario recabar toda la información disponible acerca del material, esta es de suma importancia para el cálculo y selección de equipos, así como para la selección del sistema adecuado.

La primera decisión es la selección del tipo de sistema a usarse. Esta puede realizarse primeramente analizando los arreglos físicos propios del problema, es decir enlistando el número de orígenes y de destinos finales, con estos datos y de acuerdo a lo establecido en el Capítulo II inciso 2.1, se selecciona alguno de los seis sistemas usados normalmente.

Un segundo aspecto a considerarse son las características físicas del material. La primera selección se realiza de acuerdo al tamaño de partícula usando la tabla A Cap. IV.

Una segunda selección puede realizarse por las siguientes características ;

el grado de abrasividad, si es material combustible, explosivo, frágil, corrosivo, etc., para lo anterior se usa la Tabla B Cap. IV.

Si se presenta el caso, se puede recurrir a la Tabla 39 Cap. IV, la cual enlista una serie de materiales específicos, y los sistemas en los cuales pueden ser manejados estos.

Las tres Tablas anteriores son excelentes guías, pero sin embargo, no son la última respuesta; afecta también la cantidad de material a transportar, la distancia y el arreglo del sistema.

Una vez seleccionado el tipo de sistema procede a determinar la cantidad de aire que necesitamos de acuerdo al problema específico, para una determinada distancia. Para el cálculo anterior existen parámetros importantes que son:

Saturación, pies cúbicos de aire necesario para transportar un kilogramo de material, HP/Ton que es la potencia necesaria para transportar 2,000 Lb. de material en una hora.

SCFM (standard cubic feet per minute) volumen de aire necesario por minuto para el sistema, ACFM (actual - cubic feet per minute, volumen de aire en la alimentación real por minuto. Para determinar el aire y la -- fuerza necesaria en un sistema, tienen que hacerse diferentes consideraciones antes de decidir lo mas acertado, la mayoría de estas, estan basadas generalmente en conocimientos prácticos adquiridos previamente.

Existen ciertas limitaciones en cuanto a diseño para los sistemas de vacío o baja presión, para los sistemas de media presión o alta presión no existen este tipo de limitaciones.

Las bases para el diseño de un sistema de media presión estan basadas en experiencias actuales en el manejo de materiales similares en razon de la comparación de las distancias y velocidades convencionales.

La relación aire-material varía debido a las características físicas, principalmente por la variación en las medidas de las partículas y la habilidad del material para ser fluidizado o aereado.

En este sistema de transporte, al igual que los demás, es posible que los requisitos de aire y de fuerza motriz τ puedan ser corregidos teóricamente y prácticamente, al seleccionar los diferentes componentes, lo cual determinará el éxito del sistema.

CALCULO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMATICO.

Actualmente una compañía creo un nuevo proceso en la fabricación de bolsas de polipropileno, para lo cual es necesario instalar un sistema de transporte.

Por lo enunciado en el capítulo II, se decidio la instalación de un sistema de transporte neumático.

El procedimiento de cálculo que se seguirá es adecuado de acuerdo al enfoque general de la tesis, y esta basado en conocimientos prácticos, lo que ocasiona que sea un método aparentemente sencillo pero eficaz.

En algunos cálculos se necesitaran de estudios más profundos, dependiendo de los equipos instalados, el diseño que a continuación se realiza es un estudio preeliminar para la correcta selección de los equipos.

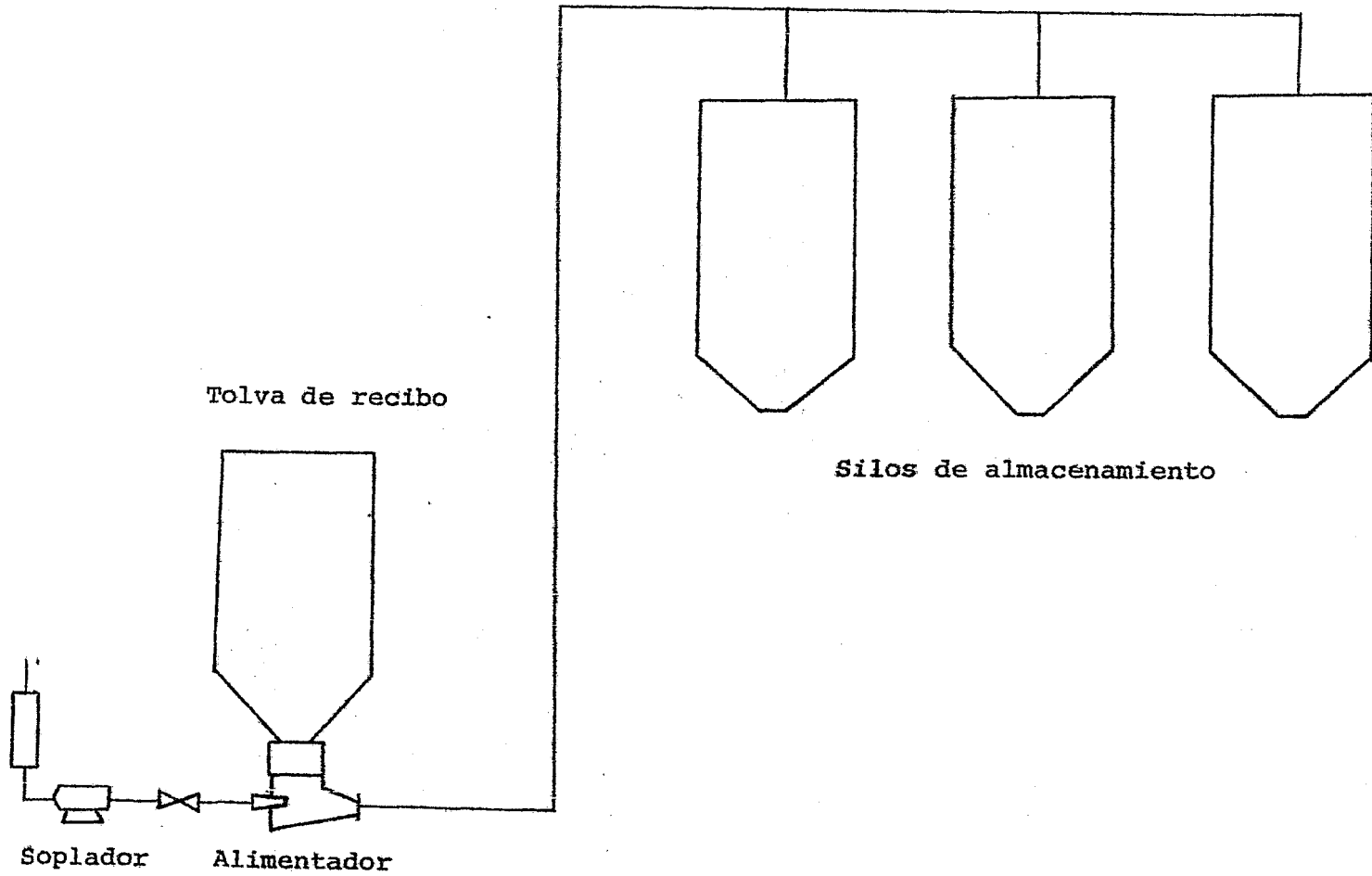
Los datos generales del problema son los siguientes:

Se requieren transportar neumaticamente 15,000 Lb/Hr,- de polipropileno en forma de pellets para la fabricación de bolsas.

Se desea transportar el polipropileno desde una tolva de recibo hasta tres silos de almacenamiento (ver fig.- 66). Los silos de almacenamiento tienen una altura de 80 ft-0 ft.

La distancia de la tolva de recibo a los silos es de - 196 ft y la tolva de recibo se encuentra a 32 ft. El material tiene una densidad a granel de 35 Lb/Ft³.

FIGURA 66



SELECCION DEL TIPO DE SISTEMA

Tomando en cuenta que es un sistema que tiene un punto de origen con tres destinos finales o descargas utilizaremos por lo dicho en el capítulo II inciso 2.1.1. un sistema de presión positiva, quedando por determinar - cual de los tres niveles de presión se adecua más a nuestras necesidades.

Para esto último sabemos que el material es compacto, de forma uniforme, no abrasivo, termoplástico, no es frágil, por lo que basándonos en Las Tablas A y B del capítulo - IV, pag. 151, 152, seleccionamos un sistema de baja presión, con presión máxima de 12 psig.

El primer valor a calcular es la longitud equivalente del sistema, este se encuentra sumando las distancias horizontales y verticales más un factor recomendado por los fabricantes por cada codo usado, dependiendo del radio del mismo, un promedio aceptado usando codos normales es aumentar 20 ft por cada codo.

La longitud equivalente para nuestro caso es de:

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

L_1 = Distancia horizontal

L_2 = Distancia vertical

L_3 = 20 ft por cada codo usado (5 codos)

$$L_1 = 16.4 + 32.28 + 66.36 + 16.4 + 32.28 + 32.28$$

$$L_1 = 196 \text{ ft.}$$

$$L_2 = 32 + 80$$

$$L_2 = 112 \text{ ft.}$$

$$L_3 = 5 (20 \text{ ft}) =$$

$$L_3 = 100 \text{ ft.}$$

$$L_t = 196 + 112 + 100$$

$$L_t = 408 \text{ ft.}$$

- 1) Determinación de la saturación (relación aire-material) y del factor de potencia.

Usando la tabla 67 de saturación para sistemas de baja presión, para pellets de polipropileno, considerando una distancia de 400 ft, obtenemos la saturación que son los ft^3 de aire necesario para transportar una Lb. de material, el factor de potencia nos indica los HP necesarios para transportar 1 Ton. de material en 1 hora.- Además obtenemos la velocidad de transporte y el factor de presión.

Saturación = 1.1 ft^3 aire/Lb mat.

Factor de Potencia = 2.5 HP/Ton.

Velocidad de Transporte = 70 ft/seg.

Factor de presión = 5.0

Los datos de La Tabla 67 están calculados para usarse en tuberías de 3, 4, 5 y 6 in de diámetro y distancias no mayores de 420 ft.

2) Para obtener el volumen de aire libre necesario para

T A B L A 67

	Peso por ft ³	Fact. de pres.	D 100 ft		D 250 ft		D 400 ft		Velocidad ft/seg
			Sat.	HP/T	Sat.	HP/T	Sat.	HP/T	
Alúmina	60	5.0	1.1	2.4	1.6	3.4	1.9	3.9	60
Carbonato, Calcio	25-30	3.5	1.4	2.5	1.8	3.3	2.0	3.6	65
Arcilla aereada	30	4.0	1.5	2.7	1.8	3.3	1.9	3.6	50
Granos de cafe	42	5.0	0.6	1.2	0.9	2.1	1.1	2.5	45
Maíz pelado	45	5.0	0.9	1.5	1.1	2.2	1.3	2.6	55
Harina de trigo	40	2.5	0.7	1.8	0.9	2.2	1.1	2.7	35
Sémola, trigo, carbón	33	3.5	0.8	1.5	1.3	2.4	1.6	2.9	70
Cal hidratada	25-30	4.0	0.6	1.8	0.8	2.2	0.9	2.6	40
Malta	28	5.0	0.8	1.5	1.1	2.0	1.3	2.5	55
Avena	25	5.0	1.0	1.8	1.4	2.6	1.6	3.1	55
<u>Pellets, polipropileno</u>	<u>30</u>	<u>5.0</u>	<u>0.5</u>	<u>1.2</u>	<u>0.9</u>	<u>2.1</u>	<u>1.1</u>	<u>2.5</u>	<u>70</u>
Sal	90	5.0	2.9	3.9	3.5	4.5	4.0	5.1	83
Azucar granulada	50	5.0	1.4	2.1	1.6	3.1	1.7	3.6	60
Forraje suave	20-40	3.8	1.3	2.5	1.7	3.1	1.9	3.7	70
Fosfato	65	4.5	1.4	2.5	1.8	3.3	1.9	3.6	75

el sistema SCFM (standard cubic feet per minut) se multiplica la saturación calculada en 1 por la cantidad de material, por el gasto de material necesario.

$$\text{Scfm} = 1.1 \text{ ft}^3 \times 15000/60 \text{ min.}$$

$$\text{Scfm} = 275 \text{ ft}^3/\text{min.}$$

3) Para el cálculo de la presión de operación sabemos que es un sistema de baja presión, con una presión de 12.5 psig, esto se determina multiplicando el factor de potencia HP/Ton., por el factor de presión de La Tabla 67, el resultado se obtiene en psig.

Presión (psig) = HP/Ton. x factor presión

$$P = 2.5 \times 5$$

$$P = 12.5 \text{ psig.}$$

4) Volumen de aire en la alimentación acfm (actual - cubic feet per minut). Estos acfm se calculan al multiplicar los scfm por la presión atmosférica y esto se divide entre la presión absoluta del sistema.

Si tomamos en cuenta que la instalación se efectuará a diferente altura a la del nivel del mar, se tendra que corregir la presión atmosférica, para nuestro caso se hara a la altura de la ciudad de México 7,500 ft. arriba del nivel del mar con una presión de 22.65 in-Hg, de acuerdo a La Tabla 43 del capítulo IV, presión absoluta 11.5 psig Tabla 68.

Presión absoluta = 24 psig.

$$\text{ACFM} = \frac{275 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \times 11.5 \text{ psig}}{24 \text{ psig.}}$$

$$\text{ACFM} = 131.77 \text{ ft}^3 \text{ aire/min.}$$

Para escoger el tamaño adecuado del soplador, debemos tomar en cuenta las pérdidas de aire a través de los mecanismos de alimentación y válvulas divergentes, estas fugas pueden ser diferentes para cada tipo de mecanismo, o marca seleccionada. De acuerdo a las experiencias previas que se tienen un buen promedio es aumentar las fugas volumétricas en un 30% para acercarse al total de fugas.

T A B L A 68

<u>ALTIUD</u> (pies)	<u>P ABSOLUTA</u> (psi)	<u>H ABSOLUTA</u> (in Hg)	<u>R</u> (Fact. corr.)
0	14.69	29.92	1.00
2,000	13.66	27.82	1.04
4,000	12.68	25.84	1.08
6,000	11.77	23.98	1.12
8,000	10.91	22.22	1.16
10,000	10.10	20.58	1.20
12,000	9.34	19.03	1.25
14,000	8.62	17.57	1.30

T A B L A 69

<u>IPS PIPE SIZE</u>	<u>CEDULA 5</u>	<u>10</u>	<u>30</u>	<u>40</u>
3 in.	3.6	3.5		3.07
3 1/2 in.	4.8	4.6		4.05
4 in.	6.1	5.9		5.3
5 in.	9.4	9.2		8.4
6 in.	13.5	13.2		12.0
7 in.				16.0
8 in.	23.2	22.7	21.3	
10 in.			34.0	
12 in.			47.8	

TABLA 69 CONSTANTES DE TUBERIA

Para calcular la capacidad del alimentador rotatorio, considerando que la densidad del material cambia debido al aeramiento del material por la tolva, la densidad cambia de 35 $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$ a aproximadamente 28 lb/ft^3 , por lo tanto el alimentador rotatorio debe alimentar a la línea de transporte de acuerdo a lo dicho en el capítulo IV.

$$\text{Vol.} = \frac{\text{Capacidad (Lb/min)}}{\text{Densidad (Lb/ft}^3\text{)}}$$

$$\text{Vol.} = \frac{250}{28}$$

$$\text{Vol.} = \frac{8.92 \text{ ft}^3}{\text{min.}}$$

Debido a que se trata de un sistema de baja presión el alimentador tiene que soportar una presión diferencial de 12.5 psig, ya que de un lado se encuentra la línea con la presión anterior y del otro la tolva de almacenamiento con la presión atmosférica.

Es normal considerar una eficiencia del 75 % para los alimentadores, por lo que el volúmen real de descarga será :

$$\text{Volúmen Real} = 8.92 / .75$$

$$\text{Volúmen Real} = 11.9 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Seleccionaremos un alimentador de capacidad volúmetrica normal, $0.7 \text{ ft}^3/\text{revolución}$ del rotor, por lo que el rotor debe girar, basandose en el Cap. IV pag 180

$$\text{RPM} = \frac{\text{Volúmen Real}}{\text{Capacidad Rotor}}$$

$$\text{RPM} = 11.9 / 0.7 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \frac{\text{ft}^3}{\text{rev}}$$

$$\text{RPM} = 17$$

Con los datos anteriores y de acuerdo al tipo de material, temperatura de manejo y diferencia de presiones a través del rotor se procede a seleccionar el alimentador rotatorio mediante el uso de tablas proporcionadas por el fabricante.

Con los RPM del alimentador y con el desplazamiento volú-
metrico podremos estimar las fugas en el alimentador.

5) Fugas en el alimentador.

Se calculan en ACFM al multiplicar el desplazamiento vo-
lúmetrico por los RPM y por 1.3 que es el promedio de fu-
gas, para un alimentador normal (30 %)

$$\text{Fugas} = 0.7 \text{ ft}^3/\text{min} \times 17 \text{ RPM} \times 1.3$$

$$\text{Fugas} = 15.47 \text{ ft}^3/\text{min}$$

6) Ajuste del volúmen de fugas en el alimentador.

Como el alimentador puede operar a una presión un poco
mayor que la de operación, se tiene que calcular los SCFM
del aire que se requiere en la entrada del soplador.

$$\text{Fugas reales} = \text{ACFM} \times \frac{P \text{ atm.} + P \text{ op.}}{P \text{ atm.}}$$

$$\text{Fugas reales} = 15.47 \times (11.12 + 12.5) / 11.12$$

$$\text{Fugas reales} = 32.86 \text{ SCFM}$$

7) La capacidad de aire del soplador es la suma total de los SCFM necesarios en el sistema y las fugas en el alimentador .

$$\begin{array}{rcccl} \text{SCFM} & = & \text{SCFM} & + & \text{SCFM} \\ \text{(soplador)} & & \text{(sistema)} & & \text{(fugas alimentador)} \end{array}$$

$$\text{SCFM} = 275 + 32.86$$

$$\text{SCFM} = 307.86 \text{ ft}^3/\text{min.}$$

8) Para calcular el tamaño del soplador es necesario consultar los catalogos de los fabricantes, utilizando los SCFM y la presión de operación.

Con los anteriores datos $\text{CFM} = 307.86 \text{ ft}^3/\text{min}$ y presión de operación 12 PSIA, consultando la tabla 70, preseleccionamos los siguientes sopladores .

tipo	Desplazamiento	RPM	CFM	HP
7 HB	.367 ft^3/min	1250	344	26.1
		1000	253	20.9

Atendiendo a la recomendación de operar el soplador al 85 % de la velocidad máxima recomendada, calculamos los RPM necesarios .

TABLA 70 CAPACIDADES Y POTENCIAS DE SOPLADORES

(CONDICIONES DE ENTRADAS AL SOPLADOR: 14.7 PSIA Y 70° F)

TIPO	DESPLAZAMIENTO FT ³ /REV	RPM	7 PSI		8 PSI		9 PSI		10 PSI		12 PSI	
			CFM	HP	CFM	HP	CFM	HP	CFM	HP	CFM	HP
3 HB	.045	1500	28	2.2	-	-	-	-	-	-	-	-
		2000	50	3.0	47	3.4	45	3.8	-	-	-	-
		2500	73	3.7	70	4.3	67	4.8	65	5.3	-	-
		3000	95	4.5	92	5.1	90	5.8	87	6.4	83	7.7
4 HB	.069	1300	40	3.0	37	3.4	-	-	-	-	-	-
		1750	72	4.0	68	4.6	65	5.2	62	5.7	-	-
		2180	101	5.0	98	5.7	95	6.4	92	7.1	-	-
		2620	132	6.0	128	6.9	125	7.7	122	8.6	116	10.3
5 HB	.140	1050	89	4.9	85	5.6	82	6.3	78	7.0	-	-
		1400	138	6.5	134	7.4	131	8.4	127	9.3	120	11.1
		1750	187	8.1	183	9.3	180	10.5	176	11.6	169	13.9
		2100	236	9.8	232	11.1	229	12.5	225	13.9	218	16.7
6 HB	.227	875	123	6.6	118	7.5	113	8.5	108	9.4	-	-
		1170	190	8.8	185	10.1	180	11.3	175	12.6	167	15.1
		1460	256	11.0	251	12.6	246	14.1	241	15.7	232	18.9
		1750	322	13.2	316	15.1	312	16.9	307	18.8	298	22.6
7 HB	.367	750	188	9.1	182	10.4	176	11.7	171	13.0	-	-
		1000	280	12.2	274	13.9	268	15.7	263	17.4	253	20.9
		1250	371	15.2	365	17.4	360	19.6	354	21.7	344	26.1
		1500	463	18.3	457	20.9	451	23.5	446	26.1	436	31.3
8 HB	.566	650	247	12.2	238	14.0	230	15.7	223	17.4	-	-
		875	371	16.4	366	18.8	358	21.1	350	23.5	337	28.2
		1090	496	20.5	487	23.4	480	26.3	472	29.2	458	35.1
		1310	620	24.6	612	28.1	605	31.6	597	35.1	583	42.2

$$\text{RPM} = \frac{\text{SCFM}}{\text{desplazamiento}}$$

$$\text{RPM} = 307.86 / .367$$

$$\text{RPM} = 839$$

Por lo anterior se usará un soplador tipo 7 HB, 1000 RPM con una potencia de 20.9 HP.

Habiendo ya seleccionado el alimentador rotatorio, y el soplador es necesario estimar el diámetro de la tubería. Primero necesitamos calcular una constante de tubería que resulta de dividir los ACFM entre la velocidad del aire obtenida en la tabla 67

$$\text{Constante tubería} = \frac{\text{ACFM}}{\text{velocidad}}$$

$$\text{Constante tubería} = 131.77/70$$

$$\text{Constante tubería} = 1.88$$

Consultando la tabla 69, utilizando cedula '40 seleccionamos el menor diámetro de tubería 3 in.

En los receptores, debido a la consistencia del material solamente será necesario instalar tolvas con conexiones de venteo a la atmosfera, eliminandose el uso de los colectores de polvo.

Igualmente por la misma razon se elimina el accesorio de inyección, instalandose directamente el alimentador rotatorio en la parte inferior de la tolva de recibo.

La descarga en los tres receptores se realiza uno por uno con la operación de válvulas divergentes, localizadas a lo largo de la tubería principal, desviando el flujo a el receptor seleccionado.

CONCLUSIONES

Después de analizar toda la información obtenida para la elaboración del Capítulo III, se sugiere se promueva la instalación de una planta piloto de transporte neumático, en la cual puedan realizarse todas las investigaciones necesarias para llegar al conocimiento real del comportamiento de la mezcla aire-material.

Se debe considerar importante el determinar por medio de estas investigaciones algunos de los parámetros definidos en el Capítulo III como son : las velocidades de saltación ahogamiento, de partícula, de gas etc., comportamiento de la mezcla a diferentes relaciones aire-material y otros índices que nos indiquen las variaciones en el comportamiento del flujo.

Las aplicaciones posibles de estas investigaciones tienen como se menciona en esta tesis, gran importancia en varios campos de la ingeniería.

Existen en ocasiones diferencias entre los valores calculados y los medidos para los diferentes parámetros, esto debido principalmente a los cambios en las condiciones de flujo, o por deficiencias en los sistemas de medición.

Se recomienda usar esta tesis para obtener un correcto panorama de un sistema de transporte neumático, con el cual pueda decidirse en determinado momento el cambio de un sistema de transporte tradicional, por las ventajas que el transporte neumático ofrece, tanto en -- ahorros por pérdida de material, por la velocidad de transporte, o por la seguridad si se trata de materiales tóxicos, o bien para decidir su instalación en un proceso nuevo.

El sistema de cálculo mostrado en el Capítulo VI es -- solamente una guía preeliminar para poder evaluar co-- rrectamente un sistema de transporte neumático, y en base a eso su posible instalación.

BIBLIOGRAFIA

PNEUMATIC CONVEYING DESIGN

Stoess H.

PNEUMATIC CONVEYING OF BULK MATERIALS

The Ronald Press Co. New York 1968

WHY USE PNEUMATIC CONVEYORS

Chemical Engineering Magazine, Abril 1954

CONVEYING MATERIAL WITH AIR

Industrial and Engineering Chemistry

PNEUMATIC CONVEYING

Milton N. Kraus , Chemical Engineering , Mayo 10, 1965

HOW TO SELECT A PNEUMATIC CONVEYING SYSTEM

Chemical Engineering, Febrero 1975

STORAGE AND FLOW OF SOLIDS

A.W Jernike, Boletin 26 Universidad de Utah, 1969

AIR AND POWER REQUERIMENTS FOR THE PNEUMATIC TRANSPORT OF CRUSHED COAL IN VERTICAL PIPE LINES

J.L. Konchesky and T.J. GEORGE. Engineering for industry

PRACTICAL PNEUMATIC CONVEYOR DESIGN

Jhon Fisher, Chemical Engineering, Junio 1958

SPECIFYING COMPONENTS OF PNEUMATIC CONVEYING SYSTEMS

Frank J. Genchow, Marzo 1975

PROPIERTIE OF SOLIDS

Ralph L. Carr, Chemical Engineering, Octubre 13, 1969

FLUIDIZATION

Davidson and D. Harrison

FLUIDIZATION THEORIES AND APPLICATIONS

S. Halow

FLUIDIZATION AND PARTICLE SYSTEMS

Zenz F.A. and Othmer, New York 1960

FLUIDIZATION

Leva M. , New York 1959

FLUIDIZATION OF SOLIDS PARTICLES

Richard H. Wilhen, Chemical Engineering, Vol. 44, 1948

DESIGN FOR FLUIDIZATION PART I

Joseph F. Frantz, Septiembre 1962

DESIGN FOR FLUIDIZATION PART II

Joseph F. Frantz, Octubre 1962