

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE



“DISEÑO DE UN SISTEMA NEUMÁTICO PARA
EL MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA DE CINTAS
TRANSPORTADORAS DE
ALTO TONELAJE”

JUAN FRANCISCO APABLAZA GODOY

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL MENA YANSSEN
PROFESOR CORREFERENTE: ING. LUIS GUZMÁN BONET

DICIEMBRE – 2020

I. Resumen

El Desarrollo de esta tesis se inserta en el estudio de un sistema neumático, que utiliza presión negativa, el cual tiene como objetivo recolectar el concentrado de cobre que cae desde las correas transportadoras.

Se describen los tipos de sistemas de transporte neumático, presentando las distintas clasificaciones. Primero, se definen de acuerdo con las fases - fase diluida y fase densa -, luego con el modo de operación - presión positiva y presión negativa o vacío -. Además de la definición de operación del sistema neumático, se profundiza en el comportamiento de los sólidos a granel dentro de estos sistemas, definiendo conceptos clave como ángulo de reposo, fricción, fuerza cohesiva, etc.

El material por recolectar en este sistema es el concentrado de cobre, el cual posee una densidad entre $1.6 - 1.8 \text{ ton/m}^3$ y el ángulo de reposo a utilizar es 35° [Anexo A].

Luego, de definir el funcionamiento de los sistemas neumáticos, el comportamiento de los sólidos a granel y el material a transportar, se procede a la descripción de las variables clave que comandan la dinámica de partícula en sistemas bifásicos.

Se selecciona la metodología de cálculo propuesta por el ingeniero John Fisher [Anexo B]. Esta metodología se basa en el cálculo de las diferentes energías necesarias para mover el fluido bifásico al punto final. Con el total energético requerido es posible calcular la potencia necesaria para el sistema.

El arreglo de piping se conecta al sistema neumático, compuesto por un generador de vacío con filtro, que es proporcionado por el camión Supersucker [Anexo D]. Se selecciona este sistema, debido a flexibilidad que proporciona un sistema móvil.

La configuración para utilizar en este sistema es un arreglo de cañerías situado a lo largo de la correa transportadora ubicada en Puerto Ventanas. En este arreglo se encuentran varias conexiones donde el usuario podrá conectar las mangueras, y así realizar el mantenimiento.

Con la metodología de cálculo, el sistema de vacío y el arreglo seleccionados, se procede a realizar el cálculo de la potencia. El resultado de este cálculo, de acuerdo con los parámetros nombrados anteriormente, es de 92 HP.

Además, se realizó el cálculo de erosión en los codos de las cañerías. Este cálculo no tuvo éxito, debido a que los métodos de cálculo de erosión consideran variables muy distintas a las que tenemos en el modelo, generando valores muy por encima de la realidad. En el capítulo “cálculo de la erosión”, se demuestra esta situación realizando el cálculo de acuerdo con dos metodologías.

Se propone un plan de mantenimiento para el sistema. Primero, sugiriendo en el caso del arreglo de piping utilizar un sistema ultrasónico para monitorear el espesor de las cañerías. Segundo, se indica un listado con todas las piezas a mantener en el camión Supersucker.

La inversión realizada en el sistema se obtiene sumando el valor del camión y otros vehículos necesarios para instalación. Luego, al valor obtenido se le agrega un 20% más por concepto de materiales e instalación del arreglo de piping, y, además, 10% por concepto de herramientas que se deban utilizar. Además, se agrega el costo de mantenimiento del sistema. Este valor se calcula de acuerdo con un plan de mantenimiento propuesto y suponiendo el costo de la hora hombre en una jornada de trabajo regular.

El total por invertir es de aproximadamente \$395,000,000 millones y el costo de mantenimiento es de \$57,000,000. Se concluye que este valor, más bien no es marginal, pero se justifica en zonas que necesiten control de material. Un multa o suspensión de la producción tiene costo impacto mucho mayor que la inversión mostrada.

II. Abstract

The development of this thesis is inserted in the study of a pneumatic system, which uses negative pressure. This system is designed to collect the copper concentrate that falls from the conveyor belts.

The types of pneumatic transport systems that are described in this thesis has different classifications. The first system shown are clasify according to the phases- dilute phase and dense phase-, then they are defined according to operation mode -positive pressure and negative pressure or vacuum-. In addition to the pneumatic system operation, the behavior of bulk solids within these systems is explored, defining key concepts such as angle of repose, friction, cohesive force, etc.

The material to be transported in this system is copper concentrate, which has a density between 1.6 - 1.8 ton / m ³ and the angle of repose to be used is 35° [Annex 1].

Then, from defining the operation of pneumatic systems, the behavior of bulk solids and the material to be transported, we proceed to the description of the key variables that control particle dynamics in biphasic systems.

The calculation methodology proposed by the engineer John Fisher [Annex 2] is selected. This methodology is based on the calculation of the necessary energies require to move the biphasic fluid to the end point. With the total energy required, it is possible to calculate the necessary power for the system.

The piping arrangement will be connected to a pneumatic system, which consist in a vacuum generator with filter, that is provided by the Supersucker truck [Annex 4]. This system was selected, due to the flexibility provided by a mobile system.

The configuration to be used in this system is a plumbing arrangement located along the conveyor belt, located in Puerto Ventanas. In this arrangement there are several connections where the user can connect the hoses, and thus perform maintenance.

With the calculation methodology, the vacuum system and the selected arrangement, the power calculation is carried out. The result of this calculation, according to the parameters named above, is 92 HP.

In addition, the erosion calculation was made in the elbows of the pipes. This calculation was not successful, because the erosion calculation methods consider variables very different from those we have in the model, generating over dimension values. In the chapter "calculating erosion", this situation is demonstrated by performing the calculation according to two methodologies.

A maintenance plan for the system is proposed, first suggesting in the case of the piping arrangement to use an ultrasonic system to monitor the thickness of the pipes. On the other hand, a list is indicated with all the parts to keep in the Supersucker truck.

The investment made in the system is obtained by adding the value of the truck and other vehicles necessary for installation. An additional 20% is added to the value obtained for materials and installation of the piping arrangement, and, in addition, 10% for the tools to be used. In addition, the cost of system maintenance is added. This value is calculated according to a proposed maintenance plan and assuming the cost of the Man Hour on a regular workday.

The total to invest is approximately \$ 395,000,000 million and the maintenance cost is \$ 57,000,000. It is concluded that this value, rather, is not marginal, but is justified in areas that need material control. A fine or suspension of production has an impact cost much greater than the investment shown.

III. Índice

I.	Resumen.....	i
II.	Abstract	iii
III.	Índice.....	v
IV.	Índice de Ilustraciones.....	vii
V.	Índice de Tablas	ix
VI.	Objetivos	x
	Objetivos Específicos	x
VII.	Metodología	xi
VIII.	Introducción	xii
1.	Introducción al transporte neumático y caracterización de las propiedades del material.....	1
1.1.	Sistemas de transporte neumático.....	1
1.1.1.	Clasificación del sistema de transporte neumático según las fases	2
1.1.2.	Clasificación de sistema según modo de operación (presión).....	3
1.1.3.	Diagrama de estado del sistema	5
1.1.4.	Ventajas y desventajas de un sistema de transporte neumático.....	6
1.2.	Fundamentos del fluido bifásico dentro de la cañería	7
1.2.1.	Sólidos a granel	7
1.2.2	Flujo de gas	12
	A continuación, se presentan los valores referenciales de las pérdidas de cargas:	15
	Dinámica de partícula.....	16
1.3.	Metodología a utilizar para el diseño del sistema.....	23
2.	Definición del sistema generador de vacío.....	27
3.	Configuración del sistema neumático	34
4.	Determinación de la capacidad del sistema neumático	36
4.1.	Datos a utilizar	37
4.2.	Etapas del cálculo	38
4.2.1.	Determinar la velocidad del fluido dentro de la cañería.....	38
5.	Cálculo predictivo del desgaste en la tubería	43

5.1.	Propuesta de modelos a utilizar	43
5.2.	Cálculo de la tasa de erosión de acuerdo al Modelo Salama y Venkatesh	51
5.3.	Cálculo de la tasa de erosión de acuerdo al Modelo Shirazi.....	52
6.	Propuesta de mantenimiento del sistema.....	56
6.1.	Mantenimiento para el arreglo de cañerías	56
6.2.	Mantenimiento para el camión Supersucker.....	57
7.	Análisis económico del sistema	59
8.	Conclusiones	63
9.	Bibliografía	65
Anexo A:	Ficha técnica concentrado de cobre.....	66
Anexo B:	Artículo utilizado para el cálculo del sistema neumático	69
Anexo C:	Ficha técnica chasis Supersucker.....	74
Anexo D:	Ficha técnica camión Supersucker.....	76

IV. Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: PRODUCCIÓN DE COBRE MUNDIAL EN PORCENTAJE TMF	XII
ILUSTRACIÓN 2: SISTEMA DE SUPRESIÓN DE POLVO	XIII
ILUSTRACIÓN 3: COLECTOR DE POLVO POR VÍA SECA	XIII
ILUSTRACIÓN 4: FLUJO EN FASE DILUIDA	2
ILUSTRACIÓN 5: FLUJO EN FASE DENSA	3
ILUSTRACIÓN 6: SISTEMA DE PRESIÓN POSITIVA	3
ILUSTRACIÓN 7: SISTEMA POR VACÍO	4
ILUSTRACIÓN 8: DIAGRAMA DE ESTADO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO PARA MATERIALES GRUESOS Y FINOS	6
ILUSTRACIÓN 9: AUMENTO DE LA PRESIÓN DE CONSOLIDACIÓN Y DENSIDAD APARENTE PARA POLVO DE PLÁSTICO. DISMINUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD CUANDO AUMENTA LA DENSIDAD APARENTE PARA POLVO DE PLÁSTICO	9
ILUSTRACIÓN 10: CONCENTRADO DE COBRE	12
ILUSTRACIÓN 11: FLUJO LAMINAR V/S FLUJO TURBULENTO	13
ILUSTRACIÓN 12: DENSIDAD AIRE VS ALTURA GEOGRÁFICA	14
ILUSTRACIÓN 13: COEFICIENTE DE ARRASTRE SOBRE UNA ESFERA	17
ILUSTRACIÓN 14: DINÁMICA DE LA PARTÍCULA EN PUNTO DE ALIMENTACIÓN	17
ILUSTRACIÓN 15: ESQUEMA DEL FENÓMENO DE DEPOSITACIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN CAÑERÍAS HORIZONTALES	20
ILUSTRACIÓN 16: ESQUEMA DE FENÓMENO DE DESPRENDIMIENTO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN CAÑERÍAS HORIZONTALES	22
ILUSTRACIÓN 17: GRÁFICO DE VELOCIDADES DE TRANSPORTE EN PIES POR MINUTO, PÉRDIDA DE PRESIÓN EN PULGADAS DE AGUA CADA 100 PIES Y FLUJO DE AIRE EN PIES CÚBICOS POR MINUTO	25
ILUSTRACIÓN 18: GRÁFICO DE VELOCIDADES DE TRANSPORTE EN FASE DILUIDA CON RESPECTO AL DIÁMETRO DE PARTÍCULA EN PULGADAS Y PESO DEL MATERIAL EN LIBRAS POR PIE CUBICO.	26
ILUSTRACIÓN 19: CAMIÓN SUPERSUCKER	27
ILUSTRACIÓN 20: RESUMEN DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE POLVO DENTRO DEL CAMIÓN SUPERSUCKER	28
ILUSTRACIÓN 21: RECORRIDO DEL AIRE DENTRO DEL CAMIÓN SUPERSUCKER	30
ILUSTRACIÓN 22: CAJA DE TRANSFERENCIA PFCT-PCV/3000	31
ILUSTRACIÓN 23: OPERACIÓN BOMBA DVJ WHISPAIR	32
ILUSTRACIÓN 24: CONDICIONES DE OPERACIÓN MÁXIMAS PARA EL MODELO DE SOPLADOR DVJ	33
ILUSTRACIÓN 25: VÁLVULA DE VACÍO TIPO “T”	33
ILUSTRACIÓN 26: CORREA TRANSPORTADORA PUERTO VENTANAS	34
ILUSTRACIÓN 27: ESQUEMA DEL SISTEMA INSTALADO 1	35
ILUSTRACIÓN 28: ESQUEMA DEL SISTEMA INSTALADO 2	35
ILUSTRACIÓN 29: SELECCIÓN DE LA VELOCIDAD A UTILIZAR EN EL SISTEMA	38
ILUSTRACIÓN 30: SELECCIÓN DE LA PÉRDIDA POR FICCIÓN	41
ILUSTRACIÓN 31: GRÁFICO RAZÓN DE EROSIÓN VS ÁNGULO DE IMPACTO DE LA PARTÍCULA PARA MATERIALES DÚCTILES Y FRÁGILES	45

ILUSTRACIÓN 32: FACTOR AGUDEZA DE LA ARENA (SAND SHARPNESS)	46
ILUSTRACIÓN 33: ESQUEMA CONCEPTUAL “STAGNATION LENGHT” O LONGITUD DE ESTANCAMIENTO	47
ILUSTRACIÓN 34: LONGITUD DE ESTANCAMIENTO VS DIÁMETRO DEL CODO.....	48
ILUSTRACIÓN 35: EFECTO DE LOS DIFERENTES FACTORES EN LA VELOCIDAD DE IMPACTO DE LA PARTÍCULA	49
ILUSTRACIÓN 36: MEDICIÓN DE ESPESOR DE LA TUBERÍA CON SISTEMA ULTRASÓNICO	57

V. Índice de Tablas

TABLA 1: PÉRDIDA DE CARGA EN SINGULARIDADES	16
TABLA 2: ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO CAMIÓN SUPERSUCKER.....	58
TABLA 3: INVERSIÓN INICIAL	60
TABLA 4: PROPUESTA DE MANTENIMIENTO.....	61

VI. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es determinar el diseño optimizado de un sistema de transporte neumático por presión negativa en fase diluida, utilizando un conjunto de tuberías y un camión aspirador de alto vacío que facilite las tareas de mantenimiento y limpieza de cintas transportadoras.

Objetivos Específicos

- Introducir al transporte neumático y caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del material a transportar.
- Definir y determinar las capacidades del sistema de transporte neumático de mineral sólido granular.
- Proponer un diseño innovador y plan de mantenimiento para el sistema.
- Realizar un cálculo predictivo de la erosión en las tuberías.
- Determinar la inversión y los costos operacionales del sistema.

VII. Metodología

La metodología a utilizar será la siguiente:

Etapas 1- Estudio de los distintos sistemas de transporte neumático.

Etapas 2- Descripción de la tecnología de transporte neumático a utilizar.

Etapas 3- Definición de las propiedades físicas y mecánicas del material a transportar.

Etapas 4- Dimensionamiento del sistema de transporte neumático

Etapas 5- De acuerdo con la tecnología descrita y dimensionamiento del sistema, se realizará la propuesta de mantenimiento.

Etapas 6- Cálculo predictivo y análisis de la erosión en las tuberías. Materiales que se incluirán en el estudio serán los que comúnmente se usan en minería.

Etapas 7- Análisis económico del sistema. Se determinará la inversión y costos de acuerdo con el dimensionamiento calculado anteriormente y el plan de mantenimiento.

VIII. Introducción

La industria de la minería es un pilar fundamental de la economía chilena, formando parte de la identidad como nación. Esta industria se ha caracterizado por mantener sus niveles de contaminación controlados, lo cual le ha permitido ser hasta ahora el mayor productor y exportador de cobre del mundo [1].

Producción de cobre mundial en porcentaje de toneladas métricas finas

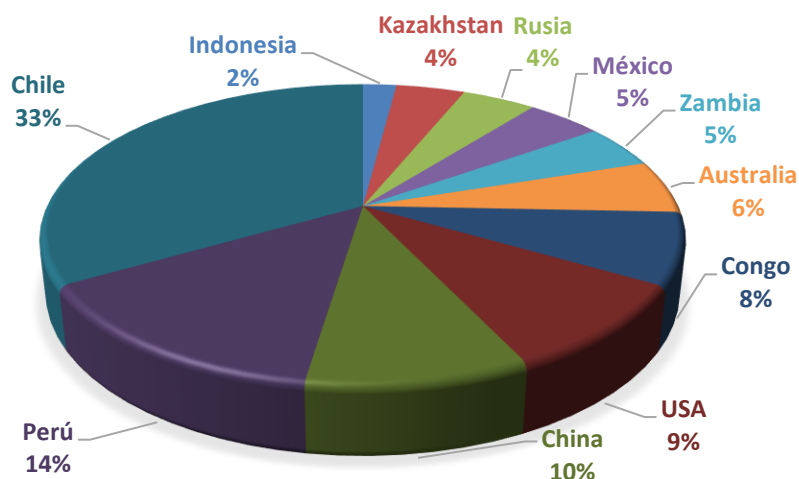


Ilustración 1: Producción de cobre mundial en porcentaje TMEF

En minería los procesos de transporte de mineral (carga y descarga de material en camiones y traspaso en correas transportadoras) y acopio son los más complejos en términos de polución, por lo que se hace necesario incorporar distintas medidas de mitigación.

Los sistemas de control se abordan de dos maneras usualmente: supresión de polvo y el control por vía seca de limpieza automática.

Los sistemas supresores de polvo tienen como objetivo evitar que se propague el polvo liviano producido por vaciado o traspaso. El polvo humedecido cae producto del peso y se acumula en el área donde se produjo. Generalmente estos sistemas están compuestos por una bomba de alta presión y bajo caudal, conectada a una batería de aspersores o un generador

de aire a presión para generar neblina. Estos sistemas necesitan mantenimiento regular, especialmente las boquillas aspersoras, que por su diámetro tienden a taparse con polvo o residuos del agua. El mantenimiento de estos equipos suele ser complejo debido a su ubicación, que generalmente es sobre la correa o el stockpile.

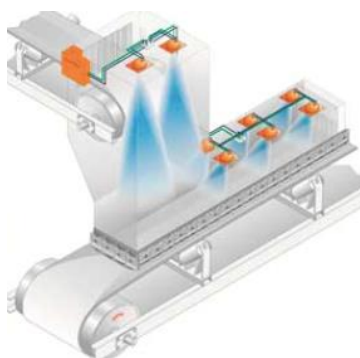


Ilustración 2: Sistema de supresión de polvo

Por otro lado, están los sistemas de captación de polvo vía seca de limpieza automática. Estos sistemas funcionan definiendo un espacio a controlar hermético, donde se instala una campana de captación del polvo. El polvo se concentra en la campana, para luego viajar a través de un arreglo de cañerías hacia un sistema de filtrado. Estos sistemas deben adaptarse o complementarse con el layout y estructura del área, para no interferir en el proceso. Además, es necesario que haya conexiones de aire comprimido para la limpieza del sistema de filtrado. Las dos últimas características de estos sistemas hacen que se definan como sistemas complejos, que se debiesen diseñar e instalar junto con la construcción de las plantas procesadoras de cobre.



Ilustración 3: Colector de polvo por vía seca

De acuerdo con lo presentado, los dos sistemas encargados de controlar el polvo requieren de una estructura compleja y necesitan distintos suministros (agua, aire, etc.). Frente a esta problemática, un sistema de captación de polvo independiente resulta ser una propuesta prometedora.

El sistema de captación independiente utiliza presión negativa, generada por un camión que posee una bomba de vacío. El modelo del camión a utilizar es el camión Supersucker [Anexo D]. El objetivo de este sistema es recolectar el polvo generado en el transporte del material a través de correas transportadores. El sistema cuenta con una serie de cañerías donde se conectarían las mangueras a utilizar por el equipo de mantenimiento.

El sistema propuesto posee flexibilidad, debido a su equipo de succión móvil. Además, las conexiones de cañerías son ligeras, permitiendo una reubicación o extensión en el futuro.

La metodología de diseño de este sistema es a través del cálculo de la potencia necesaria para mover el material. El cálculo se realizó bajo un escenario supuesto ubicado en una de las correas transportadoras de Puerto Ventanas, Chile.

Los objetivos a cumplir serán el diseño del sistema de acuerdo a las propiedades del material y análisis del comportamiento, en términos de desgaste, mantenimiento e inversión. Cada capítulo de la tesis abordará estos puntos.

1. Introducción al transporte neumático y caracterización de las propiedades del material

1.1. Sistemas de transporte neumático

Un sistema de transporte neumático de sólidos se define como el desplazamiento de sólidos granulares o polvos secos debido a un flujo de gas, en la mayoría de los casos, el aire es utilizado como gas transportador y su movimiento se genera debido a una presión positiva o negativa sobre él.

Un sistema de transporte neumático simple consiste en trasladar material a través de una tubería hacia cierto destino, con el aumento o disminución de aire a partir de la presión atmosférica.

Dentro de las principales características de estos sistemas, podemos destacar lo siguiente:

- Flujo de dos fases (gas + partículas) en suspensión
- Flujo turbulento
- Diámetros de cañería que van desde 1" a 20"
- Gas (usualmente aire) fluye a una determinada velocidad.
- Se pueden transportar materiales granulares y particulados relativamente secos y de fácil escurrimiento por gravedad.
- La distancia que recorrer puede variar desde algunos metros a kilómetros.
- El rango de material a mover puede ir desde partículas finas (micrones) hasta rocas (2").
- La mayoría de los sistemas de transporte neumático operan con capacidades desde 1 a 300 tph para distancias de hasta 1.000 metros y partículas bajo los 12 mm.
- Cañerías horizontales o verticales.

1.1.1. Clasificación del sistema de transporte neumático según las fases

Cuando se utiliza gas en un sistema de transporte neumático como medio de transporte para un sólido, se obtiene como resultado un fluido bifásico (gas + sólido). Hasta el momento no existe una modelación teórica de este tipo de flujos debido a que hay un gran número de variables involucradas; desde la gran variedad de materiales hasta la caótica interacción entre gas y sólido. Sin embargo, existen variadas clasificaciones y denominaciones que permiten caracterizar este tipo de fluidos. Una de las formas más comunes es a través del tipo de flujo bifásico que se desarrolla dentro del trayecto, basándose en la concentración de sólidos: flujo en fase diluida, flujo en fase densa y flujo semidenso.

Flujo en fase diluida

El flujo en fase diluida es el más conocido y se caracteriza por alta velocidad del gas, baja concentración de sólidos ($< 1\%$ en volumen) y baja pérdida de carga por unidad de longitud de tubería (< 5 mbar/m). El transporte neumático en fase diluida está limitado a cortas distancias. Bajo estas condiciones, las partículas sólidas se comportan como si se encontraran completamente suspendidas en el gas en forma individual, y las fuerzas fluido-partícula predominan.

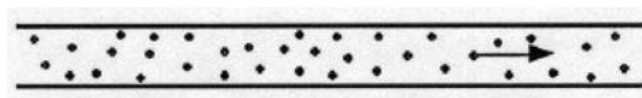


Ilustración 4: Flujo en fase diluida

Flujo en fase densa

El flujo en fase densa, caracterizado por baja velocidad del gas, alta concentración de sólidos ($> 30\%$ en volumen) y gran pérdida de carga por unidad de longitud de tubería (> 20 mbar/m). En el transporte en fase densa, las partículas no se encuentran completamente suspendidas y la interacción entre ellas es mucho mayor.

Las velocidades de transporte están entre 1,5 m/s y 5 m/s y el vacío en el transporte puede llegar a 737 mm Hg (Dynamic Air Inc, 2010).

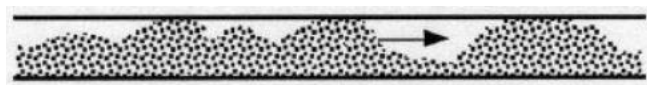


Ilustración 5: Flujo en fase densa

1.1.2. Clasificación de sistema según modo de operación (presión)

Los sistemas neumáticos pueden ser también clasificados de acuerdo con la presión de operación. Se distinguen dos principales categorías:

Sistemas de presión positiva

Los sistemas de transporte neumático con presión positiva son los más utilizados debido a su versatilidad. Se emplean normalmente para transportar materiales a granel desde una sola fuente hasta uno o múltiples destinos, sobre distancias más largas y con una capacidad mayor.

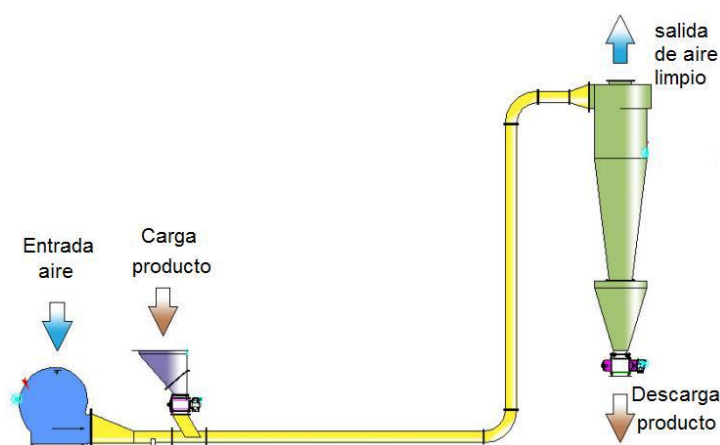


Ilustración 6: Sistema de presión positiva

Estos sistemas utilizan un soplador de desplazamiento positivo con uno o múltiples puntos de entrada de material en flujo descendente, cada uno de los cuales dosifica el producto en

las líneas de transporte por medio de una válvula rotativa que mantiene el diferencial de presión entre la atmósfera del ambiente y aquella de la línea de transporte. El material y el aire soplado a través de la línea salen en un solo punto o múltiples puntos de uso donde se separan por medio de un receptor de filtro o separador ciclónico o se alimentan directamente en los recipientes de procesos que se ventilan a los dispositivos de recolección de polvo en flujo descendente.

Generalmente los arreglos de presión positiva son de baja presión cuando se trabaja en fase diluida, y de alta presión cuando es en fase densa.

Sistema de presión negativa

Los sistemas de transporte neumático por presión negativa o vacío se emplean generalmente para transportar material desde múltiples fuentes hacia una única fuente de descarga. Estos sistemas ofrecen contención superior de fugas, mayor limpieza al momento del transporte, en particular cuando se manejan materiales peligrosos.

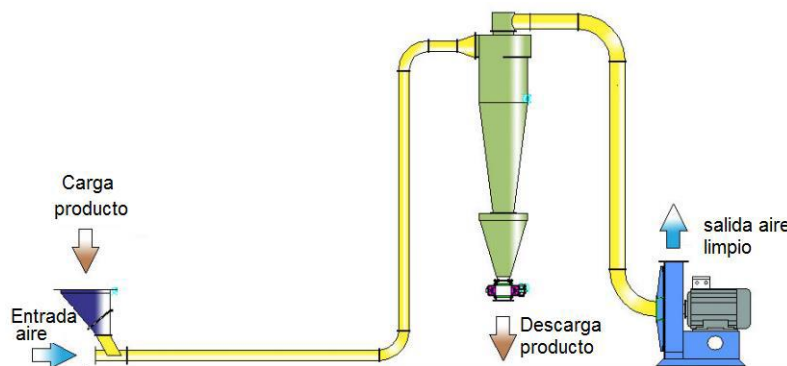


Ilustración 7: Sistema por vacío

La presión negativa se crea por medio de una bomba de vacío con desplazamiento positivo localizada en el extremo del flujo descendente del sistema. Por lo general, la fuente de movimiento para este tipo de sistemas es la presión atmosférica. En esta configuración, el vacío se genera por medio de sopladores de lóbulos rotativos, los cuales normalmente generan un diferencial de presión equivalente al 50% de la atmósfera del sitio de la

instalación del sistema. Estos sistemas son muy sensibles a la altura sobre el nivel del mar donde se implementan.

Los componentes básicos de estos sistemas son: tubería de transporte, sistema de ingreso de aire atmosférico en el punto de inicio del transporte, separador de producto sólido en el punto final del transporte y una bomba de vacío.

La bomba de vacío es un equipo diseñado para extraer gases del interior de recipientes, redes de tuberías o en cualquier proceso donde se requiera reducir la presión interior de un sistema, a valores inferiores a la atmosférica. El funcionamiento es similar al de su compresor homólogo, pero con la diferencia de que está pensada para aspirar y no para comprimir el aire o gas que aspira.

Los sistemas de vacío generalmente están limitados a distancias más cortas que los positivos y operación en fase diluida con baja carga de sólidos. Sin embargo, es posible lograr el transporte de una carga alta en sólidos y baja velocidad en distancias de aproximadamente menos de 60 m.

1.1.3. Diagrama de estado del sistema

El diagrama de estado es una forma de describir el funcionamiento del sistema a través de la caída de presión por unidad de largo de la cañería ($\Delta P/L$) en función de la velocidad de transporte del gas (V_g). El flujo de sólidos es un parámetro constante (W_s).

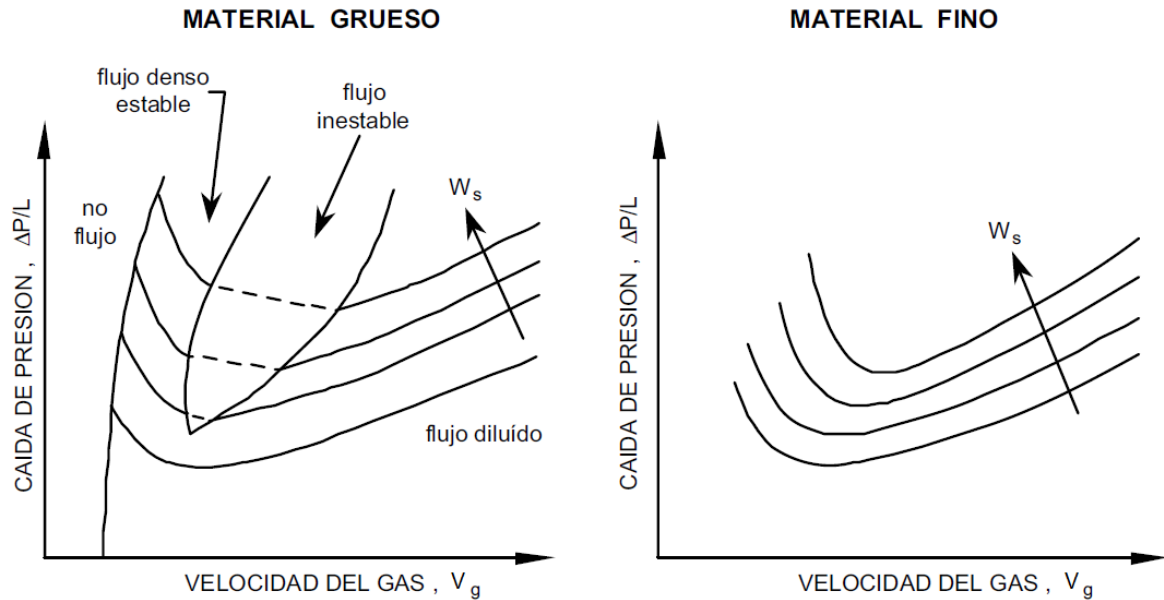


Ilustración 8: Diagrama de estado del sistema de transporte neumático para materiales gruesos y finos

La ilustración 8 muestra el diagrama de estado para materiales gruesos y finos, donde la caída de presión depende de la velocidad del gas de transporte y del flujo de sólidos. Para los sistemas en fase diluida, la caída de presión aumenta al aumentar la velocidad del gas, mientras que, en el caso de sistemas en fase densa, la caída de presión aumenta al disminuir la velocidad del gas debido a la mayor fricción de pared y menor área efectiva de la cañería. Existe una zona inestable entre ambos, y una zona bajo la cual ya no es posible transportar un material.

1.1.4. Ventajas y desventajas de un sistema de transporte neumático

Ventajas

- Sistema cerrado: Se protege al producto y al ambiente – Perfecto para materiales tóxicos y peligros.
- El espacio requerido es reducido.
- Acceso a áreas remotas en una planta.
- Mínimo riesgo de incendio y/o explosión (con gases inertes).
- Relativamente de fácil automatización y control.

- Bajos costos de inversión inicial y capital.
- Baja mantención y fácil operación.

Desventajas

- Sólo sirve para transportar materiales relativamente secos y no-cohesivos.
- Mayor consumo de energía que en un sistema de transporte mecánico similar.
- Eventual degradación de las partículas con materiales frágiles.
- Eventual desgaste de las cañerías y codos con materiales abrasivos.
- Eventuales atollos con materiales cohesivos y fibrosos.
- Limitaciones tecnológicas:
 - Distancia de transporte: hasta 1 km - 3,5 km máximo.
 - Tamaño de partículas: hasta ½” - 2” máximo.
 - Capacidad: hasta 600 tph - 1000 tph máximo.

1.2. Fundamentos del fluido bifásico dentro de la cañería

A continuación, se definirán los fundamentos utilizados para caracterizar y calcular el desarrollo del fluido dentro de la cañería. Se describirán las características y propiedades en ambas fases para luego revisar las teorías del comportamiento en conjunto. Además, se definirán las características del concentrado de cobre, que es sólido a granel a utilizar en este estudio.

1.2.1. Sólidos a granel

Los sólidos a granel se definen como un grupo de partículas discretas de cualquier tamaño o forma, donde el esfuerzo es transferido entre las partículas y el contenedor a través de fuerzas de fricción más que por viscosidad. Debido a esta fricción interna, los sólidos a granel pueden formar pilas.

En general, los sólidos a granel con partículas pequeñas, livianas, redondeadas, uniformes, suaves, homogéneas, no-abrasivas, no-fibrosas y no-frágiles son más fáciles de transportar neumáticamente que los materiales con partículas grandes, pesadas, angulares, rugosas, abrasivas, frágiles y con una amplia distribución de tamaño de partículas.

El comportamiento de un sistema de sólidos a granel a menudo se puede predecir de acuerdo con las siguientes características y propiedades del material:

- **Ángulo de reposo:** Este ángulo se determina apilando el material y midiendo la pendiente con respecto a la horizontal. Para la mayoría de los materiales, el ángulo de reposo varía significativamente dependiendo de cómo el apilado está formado.
- **Distribución del tamaño de partícula y contenido de humedad:** Partículas finas o húmedas son las más difíciles de manejar que las partículas gruesas o secas. Sin embargo, no se puede inferir la fluidez del material directamente desde estos dos parámetros.
- **Flujo libre vs no flujo libre:** Un flujo es considerado flujo libre o no, de acuerdo con cómo se extiende en el espacio que lo contiene. Este término es relativo al espacio que lo contiene y tampoco es un indicador directo de la fluidez del material.
- **Fuerza cohesiva:** Muchos sólidos a granel que son descargados pueden fluir casi como líquidos, donde el material no presenta fuerza cohesiva. Sin embargo, algunos sólidos pueden ser apretados por la palma de tu mano y ganar la suficiente fuerza para tomar la forma en que fue apretado cuando abres la palma de la mano. La presión de consolidación de un material varía desde cero en la superficie, creciendo proporcional a la profundidad del contenedor. La fuerza cohesiva puede ser medida como función de la presión de consolidación aplicada.
- **Fricción:** Cuando se caracteriza un sólido a granel la fricción interna y externa juega un papel importante. La fricción interna es causada por las partículas sólidas fluyendo una contra la otra, y esta fricción se puede expresar por los términos, ángulo de la

fricción interna y ángulo efectivo de la fricción interna. Ambos ángulos se determinan usando un tester de corte directo. Por otro lado, la fricción externa es expresada como ángulo de fricción de pared o coeficiente de fricción deslizante.

- Compresibilidad: En la mayoría de los casos, la densidad aparente de un material varía continuamente en función de la presión de consolidación que actúa sobre él. Por lo que no es suficiente describir un material simplemente como suelto o compactado. La relación densidad-presión a menudo se puede expresar como una línea recta mostrada en la ilustración 9.

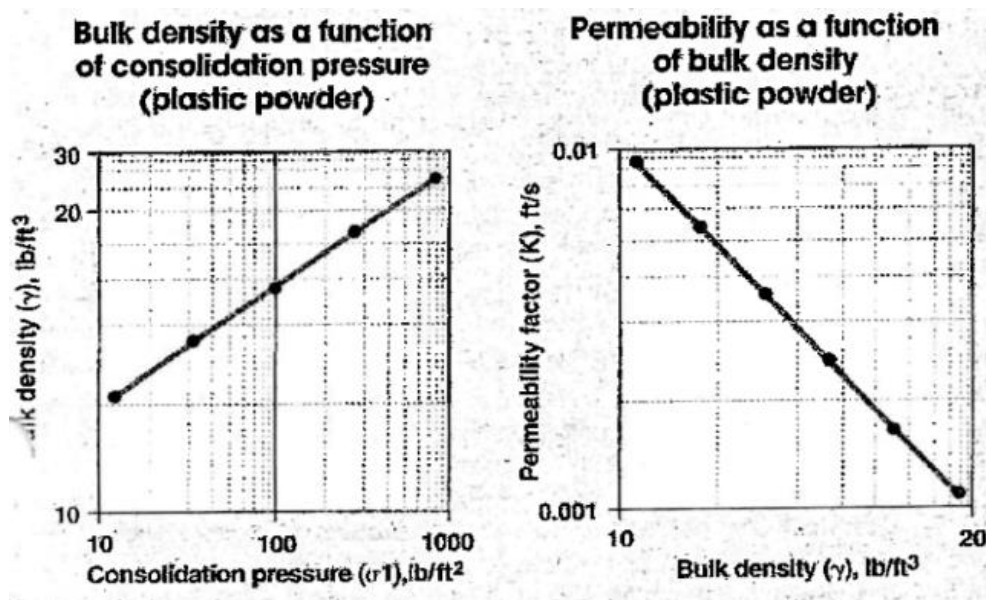


Ilustración 9: Aumento de la presión de consolidación y densidad aparente para polvo de plástico. Disminución de la permeabilidad cuando aumenta la densidad aparente para polvo de plástico.

- Permeabilidad: La permeabilidad es la velocidad superficial del gas o fluido pasando a través del material a granel. Este fenómeno se puede analizar considerando como el gas fluye a través de una cama de polvo cuando ocurre una diferencia de presión a través de la cama.

Cuando la velocidad es baja y el fluido a través de la cama es laminar, se puede utilizar la ley de Darcy que relaciona velocidad del gas con el gradiente de presión de gas dentro o a través de la cama. La ecuación queda de la siguiente forma:

$$u = -K \left(\frac{dp}{dx} \right)$$

K = Factor de permeabilidad del material

u = velocidad superficial relativa del gas a través de la cama de sólidos.

γ = Densidad del material en la cama.

$\frac{dp}{dx}$ = Gradiente del gas-presión actuando en el punto de la cama de sólidos donde la velocidad es calculada.

La permeabilidad es afectada por los siguientes factores:

- Tamaño de la partícula y forma
 - Contenido de humedad
 - Temperatura
- Tendencia a la segregación: Los sólidos a granel pueden presentar una tendencia a separarse durante la manipulación, lo que conlleva problemas de pérdida de material, baja producción, incremento del mantenimiento de equipos o en los costos de capital.

A continuación, se enumeran los principales mecanismos que son parte de la segregación:

- Tamizado: El fenómeno más común en la segregación de sólidos a granel ocurre cuando las partículas más pequeñas se mueven a través de una matriz de partículas más grandes.
- Fluidización: En general, las partículas finas o ligeras son menos permeables que las gruesas o pesadas, por lo que tienden a retener aire por más tiempo en sus espacios vacíos.

- Arrastre de partículas: Cuanto más finas y livianas sean las partículas, más tiempo permanecerán suspendidas en el aire durante la manipulación del material. Estas corrientes de aire pueden llevar las partículas lejos del punto de trabajo.
- Efecto de la trayectoria: Las partículas también pueden verse afectadas por la resistencia del aire. El material fino tiene menos impulso que el material grueso, por lo que su trayectoria horizontal es menor.

Las principales variables que afectan la tendencia de las partículas a segregarse son:

- Tamaño y forma de la partícula
 - Cohesión
 - Patrón de flujo del deposito
- Friabilidad: La capacidad de fragmentación de los sólidos a granel es una de las mayores preocupaciones en muchas industrias. Este fenómeno puede causar altos niveles de polvo, productos fuera de las especificaciones, exceso de producto reciclado y problemas de flujo.
 - Abrasividad: Los sólidos a granel que fluyen pueden desgastar las superficies. La determinación de la capa protectora de las superficies donde el material se moverá es fundamental para minimizar el mantenimiento.

Los siguientes factores pueden determinar la abrasividad del material:

- Dureza y superficies de la partícula
- Tamaño y forma de la partícula
- Humedad
- Temperatura
- Corrosión

Concentrado de cobre

El concentrado de cobre es el producto comercial que resulta de la extracción de cobre que se realiza a través de una serie de procesos químicos, físicos y electroquímicos.

Los principales componentes del concentrado son cobre, hierro y sulfido. Los porcentajes de cobre de este producto varían, dependiendo de la región, aproximadamente entre 24% - 36%.

El concentrado de cobre generalmente viene desde la concentradora en ducto de gran tamaño (pipeline) con un alto contenido de agua, por lo que cuando llega a nivel de puerto se realiza un proceso de filtración y secado, que reduce la humedad a un porcentaje entre 8% - 9%.

La densidad del material puede variar entre $1.6 - 1.8 \text{ ton}/\text{m}^3$ y el ángulo de reposo a utilizar para dimensionar el sistema es generalmente de 35° .

El concentrado de cobre es considerado altamente corrosivo y abrasivo. En el Anexo A se encuentra la ficha técnica del material a considerar.



Ilustración 10: Concentrado de cobre.

1.2.2 Flujo de gas

Cuando un fluido circula por una cañería lo puede hacer en régimen laminar o turbulento. La diferencia entre estos dos regímenes se encuentra en el comportamiento de las partículas fluidas, que a su vez depende del balance entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas o

de rozamiento. El número de Reynolds es el parámetro que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en el interior de una corriente, por lo que el régimen del flujo va a depender de su valor.

- *Flujo laminar:* $Re = \frac{U_g D}{\nu} < 2.300$
- *Flujo turbulento:* $Re = \frac{U_g D}{\nu} > 2.300$

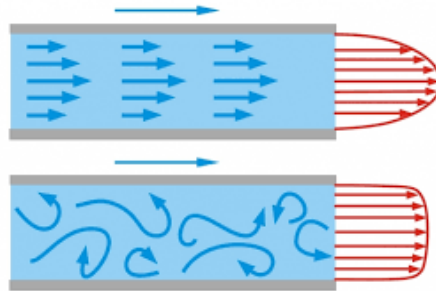


Ilustración 11: Flujo laminar v/s Flujo turbulento

Densidad del aire (Ley de gases ideales)

La ley de los gases ideales es la ecuación de estado del gas ideal, un gas hipotético formado por partículas puntuales sin atracción ni repulsión entre ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos (conservación de momento y energía cinética). La energía cinética es directamente proporcional a la temperatura en un gas ideal. Los gases reales que más se aproximan al comportamiento del gas ideal son los gases monoatómicos en condiciones de baja presión y alta temperatura.

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

Por lo tanto, asumiendo el aire como un gas ideal a 20°C en condiciones estándares obtenemos:

$$\rho = \frac{101.300}{287 \times (273 + 20)} = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

Sin embargo, es importante considerar los efectos de la altura geográfica en la densidad del aire, ya que su comportamiento obedece al siguiente gráfico:

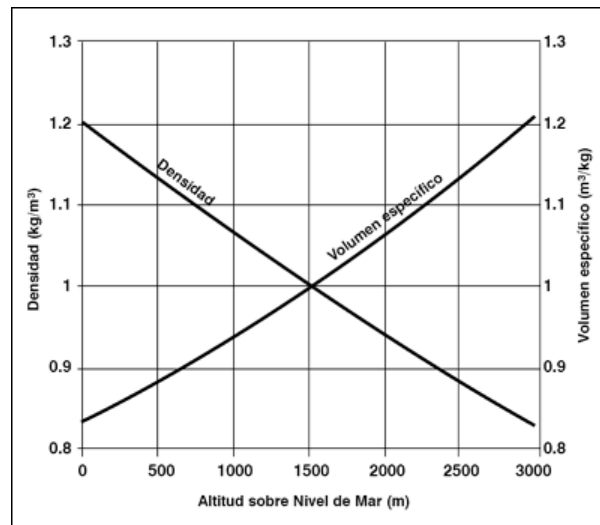


Ilustración 12: Densidad aire vs Altura geográfica

Viscosidad del aire

La viscosidad es una propiedad física característica de todos los fluidos que mide la resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o de tracción. Cuando un fluido se mueve forzado por un tubo, las partículas que componen el fluido se mueven más rápido cerca del eje longitudinal del tubo, y más lentas cerca de las paredes. Por lo tanto, es necesario que exista una tensión cortante (como una diferencia de presión) para sobrepasar la resistencia de fricción entre las capas del líquido, y que el fluido se siga moviendo por el tubo. Para un mismo perfil radial de velocidades, la tensión requerida es proporcional a la viscosidad del fluido.

- Viscosidad: $\mu = 5 \times 10^{-8} \times T + 1,71 \times 10^{-5} \frac{kg \cdot s}{m}$
- Viscosidad del aire a 50°C: $\mu \approx 0,00002 \frac{kg}{m} s$

Velocidad media en una tubería

Para efectos de cálculos consideraremos la velocidad media en una tubería como:

$$U = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

Caída de presión en una cañería recta de sección circular con flujo completamente desarrollado

El flujo de un gas en una tubería viene acompañado de una pérdida de energía. Por la ecuación de Darcy-Weisbach podemos calcular la pérdida de carga debida a la fricción dentro de una tubería.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho U^2}{2}$$

Donde f es el factor de fricción adimensional y varía de acuerdo con los parámetros de la tubería y el flujo.

Pérdidas menores en singularidades

Las pérdidas de carga “menores” se producen, en general, como resultado de una variación significativa de la configuración del flujo. Por lo tanto, tienen lugar en las contracciones o ensanchamientos, válvulas, accesorios, codos, etc. Finalmente, las pérdidas menores se pueden obtener de la siguiente manera:

$$\Delta P = \sum K_i \frac{\rho U^2}{2}$$

A continuación, se presentan los valores referenciales de las pérdidas de cargas:

Description	k
Close radius bends (R/D = 1)	
22.5°	0.15
45°	0.3
90°	0.75
Long radius bends (R/D = 2 to 6)	
22.5°	0.1

45°	0.2
90°	0.4
Tees (90° equal offtake)	
Flow through	0.2
Full flow to branch	1.9
Full flow from branch	1.6
Valve	
Full open sluice or gate valve	0.2
Full open globe valve	10.0
Pipe entry and exit	
Square entry	0.5
Protruding entry	0.8
Exit	1.0

Tabla 1: Pérdida de carga en singularidades

Dinámica de partícula

La dinámica estudia la relación entre el movimiento de un cuerpo y las causas que lo producen. Sabemos que el movimiento es el resultado de la interacción entre partículas. Donde las interacciones se expresan cuantitativamente en términos de fuerzas.

Para determinar la dinámica de la partícula es importante considerar las leyes de Newton como principios de mecánica clásica.

Dentro de la dinámica de la partícula es importante considerar los siguientes factores:

Interacción de las dos fases: gas + partículas sólidas

Dentro del sistema de transporte neumático al utilizar un gas como medio de transporte para un sólido se obtiene como resultado fluidos no newtonianos, mismos que son aplicados dentro de la industria. Sin embargo, no es fácil caracterizar y modelar sus propiedades físicas. Para este estudio se considerará el flujo en fase diluida.

Fuerza de arrastre que actúa sobre una partícula

Se conoce como la fuerza de rozamiento que opone un fluido al movimiento de un objeto sólido. La fuerza de rozamiento es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa del objeto respecto del fluido y la constante de proporcionalidad denominada coeficiente de arrastre, que depende a su vez del número de Reynolds.

$$F_d = C_d A_p \frac{\rho_g U_g^2}{2}$$

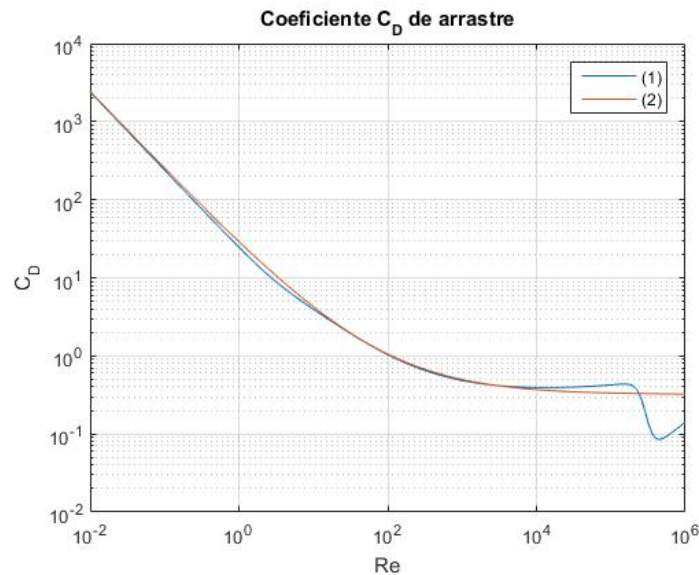


Ilustración 13: Coeficiente de arrastre sobre una esfera

Además, se deben considerar otras fuerzas como: Sustentación, Gravitacional, Fricción, Adhesión, Electrostática, Magnética, Interlocking, enlaces químicos y centrífuga (en curvas).

Velocidad terminal de caída

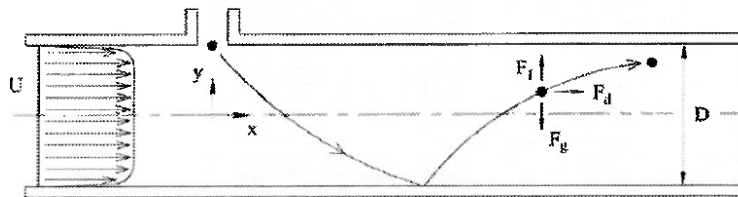
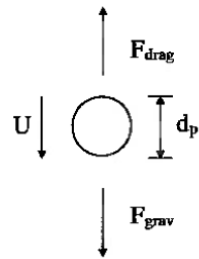


Ilustración 14: Dinámica de la partícula en punto de alimentación

Para determinar la velocidad terminal de caída es necesario considerar la ley de Newton de movimiento, $\sum F = m \times a$, principios de conservación de masa, momentum y energía, condiciones de contorno, etc.

La velocidad terminal de caída corresponde entonces a la velocidad final que alcanza un cuerpo al caer cuando su peso equipara a la fuerza de arrastre.

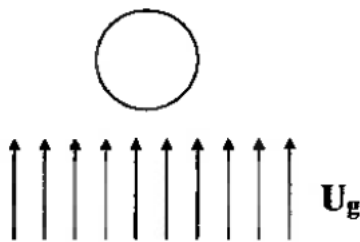
Equilibrio de fuerzas en el eje vertical: $F_d = F_{gravedad}$



$$C_d \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{\rho_g U^2}{2} = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g$$

Resolviendo para U:

$$U_t = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_p g (\rho_p - \rho_g)}{C_d \rho_g}}$$



Si:

- $U_g > U_t$, partícula subirá
- $U_g = U_t$, en equilibrio
- $U_g < U_t$, partícula caerá

Velocidad de transporte

Uno de los parámetros más importantes para el diseño y la operación eficiente de sistemas de transporte neumático es la correcta determinación de la velocidad de transporte. Sistemas diseñados para operar a altas velocidades están sujetos a un alto consumo energético, degradación y/o segregación del material y desgaste excesivo de cañerías, lo cual se puede traducir en una operación costosa y poco rentable. Por otro lado, sistemas diseñados para

operar a bajas velocidades pueden sufrir depositación de partículas en el fondo de la cañería, flujo errático, e incluso embancar la cañería.

Aún no existe un procedimiento universalmente reconocido para determinar la velocidad mínima de transporte en base a las características del material, dimensiones y trazado de cañería, y las condiciones de operación para un material y sistema de transporte en particular. Sin embargo, existen en la literatura especializada una serie de términos y definiciones para referirse a la velocidad mínima de transporte. Por ejemplo, Matsumoto (1977) definió la velocidad de depositación U_{gs} , como “la velocidad mínima de transporte en un sistema que contenga una cañería horizontal para prevenir que las partículas se depositen en el fondo de ella”, y propuso las siguientes expresiones para estimarla para partículas finas y gruesas respectivamente:

$$\mu = 0,556 \left(\frac{d_p}{D} \right)^{1,43} \left(\frac{U_{gs}}{\sqrt{gD}} \right)^4 \rightarrow d_p < d_p^* = 1,39D \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{-0,74}$$

$$\mu = 0,373 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1,06} \left(\frac{U_{terminal}}{10\sqrt{gd_p}} \right)^{-3,7} \left(\frac{U_{gs}}{10\sqrt{gD}} \right)^{3,61} \rightarrow d_p > d_p^*$$

Donde μ representa la relación de carga (flujo de sólidos/flujo de gas), d_p representa el diámetro medio de la partícula, d_p^* representa el diámetro crítico de la partícula y $U_{terminal}$ representa la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual.

Por su parte, Rizk (1985) definió la velocidad óptima de transporte, $U_{g op}$, como aquella velocidad en que se produce un mínimo en las curvas de caída de presión $\Delta P/L$ del diagrama de estado (ilustración 5) y propuso la siguiente expresión para partículas relativamente gruesas:

$$\mu = \frac{1}{10^x} \left(\frac{U_{g op}}{\sqrt{gD}} \right)^y \rightarrow U_{g op} = \sqrt{gD} 10^{xy} \mu^{1/y}$$

Donde: $x = 1,44d_p + 1,96$, d_p está dado en [mm]
 $y = 1,1d_p + 2,5$

Schade (1987) definió la velocidad crítica, $U_{g\ crit}$, como “la velocidad para que no existan partículas en reposo dentro de una cañería horizontal” y extrapoló los resultados de sus mediciones de la velocidad de la partícula como función de la velocidad del gas de transporte para obtener la siguiente expresión:

$$U_{g\ crit} = \sqrt{gD} \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0,025} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,34} \mu^{0,11}$$

En general, todos los investigadores coinciden en que la velocidad mínima de transporte para un material determinado y sistema dado aumenta con el tamaño de las partículas, densidad de partículas, diámetro de cañería, y relación de carga del sistema (μ).

Deposición de partículas en cañerías

La figura muestra esquemáticamente el fenómeno de deposición de partículas sólidas en cañerías horizontales. Si la velocidad del gas de transporte, U_g , de un flujo homogéneo de gas más sólidos se disminuye gradualmente, manteniendo el flujo de sólidos constante, W_s , la capacidad del flujo para transportar partículas en suspensión disminuye hasta que alcanza un punto en que ésta sencillamente se anula y las partículas caen y se depositan en el fondo de la cañería. La velocidad del gas en este punto se define como la Velocidad de depositación, y corresponde a la velocidad mínima de transporte de un sistema de transporte neumático que contenga una cañería horizontal para prevenir que las partículas se depositen en el fondo de ella.

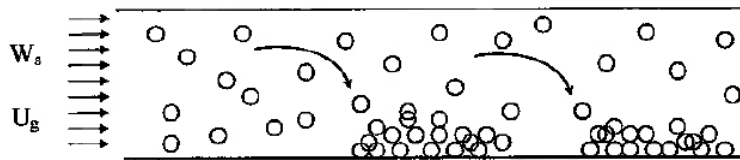


Ilustración 15: Esquema del fenómeno de deposición de partículas sólidas en cañerías horizontales

Mediante análisis dimensional es posible identificar las variables más importantes que afectan la velocidad de depositación de un material en particular, agrupándolas de la siguiente manera:

$$f \left\{ \frac{U_g}{\sqrt{d_p g}}, \frac{\rho_p}{\rho_g}, \phi, \frac{D}{d_p}, \frac{\rho_g d_p U_g}{\mu_{gas}}, \frac{W_s}{W_g} \right\} = 0$$

Donde el primer grupo (número de Froude) contiene la aceleración de gravedad, el segundo grupo corresponde a la relación entre densidad de ambas fases, el tercer grupo representa la forma de las partículas (esfericidad), el cuarto grupo corresponde a la relación geométrica entre la cañería y el tamaño de las partículas, el quinto grupo (número de Reynolds modificado) contiene el término de viscosidad del gas de transporte, y el sexto grupo representa la relación de carga y/o concentración de flujo e incluye el flujo de sólidos.

La forma de la función f se puede determinar experimentalmente mediante la realización de ensayos en un sistema de transporte neumático en un laboratorio. Estos ensayos se deben realizar variando cada uno de los grupos adimensionales y manteniendo los resultados constantes.

Así, experimentalmente se comprobó que la velocidad de depositación aumenta con la relación de carga, μ , con el tamaño de partículas, d_p , y con la densidad de la partícula, ρ_p . Además, se encontró la siguiente correlación para estimar este parámetro:

$$\frac{U_g}{\sqrt{d_p g}} = \frac{U_{gso}}{\sqrt{d_p g}} + 0,00224 \mu^{0,5} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1,25}$$

Donde U_{gso} representa la velocidad de depositación de una partícula individual. Esta expresión es válida en el rango de $1200 < \rho_p/\rho_g < 3200$, $\mu < 5$, y sólo para $D = 50$ mm I.D.

Desprendimiento de partículas sólidas en cañerías

La ilustración muestra esquemáticamente el fenómeno de desprendimiento (pickup) de partículas sólidas en cañerías horizontales. Básicamente este fenómeno difiere del caso anterior con relación a la posición inicial de las partículas dentro de la cañería. En el caso del fenómeno de desprendimiento, las partículas inicialmente en reposo forman una capa o depósito sobre el fondo de la cañería.

Si la velocidad del flujo de gas se aumenta gradualmente, la capacidad del flujo de transportar partículas en suspensión aumenta y se alcanzará un punto en el que las partículas se separan de la superficie y la capa de material en reposo comienza a erosionarse debido al arrastre y desprendimiento de las partículas. La velocidad del gas en este punto se define como velocidad de desprendimiento, y corresponde a la velocidad mínima necesaria para desprender, resuspender, arrastrar y/o separar partículas sólidas inicialmente en reposo en un sistema de transporte neumático que contenga una cañería horizontal.

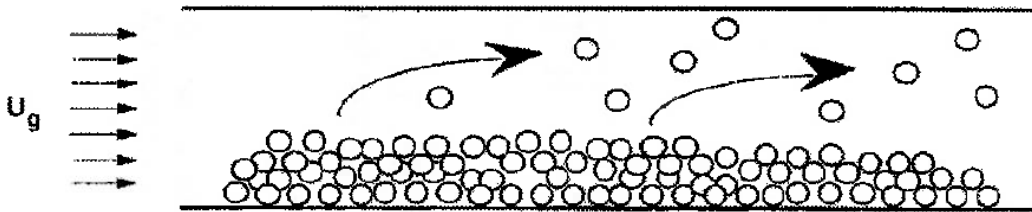


Ilustración 16: Esquema de fenómeno de desprendimiento de partículas sólidas en cañerías horizontales

En forma similar, mediante análisis dimensional es posible identificar las variables más importantes que afectan a la velocidad del desprendimiento de un material en particular, agrupándolas de la siguiente manera:

$$f \left\{ \frac{U_g}{\sqrt{d_p g}}, \frac{\rho_p}{\rho_g}, \phi, \frac{D}{d_p}, \frac{\rho_g d_p U_g}{\mu_{gas}} \right\} = 0$$

La forma de esta función f se puede determinar experimentalmente mediante la realización de ensayos en un sistema de transporte neumático de laboratorio. Experimentalmente se comprobó que la velocidad de desprendimiento aumenta con el tamaño de partículas, con el diámetro de cañería y con la densidad de partícula y es prácticamente independiente de la viscosidad del gas de transporte. Además, se encontró la siguiente correlación para estimar este parámetro:

$$\frac{U_{gpu}}{\sqrt{d_p g}} = 0,0428 Re_p^{0,175} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0,75} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0,25}$$

Donde U_{gpu} representa la velocidad de desprendimiento. Esta expresión es válida en el rango de $25 < Re_p < 5000$, $8 < D/d_p < 1340$, y $700 < \rho_p/\rho_g < 4240$. La desviación absoluta de esta correlación es de 0,8 m/s y el error un 11%.

1.3. Metodología a utilizar para el diseño del sistema

El diseño de un sistema neumático sigue siendo una materia en evolución que depende del material y de la experiencia en terreno. Sin embargo, existen métodos que permiten obtener valores preliminares y con estos es posible dimensionar los sistemas.

El método a utilizar será el propuesto por el ingeniero John Fischer en el artículo mostrado en el Anexo B “Practical Pneumatic Conveyor Design”. Este método se basa en calcular los requerimientos energéticos. Estos requerimientos son expresados en unidades de presión y con estos valores se estima la potencia del sistema.

A continuación, se describen los 5 factores que entregaran las pérdidas de presión a través del sistema:

1.- Energía de aceleración: Energía necesaria para sobrepasar la inercia de los sólidos y que estos entren en movimiento.

$$E_1 = \frac{M v^2}{2g}$$

2.- Energía de elevación vertical: Energía requerida para elevar los sólidos:

$$E_2 = M \times d$$

3.- Energía de corriente horizontal: Energía requerida para mantener los sólidos suspendidos:

$$E_3 = M \times d \times f$$

4.- Energía asociada a las pérdidas singulares (Codos):

$$E_4 = \frac{M v^2}{g R} \times d \times f$$

M = Flujo de sólidos ft-lb/min

v = Velocidad lb/min

g = Aceleración de gravedad ft/sec²

d = Distancia alrededor de la curva ft

R = Radio de la curva, ft

f = Coeficiente de fricción (tangente del ángulo de deslizamiento) entre el material y el ducto.

5.- Energía asociada a las pérdidas en el ducto.

Este valor se obtiene desde el gráfico mostrado en la ilustración 14. El gráfico es presentado por Marks, en el manual “Mechanical engineers handbook”,

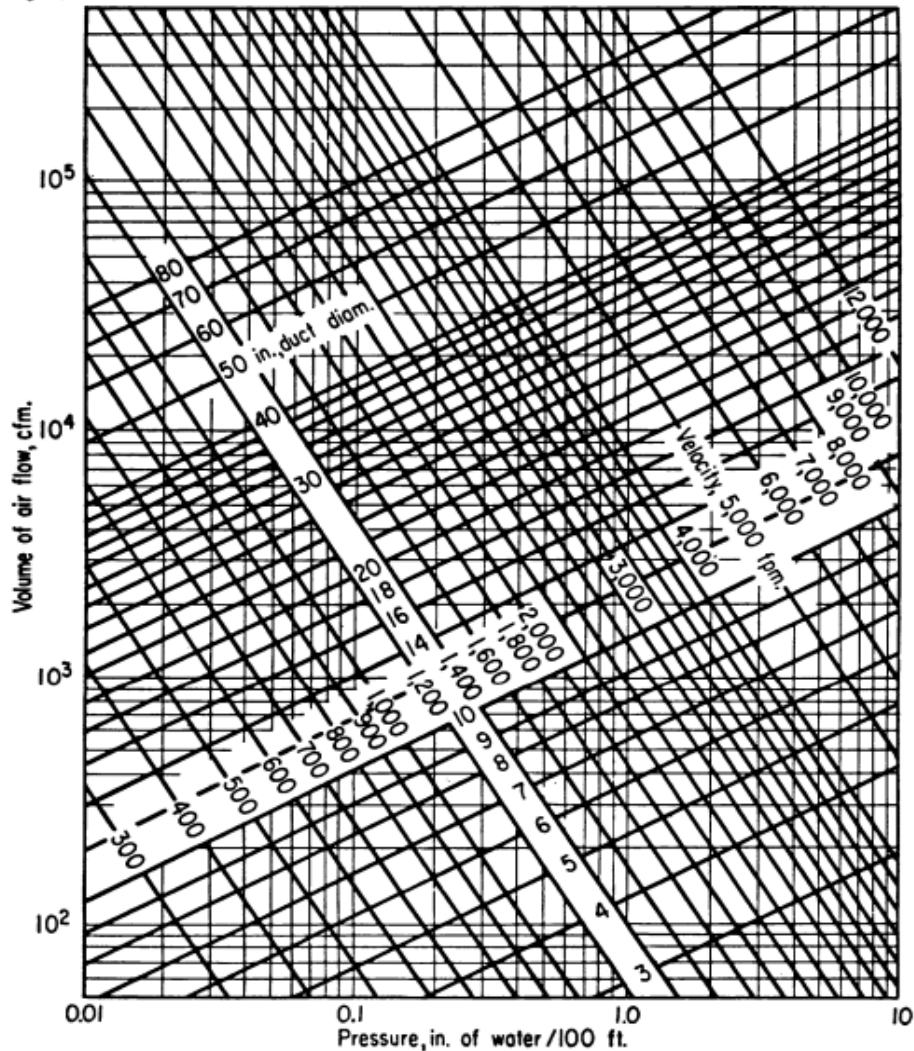


Ilustración 17: Gráfico de velocidades de transporte en pies por minuto, pérdida de presión en pulgadas de agua cada 100 pies y flujo de aire en pies cúbicos por minuto

El cálculo de estos requerimientos está basado en una variable que es transversal: la velocidad. Como revisamos anteriormente varias propuestas basadas en estudios de laboratorio entregan las velocidades críticas, en donde el diseñador debe de igual forma entregar una velocidad de trabajo. En este caso, la velocidad de trabajo se determinará de acuerdo con la tabla de velocidades de transporte en fase diluida propuesta en el Manual Jorgensen, R., Fan Engineering, Buffalo Forge Co., 7th Ed. 1970.

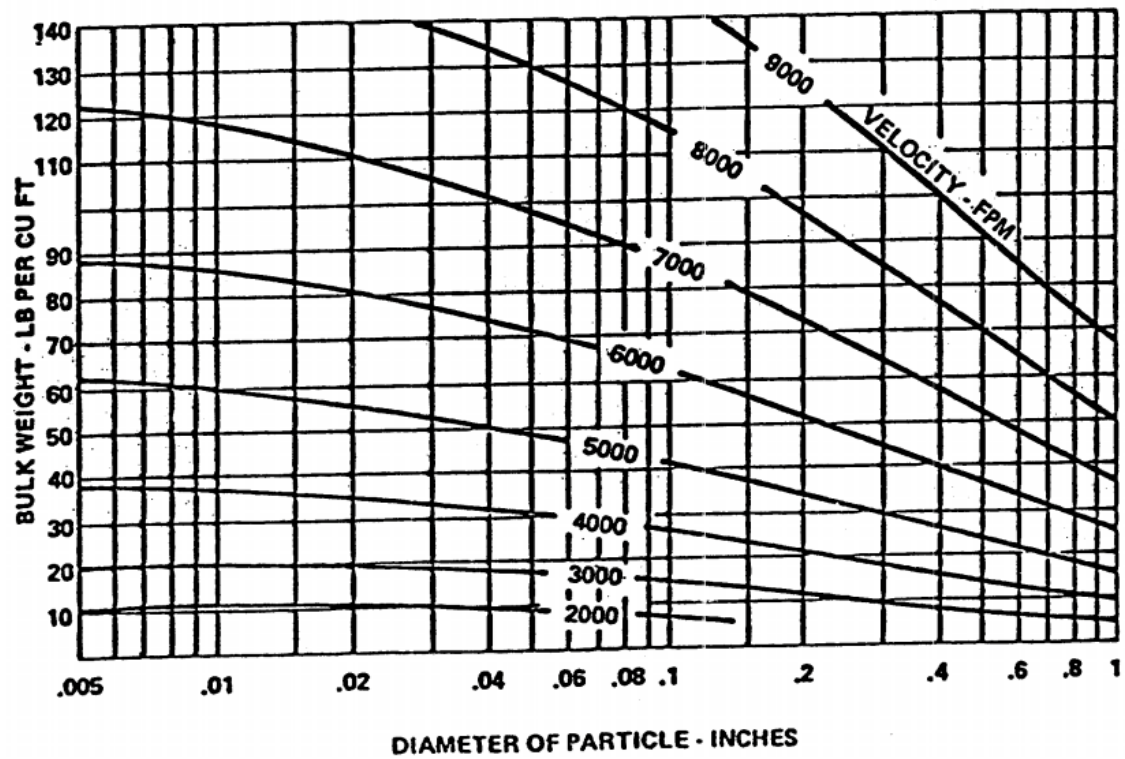


Ilustración 18: Gráfico de velocidades de transporte en fase diluida con respecto al diámetro de partícula en pulgadas y peso del material en libras por pie cubico.

2. Definición del sistema generador de vacío

El sistema generador de vacío o presión negativa a utilizar es el camión modelo Supersucker. Esta unidad está diseñada para tomar neumáticamente y transportar el material desde puntos cercanos o remotos.



Ilustración 19: Camión Supersucker

La máquina está diseñada para recolectar el material al final de la línea de succión y moviéndolo a la tolva. Al entrar en el cuerpo colector, la mayor parte del material se deposita en el fondo por gravedad y reducción de la velocidad del aire. Luego, pasa a un separador centrífugo, donde el material decanta bajo el separador y las partículas limpias salen por el lado del separador. El aire, ya con nivel mucho menor de partículas, pasa hacia dos líneas con cámaras de polvo, para finalizar en una cámara de filtro. El aire limpio continúa por un ducto y llega a una criba final. Desde ahí pasa por la bomba de vacío y sale por el escape a la atmósfera mediante el silenciador de descarga.

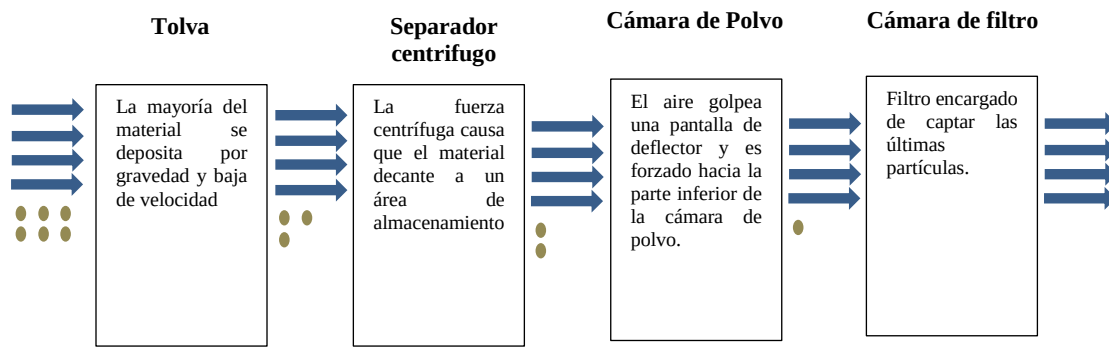


Ilustración 20: Resumen del proceso de filtración de polvo dentro del camión Supersucker

El sistema de vacío a utilizar es “transporte de aire”. Este método consiste en una bomba de vacío que funciona a alta velocidad, lo que permite generar el flujo de aire necesario para capturar el material.

Para que el sistema funcione eficientemente, todos los puntos de conexión deben ser herméticos.

A continuación, se detalla el proceso de captación del aire con el material:

- 1.- El concentrado de cobre junto con el aire entran por la conexión a la tubería marcada como número 1.
- 2.- La velocidad del aire se reduce y se produce la depositación en la tolva. El aire con el material fino sale de la tolva por el flotador esférico indicado como número 2. El flotador esférico actúa como corte de vacío cuando la tolva se llena de líquido.
- 3.- El aire sigue su camino hacia el separador centrífugo indicado como número 4. Como se puede ver en el esquema, está en el lado derecho de la unidad.
- 4.- El aire continúa hacia afuera y se divide en las dos cámaras (número 5).
- 5.- Luego el aire pasa al primer proceso de filtrado (número 6).

6.- El aire limpio sale por la parte superior de la manga del filtro y continúa hacia abajo por un ducto en la parte frontal. Este ducto tiene una conexión hacia el filtro final indicado como número 7. El filtro final es una criba metálica perforada.

7.- El aire finalmente sale del filtro final y llega a la admisión de la bomba de vacío, indicada como número 8.

8.- El aire pasa horizontalmente por la bomba de vacío. La bomba de vacío genera calor por el trabajo que realiza. La cantidad de calor generado dependerá de la velocidad de la bomba y del vacío en operación.

9.- En la salida de la bomba de vacío, se encuentra un silenciador de descarga (número 9). El aire pasa por este antes de ser descargado a la atmósfera.

10.- La bomba de vacío también posee un silenciador en la admisión de aire de enfriamiento. Este aire enfría la bomba de vacío permitiendo una operación de alto vacío.

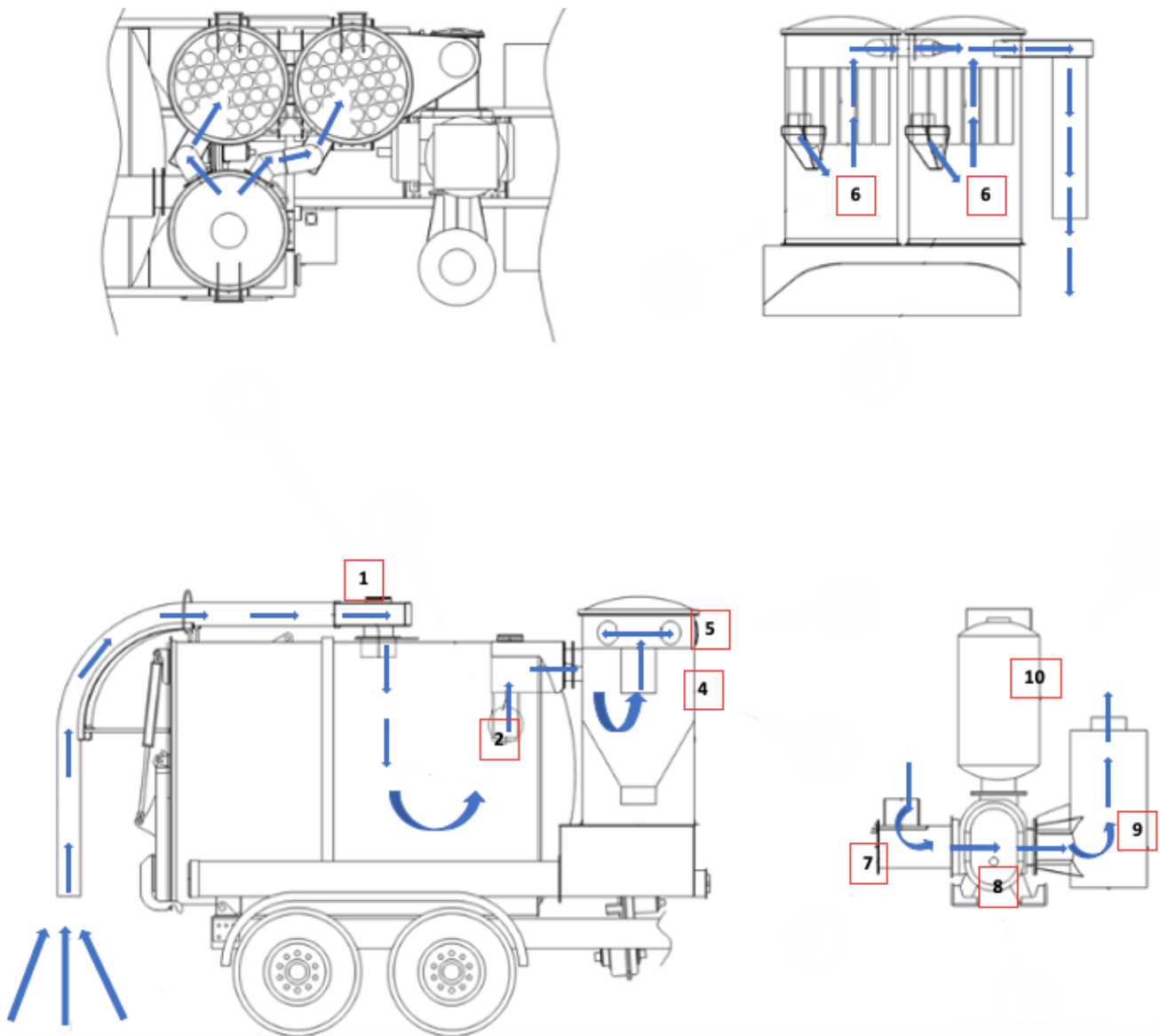


Ilustración 21: Recorrido del aire dentro del camión Supersucker

Caja de transferencia

El modelo de caja de transferencia a utilizar es el PFT-PCV/3000. Este equipo se utiliza para desviar efectivamente la potencia del motor a los sistemas principales y auxiliares de la máquina. La transmisión principal se debe activar y desactivar en una posición estacionaria. El sistema de transferencia es controlado por una palanca de cambios neumática de doble acción, que permite el desvío de la potencia al eje trasero o a la salida del toma fuerza.

La palanca de cambios de doble acción proporciona un sistema de seguridad que mantiene su posición bajo carga incluso en caso de pérdida de presión en el sistema. El cilindro está provisto de un interruptor eléctrico que emite una señal cuando la toma de fuerza esta lista; este interruptor debe estar conectado al sistema de seguridad de la máquina, para reducir el riesgo de mal uso.

La caja de transmisión debe estar dentro del chasis del Supertruck para cumplir con el diseño adecuado del tren de transmisión. Se recomienda una instalación vertical para optimizar la lubricación de los elementos internos. La inclinación de la caja, de adelante hacia atrás, debe estar diseñada para adaptarse a los ángulos de operación de la línea de transmisión.



Ilustración 22: Caja de transferencia PFCT-PCV/3000

Bomba de vacío

La bomba de vacío funciona mediante el accionamiento de la caja de transferencia. Para la operación de la bomba de vacío, el eje de accionamiento trasero se desacopla y se acopla la bomba de vacío. La transmisión debe estar en neutro, los frenos de estacionamiento activados y cuñas para las ruedas situadas correctamente antes de comenzar el proceso de acoplamiento. El motor se debe encender y dejar en marcha lenta. Se debe esperar a que el aire en el chasis se acumule a 120 psi.

Para el apagado de la bomba de vacío se debe esperar a que el material que está en la línea de succión llegue a la tolva. Luego apagar el sistema de impulso, abrir la válvula de alivio de vacío y realizar el desacople de la bomba de vacío con la caja de transmisión.

El modelo de bomba a utilizar es el DVJ WHISPAIR, Dry Exhauster. Esta es una bomba de tipo desplazamiento positivo, donde la capacidad está determinada por el tamaño del engranaje, la velocidad de operación y las condiciones de entrada. Posee dos impulsores de lóbulo doble montados en ejes paralelos y rodando dirección opuesta, en un cilindro cerrado en los extremos por placas. A medida que giran los impulsores, el aire es aspirado en un lado del cilindro y expulsado por el lado opuesto contra la presión existente. Por lo tanto, el diferencial de presión depende de la resistencia de los sistemas conectados. En la operación de vacío, la presión de descarga difiere de la atmosférica solo por la contrapresión en el sistema de descarga. El aire a presión atmosférica fluye hacia el área cerrada B (mostrada en la ilustración 23), para luego ir hacia el área cerrada A.

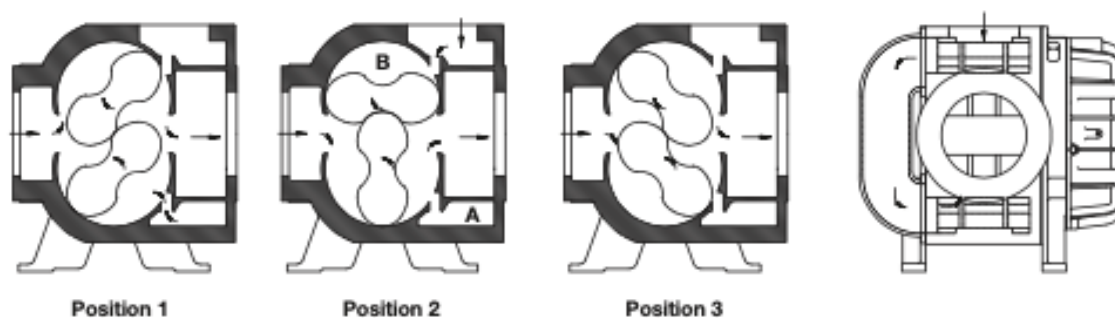


Ilustración 23: Operación bomba DVJ WHISPAIR

Las limitaciones de operación del soplador de lóbulo rotativo DVJ están determinadas por el tamaño de frame. En la ilustración 24 se indican los parámetros de vacío, velocidad y temperatura para cada frame. La operación máxima será determinada por el parámetro máximo que se alcance primero: presión/vacío, temperatura o velocidad.

Frame Size	Inlet Vacuum		Temperature Rise		Speed
	Inches HG	mm HG.	°F	°C	RPM Maximum
1016	27.0	684	275	153	1800
1021	27.0	684	300	167	1800
1220	27.0	684	275	153	1500
1222	24.0	610	275	153	1500
1428	22.5	571	300	167	1300
1431*	22.0	558	300	167	1300
1639	18.5	470	300	167	1130
1643	16.5	420	300	167	1130
1833	24.0	610	300	167	1000
1838	21.5	546	300	167	1000

Ilustración 24: Condiciones de operación máximas para el modelo de soplador DVJ

Válvulas de alivio

El sistema utiliza válvulas de alivio de vacío en la línea de entrada y descarga como medida de protección contra corte o bloqueo de estas líneas. Estas válvulas son de tipo “T” y son operadas remotamente. Consisten en una puerta abisagrada que se abre y cierra mediante un cilindro neumático. El cilindro es controlado por el operador en el panel de control o el remoto colgante o el remoto inalámbrico.



Ilustración 25: Válvula de vacío tipo “T”

3. Configuración del sistema neumático

El sistema neumático propuesto en este trabajo tendrá como objetivo realizar la limpieza en las áreas próximas a las correas transportadoras, que van desde el punto donde se realiza el secado del concentrado de cobre hasta los alimentadores que toman el concentrado de cobre para el carguío en los barcos.

Para el análisis se seleccionó la correa transportadora ubicada en Puerto Ventanas. Esta correa posee casi 1200 metros de largo y está completamente encapsulada. Se encuentra a una altura aproximada de 15 metros sobre el nivel donde se ubicará el camión Supersucker. No se considerará la pendiente de la correa, ya que es sistema se ubicará entre los puntos donde la correa es casi horizontal.



Ilustración 26: Correa transportadora Puerto Ventanas

Se propone utilizar dos cañerías verticales de 6" HDPE PN10 fijas a la estructura, que se unen a una conexión T a la altura de la sala donde se encuentran las correas.

Desde la conexión T, se acoplan dos cañerías de 6" de HDPE PN10 que van hacia cada lado de la correa como se muestra en la ilustración 27. En cada cañería horizontal se colocarán 5 conexiones con válvulas de corte, donde el operador podrá conectar la manguera flexible y realizar el mantenimiento.

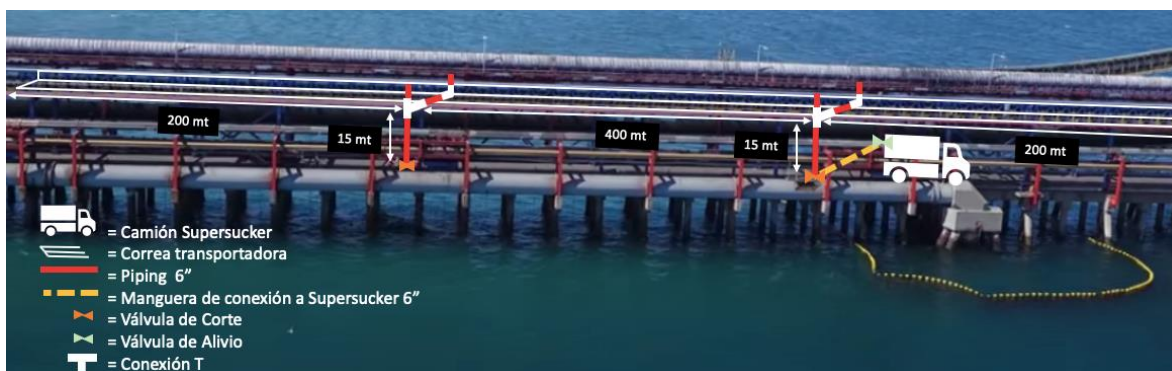


Ilustración 27: Esquema del sistema instalado 1

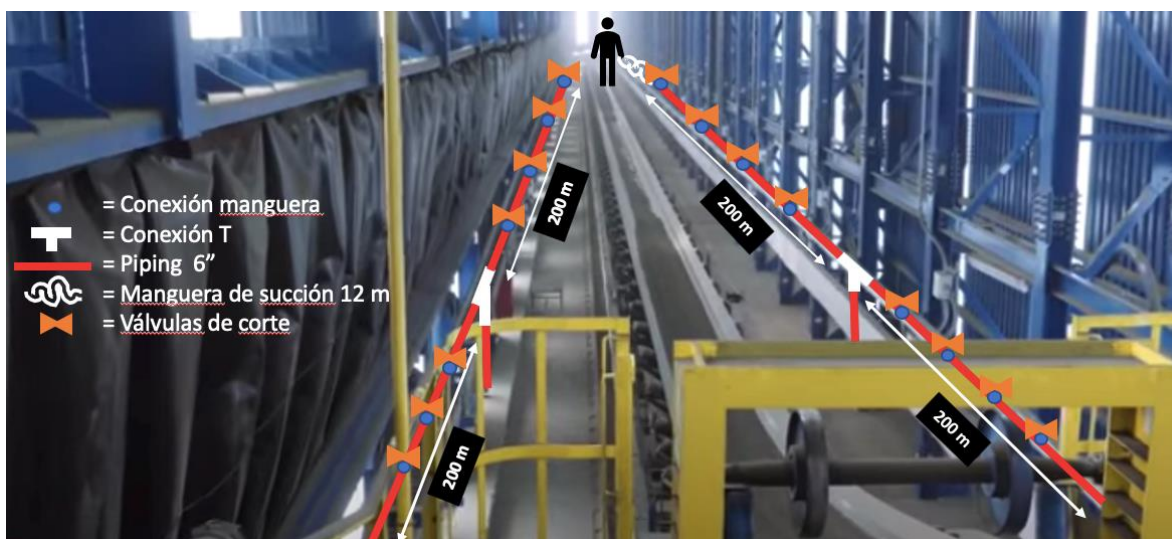


Ilustración 28: Esquema del sistema instalado 2

4. Determinación de la capacidad del sistema neumático

El cálculo del sistema se realizará de acuerdo con:

- La metodología de cálculo descrita en el capítulo 1.3 “Metodología del diseño del sistema”.
- La configuración del sistema presentada en el capítulo 3.
- Las características del material presentadas en el capítulo 1.2 “Fundamentos del fluido bifásico dentro de la cañería”, en el punto características del concentrado de cobre.
- El cálculo se realiza en la primera etapa en el sistema inglés debido a que las tablas se encuentran en esas unidades.

Supuestos:

- Tamaño mínimo de partícula 0.005 in
- Radio de codos y T = 4 in
- Eficiencia mecánica total 0.6
- Flujo másico $350 \frac{lb}{min}$, que permite aproximadamente 3 horas de funcionamiento del sistema antes de que la tolva alcance su capacidad máxima de llenado.

4.1. Datos a utilizar

-	Material	Concentrado de cobre	
P	Peso del material por pie cúbico	140	$\frac{lb}{ft^3}$
D _{par}	Diámetro de partícula	0.005	in
g	Aceleración de gravedad	32.2	$\frac{ft}{sec^2}$
d _v	Distancia vertical	15	mt
		49.2	ft
d _h	Distancia Horizontal	200	mt
		656	ft
f	Tangente del ángulo de deslizamiento	0.70021	-
R	Radio codos	4	in
R	Radio T (Cambio de dirección)	4	in
-	Distancia alrededor del codo y T	401.92	in
N	Nº codos y T	5	-
W	Flujo másico	350	$\frac{lb}{min}$
D	Diámetro de la línea	6	in
η _m	Eficiencia mecánica	0.6	-

4.2. Etapas del cálculo

4.2.1. Determinar la velocidad del fluido dentro de la cañería.

Este valor se obtiene ingresando a la tabla mostrada en la ilustración 29, donde la velocidad está determinada por el tamaño de partícula y el peso en libras del material a granel por pie cúbico.

P	Peso del material por pie cúbico	140	$\frac{lb}{ft^3}$
D _{par}	Diámetro de partícula	0.005	in
V	Velocidad pie por minuto	7500	$\frac{ft}{min}$
		125	$\frac{ft}{sec}$

Infobox on Copper Concentrates	
Example of Copper Concentrates	
Facts	
Origin	-
Stowage factor (in m³/t)	0,45 m³/t (bulk) = 138.8 lb/ft³
Humidity / moisture	-
Ventilation	-
Risk factors	See text

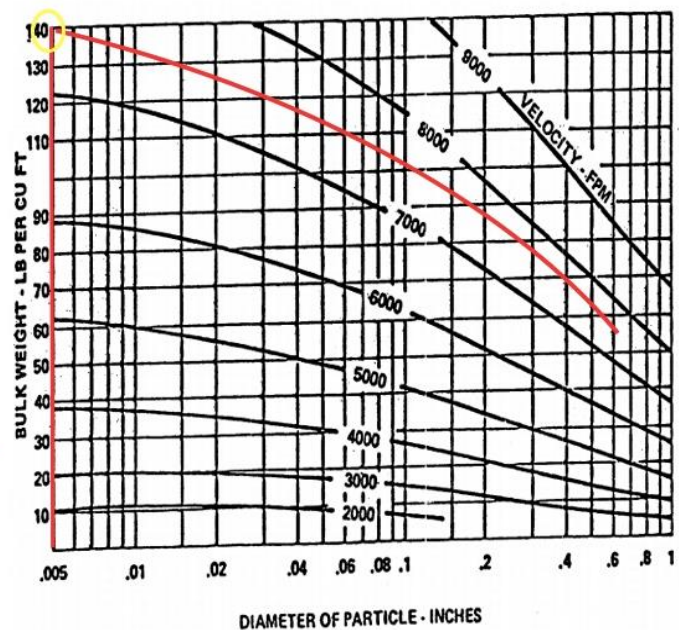


Ilustración 29: Selección de la velocidad a utilizar en el sistema

4.2.2. Determinar las pérdidas debido al material.

Pérdidas por aceleración, E_a

$E_a = \frac{M \cdot V^2}{2g}$	84,918.48	$\frac{ft - lb}{min}$
--------------------------------	-----------	-----------------------

Energía de elevación, E_e

$E_e = M \cdot d_v$	17,220.00	$\frac{ft - lb}{min}$
---------------------	-----------	-----------------------

Energía horizontal, E_h

$E_h = M \cdot d_h \cdot f$	160,768.22	$\frac{ft - lb}{min}$
-----------------------------	------------	-----------------------

Pérdidas en singularidades, E_s

$E_s = \frac{M \cdot V^2 \cdot d \cdot f}{g R}$	933,254.08	$\frac{ft - lb}{min}$
---	------------	-----------------------

Energía total debido a las pérdidas en el material, E_m

$E_m = E_a + E_e + E_h + E_s$	1,196,160.77	$\frac{ft - lb}{min}$
-------------------------------	--------------	-----------------------

Flujo volumétrico, m_v

$m_v = \pi * \frac{d^2}{4} * V$	1,471.88	$\frac{ft^3}{min}$
---------------------------------	----------	--------------------

Pérdida del sistema por material en in WC, E_{tm}

$E_{tm} = \frac{E_m}{m_v}$	812.68	$\frac{lb}{ft^2}$
	156.28	in WC

4.2.3. Determinar las pérdidas debido al movimiento del aire

Cálculo del largo total de la cañería (incluyendo singularidades), L_t

$L_t = D_h + D_v + N * \frac{2\pi R}{4}$	706.45	ft
--	--------	----

Determinación de la pérdida por fricción en función de la velocidad y diámetro, k

La pérdida por fricción es determinada por el gráfico mostrado en la ilustración 30. El valor se obtiene ingresando al gráfico con el diámetro de cañería y la velocidad del fluido. En amarillo se indicó el valor a utilizar.

$k = k(V, D)$	11.5	$\frac{in WC}{100 ft}$
---------------	------	------------------------

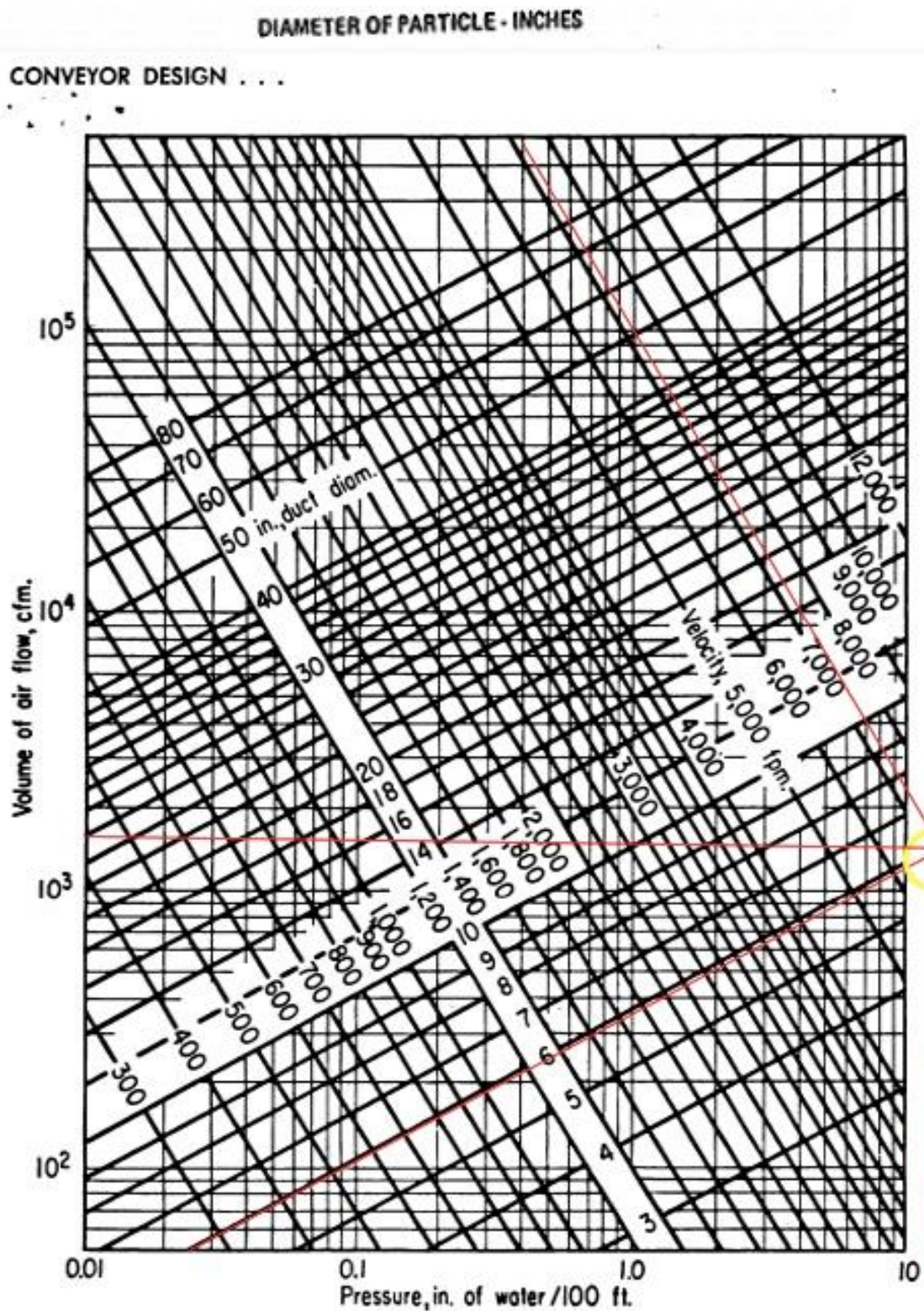


Ilustración 30: Selección de la pérdida por fricción

Determinación de la pérdida por fricción en el total de cañería, E_f

$E_f = k * L_t$	81.24	in WC
-----------------	-------	-------

4.2.4. Cálculo HP requerido

Energía total requerida por conceptos de pérdidas, E_t

$E_t = E_{tm} + E_f$	237.53	in WC
	8.57	$\frac{lb}{in^2}$

HP requerido por el sistema, P

$P = E_t * 144 * m_v * \frac{1}{33000} * \frac{1}{60} * 100$	92	HP
--	----	----

5. Cálculo predictivo del desgaste en la tubería

La erosión es causada por el impacto de partículas sólidas, que están suspendidas en un fluido (líquido, gas o multifase), en las paredes o bordes. En otras palabras, puede ser descrito como la eliminación de material por deformación repetitiva y acción de corte.

Existen dos principales mecanismos de erosión. El primero es la erosión causada por el impacto directo. Normalmente, la erosión más severa ocurre en los accesorios que redirigen el flujo, como codos o T. En estas secciones las partículas en el fluido pueden tener impulso suficiente para atravesar las líneas del fluido e impactar la pared. Otro mecanismo de erosión es el causado por el choque aleatorio. Este tipo de erosión ocurre en las secciones rectas de la tubería. Estos dos mecanismos pueden causar erosión en función de la composición del fluido, la velocidad y configuración del sistema.

Para este cálculo se considerará el concentrado de cobre como arena y se calculará la erosión solamente en los codos y T, donde es más probable el impacto de las partículas debido al cambio de dirección.

5.1. Propuesta de modelos a utilizar

En base a los resultados experimentales, la tasa de erosión de la arena se puede resumir en relación con la energía cinética de los fragmentos de arena a través de los siguientes parámetros:

- Velocidad del fluido
- Densidad del fluido
- Tamaño de los fragmentos
- Razón de producción
- Configuración del sistema
- Dureza del metal

La razón de erosión es expresada en la siguiente fórmula basado en el modelo de impacto por daño:

$$E = A \cdot V_p^n \cdot F(\alpha)$$

E : Razón de erosión, kg de material eliminado /kilogramos de erosionante.

V_p : Velocidad de impacto de la partícula.

A : Constante dependiente del material erosionado y otros factores.

α : Ángulo de impacto de la partícula

$F(\alpha)$: Función dependiente del ángulo de impacto, el cual es entre 0 y 1.0.

n : Parámetro dependiente del material.

Huser y Kvernfold desarrollaron la siguiente ecuación de daño por impacto:

$$E = m_p \cdot K \cdot V_p^n \cdot F(\alpha)$$

m_p = Flujo de masa

K, n = Constantes dadas por el grado de acero y titanio en el material y GRP (Glass-reinforced plastics).

Los valores para k, n y $F(\alpha)$ se derivan de las pruebas de chorros de arena en el material (sand-blasting).

La ilustración 31 muestra la relación $F(\alpha)$ usada por Huser y Kvernfold. Este modelo ha sido usado para el modelo de partículas en software (CFD) y varios modelos empíricos de partículas.

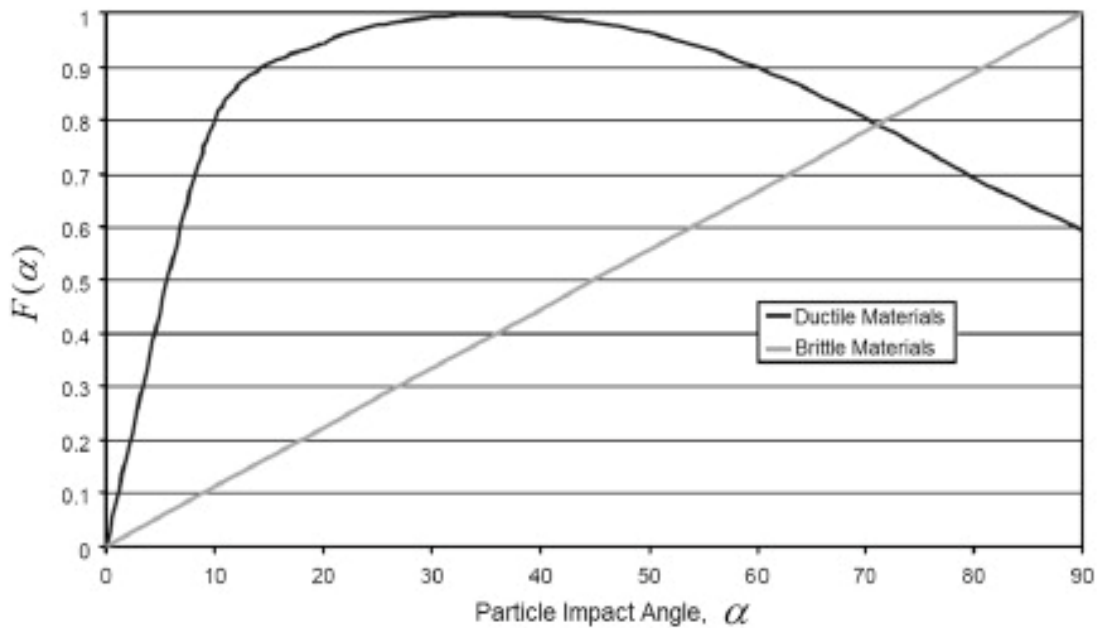


Ilustración 31: Gráfico Razón de erosión vs ángulo de impacto de la partícula para materiales dúctiles y frágiles

Un método similar al de Huser and Kvernfold, pero simplificado, es el propuesto por **Salama y Venkatesh**. Este modelo asume un valor conservativo de ángulo de impacto, que es 30°, donde $F(\alpha)$ adquiere un valor igual a 1. Esta aproximación es razonable para fluidos bifásico con gas, pero no se recomienda para fluidos líquidos.

$$E_r = \frac{S_K * W * V^2}{D^2}$$

E_r = Tasa de erosión por año (milésimas de pulgada por año)

S_K = Constante que depende de la geometría de la singularidad. $S_K = 0.038$ para codos de radio corto y $S_K = 0.019$ para L y T.

W = Flujo de arena (libras / día)

n = Velocidad del fluido (ft/s)

D = Diámetro de la tubería (pulgadas)

El modelo de Shirazi propone el siguiente método para calcular la tasa de penetración para distintas geometrías de cañería:

$$h = A * F_S * F_{45} * \left(\frac{q_{sd} * \rho_p * v_p^{1.73}}{B^{0.59} * d^2} \right)$$

h : Razón de penetración, mil/año

A : Coeficiente dependiente del material de la cañería

F_S : Factor de agudeza, presentado en la ilustración 32

F_P : Factor de penetración (donde F_P es 3.68 in/lbm, valor obtenido experimentalmente para codos y T de acero)

ρ_p : Densidad de la partícula

v_p : Velocidad de impacto de la partícula

B : Dureza Brinell

Description	F_s
Sharp corners, angular	1.0
Semi-rounded corners	0.53
Rounded, spherical glass beads	0.20

Ilustración 32: Factor agudeza de la arena (Sand Sharpness)

De acuerdo al modelo de Shirazi, la erosión es proporcional a la velocidad de impacto de la partícula. Para este análisis se utiliza un modelo simple que describe las características de la velocidad de impacto de las partículas. En la ilustración 33, se presenta el concepto “longitud de estancamiento” (stagnation zone), que representa la capa del fluido donde las partículas de arena deben penetrar. Además, se define el “largo característico” (equivalent stagnation length, L), utilizado para representar la distancia en el modelo de impacto directo más simple.

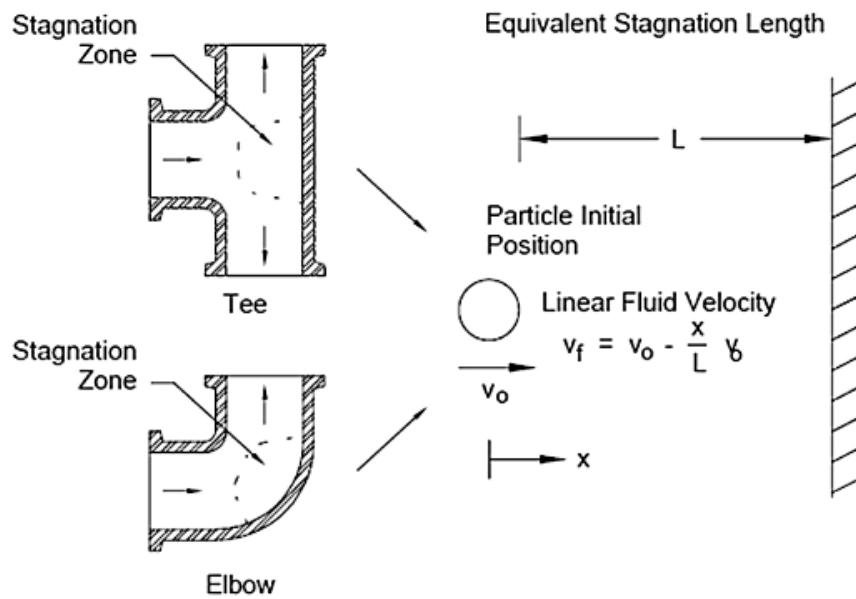


Ilustración 33: Esquema conceptual “Stagnation length” o longitud de estancamiento

El comportamiento de las partículas en la región de estancamiento mayormente depende de:

- La geometría de la tubería
- Propiedades del fluido
- Propiedades de la arena (Este modelo está desarrollado para este material)

En la ilustración 34, se encuentra el modelo desarrollado para obtener el valor de la longitud de estancamiento (Stagnation Length).

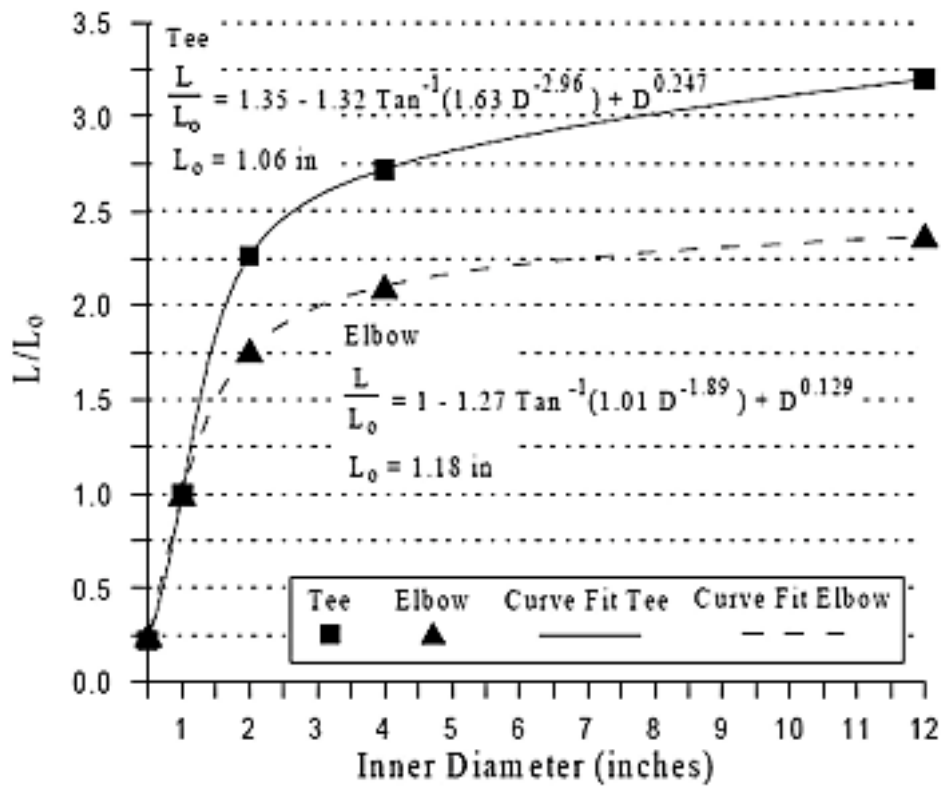


Ilustración 34: Longitud de estancamiento vs diámetro del codo

Luego, en la ilustración 35 se encuentra el modelo que reúne los parámetros de:

- Velocidad de flujo
- Escala de longitud característica
- Densidad del fluido y viscosidad
- Densidad de partículas y diámetro

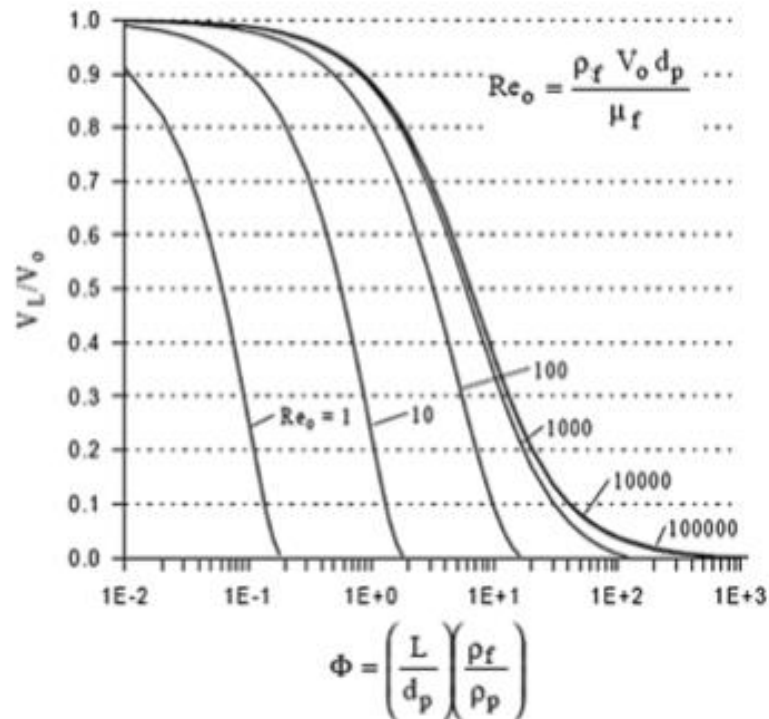


Ilustración 35: Efecto de los diferentes factores en la velocidad de impacto de la partícula

Los grupos adimensionales que relacionan los parámetros definidos y que se grafican en la ilustración 35 son los siguientes:

$$N_{re} = \frac{\rho_f * v * d_p}{\mu_f} \quad ; \quad \Phi = \frac{L * \rho_f}{d_p * \rho_p}$$

N_{re} : Número de Reynolds

ρ_f : Densidad del fluido

v : Velocidad del fluido

d_p : Diámetro de la partícula

μ_f : Viscosidad del fluido

Φ : Parámetro adimensional

L : Longitud de estancamiento equivalente

ρ_p : Densidad de la partícula

Para extender este modelo a codos de radio largo, se incorpora un nuevo concepto que es el “factor de radio largo, $ERF_{r/d}$ ”. Este valor se define de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$ERF_{r/d} = \frac{P_{nL}}{P_{nstd}}$$

P_{nL} : Razón máxima de penetración en un codo de radio largo

P_{nstd} : Razón máxima de penetración en un codo standard

$$ERF_{r/d} = e^{-\left(0.215 * \frac{\rho_f^{0.4} * \mu_f^{0.65}}{d_p^{0.5}}\right) \left(\frac{r}{d} - C_{std}\right)}$$

$ERF_{r/d}$: Factor para codos de radio largo.

C_{std} : r/d para codo standard, C_{std} es igual a 1.5.

ρ_f : Densidad del fluido.

μ_f : Viscosidad del fluido.

d_p : Diámetro de la partícula.

r : Radio de curvatura del codo.

Esta ecuación es basada en la densidad de partícula de la arena $165.4 \frac{lbm}{ft^3}$

5.2. Cálculo de la tasa de erosión de acuerdo al Modelo Salama y Venkatesh

Datos

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Comentarios
S_K	Constante que depende de la geometría de la singularidad. $S_K = 0.038$ para codos de radio corto y $S_K = 0.019$ para L y T.	-	0.019	-	-	-
W	Flujo de arena	$\frac{lbm}{D}$	25200	-	-	-
V	Velocidad del fluido	$\frac{ft}{s}$	125	-	-	-
D	Diámetro de la tubería	in	6	-	-	-

Determinación del factor de penetración

$E_r = \frac{S_K * W * V^2}{D^2}$	208	in/año
-----------------------------------	-----	--------

5.3. Cálculo de la tasa de erosión de acuerdo al Modelo Shirazi

De acuerdo a los distintos modelos presentados anteriormente el cálculo de la razón de penetración se calculará en los siguientes pasos:

- Determinar el factor del radio de codo ($ERF_{r/d}$)
- Calcular la velocidad de impacto de la partícula
- Longitud de estancamiento equivalente L
- Parámetros adimensionales N_{Re} y Φ

Datos

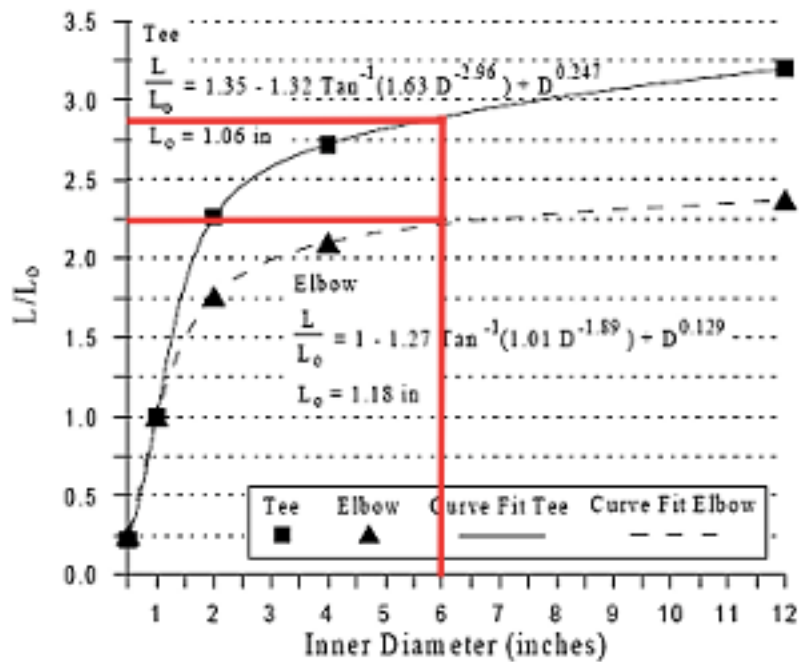
Parámetro	Descripción	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Comentarios
A	Coeficiente dependiente del material de la tubería	-	0.9125	-	-	
r/d	Relación codo para radios largos	-	3	-	-	
F_s	Nitidez de la arena	-	0.53	-	-	
F_p	Factor de penetración	-	3.68	-	-	
q_{sd}	Flujo del material	$\frac{ft^3}{D}$	180	-	-	
ρ_p	Densidad de la partícula	$\frac{lbm}{ft^3}$	140	-	-	
ρ_f	Densidad del fluido	$\frac{lbm}{ft^3}$	0.08	-	-	
v	Velocidad del fluido	$\frac{ft}{s}$	125	-	-	

d	Diámetro de la cañería	in	6	-	-	
ID	Diámetro del codo	in	6	-	-	
μ_f	Viscosidad del fluido	cp	1	$\frac{lbm}{ft * s}$	0.000672	
B	Dureza Brinell	-	120	-	-	
d_p	Diámetro de la partícula	μm	350	in	0.0138	

Determinación del factor del radio de codo ($ERF_{r/d}$)

$ERF_{r/d} = e^{-\left(0.215 * \frac{\rho_f^{0.4} * \mu_f^{0.65}}{d_p^{0.5}}\right) \left(\frac{r}{d} - C_{std}\right)}$	0.6568	-
--	--------	---

Determinación de la longitud de estancamiento equivalente L



$$L_0 = 1.18 \text{ in}$$

$$\frac{L}{L_0} = 2.25 \text{ in}$$

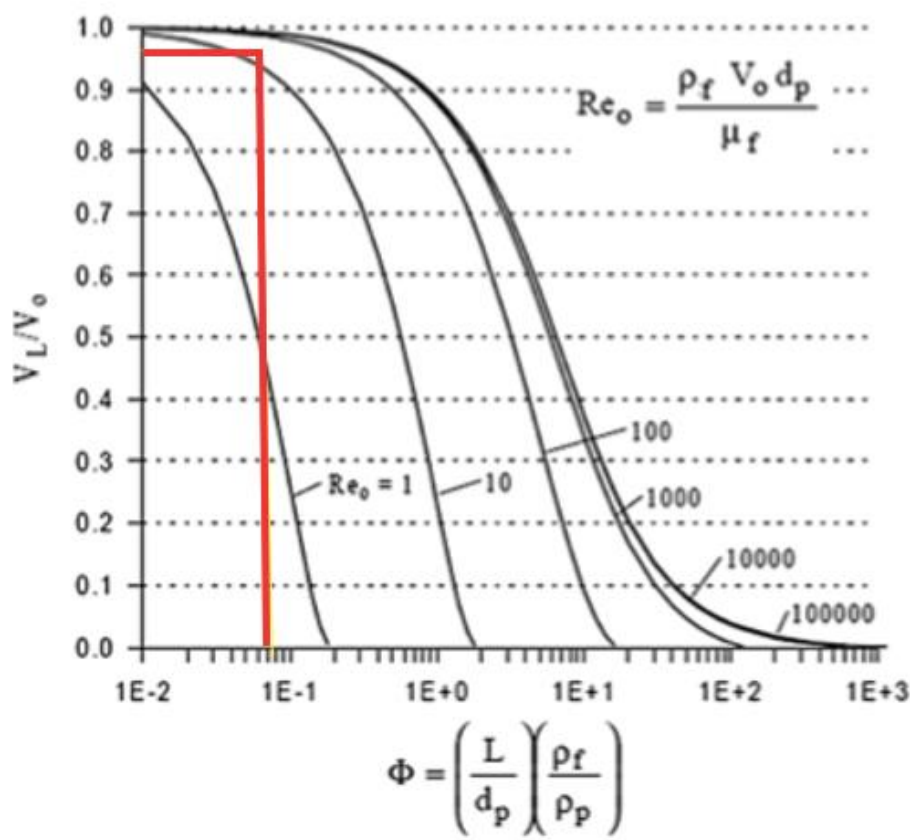
$L = 2.25 * L_o$	2.655	in
------------------	-------	----

Cálculo N_{Re} y Φ

$\Phi = \frac{L * \rho_f}{d_p * \rho_p}$	0.1098	-
--	--------	---

$N_{re} = \frac{\rho_f * v * d_p}{\mu_f}$	17.0635	-
---	---------	---

Cálculo $\frac{v_p}{v}$



$\frac{V_P}{V} = f (N_{RE}, \Phi)$	0.97	-
--------------------------------------	------	---

Cálculo del radio de penetración

$h = A * F_S * F_P * (\frac{q_{sd} * \rho_p * v_p^{1.73}}{B^{0.59} * d^2})$	297	in/yr
---	-----	-------

Cálculo del radio de penetración para radios largos

$P_{nL} = ERF_{r/d} * h$	195	in/yr
--------------------------	-----	-------

6. Propuesta de mantenimiento del sistema

El sistema propuesto en esta memoria se divide en dos partes principales, el arreglo de cañerías desde la salida del camión Supersucker hasta la conexión con la manguera del operador y el camión Supersucker, que es el que contiene el sistema completo; que genera el vacío, realiza el filtrado y la recolección del material.

6.1. Mantenimiento para el arreglo de cañerías

El material seleccionado para el arreglo es HDPE PN10, el cual se recomienda para el transporte de materiales agresivos en la Industria minera.

En general, la vida útil para las tuberías de HDPE es superior a 50 años para el transporte de agua a temperatura ambiente. Además, este material cuenta con protección contra los rayos ultravioletas (UV), que minimiza la degradación producida con el tiempo.

El único factor que realmente influye en la decisión de mantenimiento de las piezas del arreglo de piping es la corrosión que pueda producir el material en las paredes, especialmente codos y tees. Sin embargo, se debe considerar que el HDPE tiene un buen comportamiento en la conducción de materiales altamente abrasivos. Numerosos ensayos han demostrado que la tubería de HDPE tiene un mejor desempeño en este tipo de servicio con una relación 4:1 con respecto a la tubería de acero.

Debido a que el valor obtenido en el cálculo de la erosión con las metodologías propuestas es claramente sobredimensionado, se propone realizar un plan de revisión de los elementos del arreglo (Codos y tees).

El método de medición que se sugiere utilizar es el de medición ultrasónica, el cual es una técnica de ensayo no destructivo, donde no es necesario cortar ni seccionar el material.

Se propone realizar el chequeo una vez por semana, al menos el primer mes de uso del sistema. En caso, de que no se observen mayores diferencias en el espesor, el chequeo podría distanciarse a dos veces por semana y así sucesivamente.



Ilustración 36: Medición de espesor de la tubería con sistema ultrasónico

6.2. Mantenimiento para el camión Supersucker

El plan de mantenimiento del camión supersucker está determinado por el fabricante del equipo. En la tabla mostrada a continuación se indica la actividad de mantenimiento, luego cada cuanta hora se debe realizar esta actividad. Si la actividad aplica en el número de horas de funcionamiento se utiliza 1, y si no aplica 0.

ACTIVIDAD	Mantenimiento después XX Hrs de funcionamiento			
	250	500	750	1000
Limpiar estanque colector principal	1	1	1	1
Limpiar y revisar sellos de junta trasera y juntas	1	1	1	1
Limpiar bola de flote y sellos	1	1	1	1
Limpiar cañón del brazo mecánico	1	1	1	1
Limpiar conducto de transición	1	1	1	1
Limpiar Separadores	1	1	1	1
Limpiar compartimiento del separador	1	1	1	1
Limpiar conjunto de nivel de estanque colector	1	1	1	1
Revisar filtros de manga	1	1	1	1
Cambiar filtros de Manga (60)	0	0	0	1
Limpiar compartimiento bolsas	1	1	1	1
Limpiar malla y cámara de aspirado	1	1	1	1
Lubricar pasadores y puerta trasera y bisagra	1	1	1	1
Lubricar pivote de la carrocería	1	1	1	1

Lubricar estructura cilindro de elevación	1	1	1	1
Revisar bomba de aspirado	1	1	1	1
Revisar compartimiento de transferencia	1	1	1	1
Lubricar compartimiento de transferencia	0	1	0	1
Lubricar ejes de marcha	0	1	0	1
Limpiar junta de acción/freno	1	1	1	1
Limpieza de puertas externas	1	1	1	1
Limpiar puerta de compartimiento Bolsas	0	1	0	1
Revisar sistema de impulso	1	1	1	1
Revisar sistema eléctrico	1	1	1	1
Revisar sistema hidráulico	1	1	1	1
Revisar estanque hidráulico	1	1	1	1
Lubricar rotación brazo mecánico	1	1	1	1
Revisar freno brazo mecánico	1	1	1	1
Revisar apriete de pernos y tuercas	1	1	1	1
Limpiar vertedor de polvo	1	1	1	1
Revisar mangueras y ductos de aspiración	1	1	1	1
Revisar y limpiar filtros y sellos de tapas superiores	1	1	1	1
Limpiar goma de sello conjunto estanque-cámara de vacío	1	1	1	1
Cambio aceite del blower (4 lts.)	0	0	0	1
Cambio aceite de caja de transferencia (8 lts.)	0	0	0	1
Revisar sistema de autolimpieza de filtros	1	1	1	1
Cambiar aceite (ISO 46) (70 litros)	0	0	0	1
Cambiar filtro hidráulico	0	1	0	1
Revisar vibrador eléctrico	1	1	1	1
Cambiar aceite de motor 15W40 (40 litros)	0	1	0	1
Cambiar Filtros de aire	1	1	1	1
Cambiar filtro de aceite	0	1	0	1
Comprobar la correa trapezoidal del motor	1	1	1	1
Cambiar filtro de combustible	0	1	0	1
Cambiar filtro separador de agua	0	1	0	1
cambiar refrigerante del motor (50 litros)	0	0	0	1
Cambiar aceite de transmisión (Tipo A Dexron 3) 25 Lts.	0	0	0	1
Cambiar filtro secador de aire	0	0	0	1

Tabla 2: Actividades de mantenimiento camión Supersucker

7. Análisis económico del sistema

El análisis económico del sistema se realiza calculando los costos de inversión y de mantenimiento y los contrasta con los ingresos que implican un aumento en producción, al reducir los tiempos de detención de la correa, y los ingresos asociados a la disminución del costo de horas hombre. Todo esto en un horizonte de 10 años

Consideraciones

- Jornada de trabajo 5x2 (5 días de trabajo versus 2 días de descanso).
- 180 horas de trabajo por mes.
- Se asumo un 15% adicional en el plan de mantención para cubrir costos de imprevistos.
- Se suma un 20% adicional sobre al valor total del camión y los vehículos a utilizar por conceptos de piping. a instalar.
- Se agrega 10% adicional sobre al valor total del camión y los vehículos a utilizar por conceptos de herramientas a utilizar.
- Se considera 1 Dólar = 800 CLP.
- Camión realiza mantenimiento cuando la correa no está en funcionamiento.
- Disponibilidad esperada para la Cinta transportadora es de un 95%, esto implica, 438 horas detenida al año.
- Camión Supersucker permite reducir el trabajo de 4 personas a 2 personas.
- Las tareas de limpieza implican un 20% del tiempo total del mantenimiento.
- El sistema de aspiración neumático reduce este tiempo a la mitad.
- Costo HH operador y conductor \$40,000 c/u.

Ingreso por aumento de producción en la cinta

Tiempo adicional en producción por funcionamiento de la cinta	43,8	Horas
Cantidad de Concentrado de cobre transportado por la cinta**	1500	Ton/Hora
Costo asociado al transporte de concentrado	\$495	CLP/Ton
Valor total aumento de la producción de la cinta	32.521.500	CLP

Inversión inicial

Inversión inicial			
Descripción	Cantidad	Valor unidad (USD)	Total (USD)
Camión super sucker	1	\$ 342.500	\$ 342.500
Camioneta	1	\$ 25.000	\$ 25.000
Camión pluma 5 ton	1	\$ 12.500	\$ 12.500
Total		\$ 380.000	\$ 380.000
20% Adicional por concepto de piping		\$ 76.000	\$ 76.000
10% por concepto de herramientas a utilizar		\$ 38.000	\$ 38.000
		TOTAL NETO USD	\$ 494.000
		TOTAL NETO CLP	\$395.200.000

Tabla 3: Inversión inicial

Costo mantenimiento

Actividades	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	Q1	Q2	Q3	Q4	A3	A4	A5
Baterías													\$600K				\$600K	\$600K	\$600K
Neumáticos																\$2,500K		\$2,500K	
Mantenión estructural						\$750K						\$750K		\$750K		\$750K	\$1,500K	\$1,500K	\$1,500K
Mantenión mecánica			\$533K		\$1,071K		\$533K		\$2,574K		\$533K		\$1,605K	\$2,574K	\$1,605K	\$533K	\$7,821K	\$6,318K	\$7,821K
Imprevistos	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$150K	\$450K	\$450K	\$450K	\$450K	\$1,800K	\$1,800K	\$1,800K
Total anual	\$ 8,547K												\$12,718K				\$11,721K	\$12,718K	\$11,721

*Valores en peso chileno ** Valor K indica multiplicar por mil.

Tabla 4: Propuesta de mantenimiento

M: Mes
Q: Trimestre
A: Año

Flujo de Caja

Item	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
(+) Ingresos por ahorro en HH		\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000	\$38.544.000
(+) Ingreso por aumento de producción		\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500	\$32.521.500
(-) Costos por Mantenimiento		\$8.547.000	\$12.718.000	\$11.721.000	\$12.718.000	\$11.721.000	\$8.547.000	\$12.718.000	\$11.721.000	\$12.718.000	\$11.721.000
(-) Inversión	\$395.200.000										
(=) Resultado	-\$395.200.000	\$62.518.500	\$58.347.500	\$59.344.500	\$58.347.500	\$59.344.500	\$62.518.500	\$58.347.500	\$59.344.500	\$58.347.500	\$59.344.500

Tasa de descuento	10%
VAN	(\$28.316.018)
TIR	8%

8. Conclusiones

El estudio del sistema neumático por presión negativa consistió en varios pasos, primero revisar los distintos sistemas y metodologías de cálculo. Luego, estudiar el principio de funcionamiento del camión y establecer una configuración del sistema. Cuando ya se establecen todas estas variables, es cuando se calcula la potencia y se verifica que el sistema de vacío sea capaz de proporcionarla.

La metodología de cálculo es seleccionada debido a sus anteriores resultados exitosos y, además, es la metodología que se utiliza comúnmente en las empresas de ingeniería del país. De acuerdo con este proceso de cálculo se obtiene una potencia necesaria de 92 [HP].

El camión Supersucker puede entregar una potencia de hasta aproximadamente 400 [HP], lo que significa que es capaz de entregar sin ningún problema la potencia requerida por el sistema.

Otro punto de la memoria fue el cálculo de la erosión en el sistema de piping. Se realizó la investigación obteniendo solo fórmulas que estaban diseñadas bajo distintos parámetros, por ejemplo, tuberías de acero o arena como fluido. Estas diferencias en los parámetros no permitieron obtener números cercanos a la realidad. Esta memoria deja abierta la opción de análisis de la erosión del arreglo de piping en un software CFD (Computational fluid dynamics), como por ejemplo Ansys fluent, el cual puede realizar el ejercicio con los parámetros exactos (tipo de fluido, material de la cañería y dimensiones).

Por último, se analizó el mantenimiento y el aspecto económico del sistema. El mantenimiento propuesto para el arreglo de cañerías será a través de revisiones semanales del espesor en las tuberías y fitting. En el caso del camión, el

mantenimiento ya viene definido por el fabricante, por lo que fue solo reflejar el plan en la memoria.

El análisis económico incluyó la inversión y los costos de mantenimiento, de acuerdo con el plan nombrado anteriormente. Este análisis refleja un costo de inversión de aproximadamente \$395,000,000 y un costo de mantenimiento de aproximadamente \$51,400,000.

El costo de este sistema no es marginal, pero es extremadamente necesario en zonas donde no hay control de polvo. Las multas que se aplican por concepto de no cumplimiento de la normativa ambiental o suspensión de las actividades pueden fácilmente duplicar los costos de estos sistemas.

Finalmente, la implementación de este sistema proyecta un aumento en la disponibilidad de la cinta transportadora de un 0,5%. Aun así, el VAN indica que la inversión no es capaz de rendir la tasa de descuento propuesta; sin embargo, existen otros conceptos que agregan valor a la propuesta como la innovación para el cuidado del medio ambiente, la seguridad y la salud ocupacional. Además, el sistema cuenta con suficiente potencia restante que puede permitir en el futuro incrementar la capacidad y cubrir otros puntos de colección de polvo. En caso de realizar esta mejora, la inversión inicial incluiría solo el arreglo piping y conexiones, que se estima que es alrededor de 20%.

9. Bibliografía

- [1] Revista de energía y negocios, Chile.
<<https://revistaenergiaynegocios.com/2020/02/18/ranking-de-los-paises-que-lideran-la-produccion-de-cobre-en-el-mundo/>>. [Consulta: 06 de Marzo 2020].
- [2] Minería chilena. <<https://www.mch.cl/reportajes/control-de-polvo-en-el-transporte-de-mineral/#>>. [Consulta: 06 de Marzo 2020].
- [3] John Fischer Ch. Eng. Practical pneumatic conveyor design. June 2, 1958
- [4] R. kang, H. Liu. An integrated model of predicting sand erosion in elbows for multiphase flows.
- [5] Yong Bai. Subsea engineering handbook, 2017
- [6] Francisco Cabrejos. Como seleccionar el sistema de transporte neumático más adecuado para su material y aplicación.
- [7] Herman Purutyan, Thomas G. Troxel and Francisco Cabrejos. Your pneumatic conveying system to propel.
- [8] Francisco Cabrejos. Recent developments in pneumatic conveying at the Universidad Técnica Federico Santa María, 2006.
- [9] Francisco Cabrejos, José Luis. Ormeño and Jorge Salgado. Pneumatic conveying using inclined pipelines at the Universidad Técnica Federico Santa María.
- [10] John W. Canson and Joseph Marinelli. To ensure smooth flow.
- [11] Carrie Hartford, Bulk solids handling system design.
- [12] Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. Guía de buenas prácticas en el almacenamiento, transporte y manipulación de graneles sólidos en instalaciones insdutriales.
- [13] Plastiforte. Manual Técnico Tubería HDPE Minería e Industria 2011.

Anexo A: Ficha técnica concentrado de cobre



MATERIAL SAFETY DATA SHEET

MSDS

Copper Concentrate

Product Information

Copper Concentrate.

Used for the recovery of metal values.

Vale Inco Newfoundland and Labrador Limited
Suite 700, Blaine Johnston Centre
10 Fort William Place, St. John's Newfoundland
A1C 1K4
Chemtrec 24 hr Emergency No. 1-800-424-9300

WHMIS Classification: D2B

Hazardous Ingredients

Component	% wt	CAS No.	Exposure Limit (TLV) ^{1,2}	LD50 (orl, sp)	LC50 (inh, sp)
Chalcopryrite, CuFeS ₂	80-100	1308-56-1	1 mg/m ³ as Cu	Not available	Not available
Pentlandite, (Ni, Fe) ₉ S ₈	1-5	53809-86-2	0.2mg/m ³ as Ni	Not available	Not available
Pyrrhotite, Fe ₉₋₁₀ S ₈	5-20	1310-50-5	Not available	Not available	Not available

Physical Data

Particle size:

The 80% passing size of fresh Copper Concentrate is expected to be 30µm based on pilot plant results (ranging from 15 to 50 µm). The Copper Concentrate is expected to age and oxidize during storage thus forming agglomerates and lumps.

Solubility in water:

Insoluble

Appearance in color:

Odorless, grayish, slurry or moist powder

Odor threshold (ppm):

Odorless

Corrosiveness to common metals:

Corrosive to aluminum and steel

Physical state:

Paste, typically as slurry or filter cake

Ph:

11.5 – 12.0

Specific Gravity:

4.0 – 4.5g/cm³

Moisture:

Below bulk TML (Threshold moisture limit) of 10.6%

Component	Boiling Point (°C)	Melting Point (°C)	Molecular wt	Specific Gravity
Chalcopryrite, CuFeS ₂	Not available	950	183.51	4.2
Pentlandite, (Ni, Fe) ₉ S ₈	Not available	Not available	771.25	4.8
Pyrrhotite, Fe ₉₋₁₀ S ₈	Not available	Not available	646.6	4.6

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

MSDS

Fire or Explosion Hazard Data

<i>Conditions of flammability:</i>	Non-flammable under normal conditions
<i>Fire and explosion hazards:</i>	Contains sulphides which when dry and exposed to excess heat may evolve sulphur dioxide

Reactivity Data

<i>Stability:</i>	Stable, hazardous polymerization will not occur
<i>Incompatibility:</i>	Many sulphides react violently and explosively with powerful oxidizers, evolving SO ₂
<i>Volatile products given off at room temperature:</i>	None
<i>Hazardous decomposition products:</i>	SO _x (exposure limit: 2ppm SO ₂ (TLV) ^{1,2})
<i>Conditions to avoid:</i>	Heat, ignition sources.

Toxicological Properties ³

Pentlandite:	Inhalation: The International Agency for Research on Cancer (IARC) concluded there was sufficient evidence that nickel compounds are carcinogenic to humans. Intratracheal instillation of pentlandite (>98% pure) in hamsters did not produce a significant increase in lung tumors. The pentlandite remained in the lung nine times longer than the positive control (Ni ₃ S ₂), which also did not produce a significant increase in lung tumors.
Chalcopyrite:	Significant information specific to chalcopyrite was not found in the literature.
<i>Pre-existing conditions:</i>	Wilson's disease can occur in certain individuals with a rare inherited metabolic disorder characterized by retention of excessive amounts of copper in the liver, brain, kidneys and corneas. These deposits eventually lead to tissue necrosis and fibrosis, causing a variety of clinical effects, especially liver (i.e. hepatic) disease and neurologic changes. Wilson's disease is progressive and, if left untreated, leads to fatal liver (i.e. hepatic) failure.
Pyrrhotite:	An extensive literature search revealed no toxicological or health hazard information specific to this material.

Preventative Measures

<i>Steps to be taken if material is released or spilled:</i>	Prevent spread of spill. Wet sweep or scoop up and reuse. Collection of spill material when dry may also be made by vacuuming or by wetting prior to sweeping, scooping, etc. Caution should be taken to avoid release into sewers or waterways.
--	--

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

MSDS

Waste disposal method:	Wastes and spills are collected and recycled to recover metal values. Disposal does not occur.
Engineering Controls:	Use with adequate ventilation.
Eye protection:	Safety glasses.
Hand protection:	Gloves – neoprene, butyl rubber, natural rubber or leather. Use of barrier cream is suggested.
Respirator type:	Under normal circumstances, respiratory protection is required. Under other circumstances of excess handling, departmental standards must be consulted.
Precautionary measures:	Wash hands thoroughly after handling.
Other storage conditions:	Keep in a moist condition if possible to avoid drying and to minimize dust generation. Controls should be taken to prevent self-heating and SO ₂ emission; these controls include compaction of material, and keeping material moist.
Other handling conditions:	Wash before eating, smoking or eating. Avoid inhalation of dust.

First Aid Measures

Skin contact:	For skin irritation, flush with plenty of water. For skin rashes, seek medical attention.
Eye contact:	Immediately flush with water for 15 minutes, holding eyelids open while flushing.
Inhalation:	For respiratory tract irritation, remove to fresh air. If symptoms persist, seek medical care.
Ingestion:	Get immediate medical attention.

Preparation Information

Prepared by: Vale Inco Limited
200 Bay St., Royal Bank Plaza
Suite 1600, South Tower, PO Box 70
Toronto, Ontario, Canada, M5J 2K2
Product Stewardship (416) 361-7801

MSDS available online at www.valeinco.com
msds@valeinco.com

Note:

Vale Inco believes that the information in this Material Safety Data Sheet is accurate. However, Vale Inco makes no express or implied warranty as to the accuracy of such information and expressly disclaims any liability resulting from reliance on such information.

Footnotes:

- 1 Threshold Limit Value of the American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- 2 Exposure Limits for user operations will depend on the relevant governmental regulations.
- 3 Describes possible health hazards of the product supplied. If user operations change it to other chemical forms, whether as end products, intermediates or fugitive emissions, the possible health hazards of such forms must be determined by the user.

Practical Pneumatic Conveyor Design

JOHN FISCHER, Chief Engineer, Materials Handling Div., Sprout, Waldron & Co., Inc., Muncy, Pa.*

Design of today's pneumatic conveying systems still hinges around the empirical approach, with particular emphasis on so-called "seat of the pants" engineering. Judgment and experience play a large part in specification and selection. Most know-how is closely held by the relatively few engineers who specialize in the pneumatic field.

So to date, it has probably been difficult for you, the hard-pressed engineer, to sift the things from available print that you need to know. This article will help to melt any fog and boost you over the

hurdles of preliminary design—a cost-saving prerequisite to practical conveyor specification.

Look at a Little Background

Pneumatic conveying is not a new field of development; it is a logical outgrowth of Sturtevant's work on dust-collecting systems just after the Civil War. However, references in modern engineering literature probably start with the paper published by H. Gasterstadt in 1924.

Gasterstadt gives the theoretical laws describing the pressure drops associated with flows of air

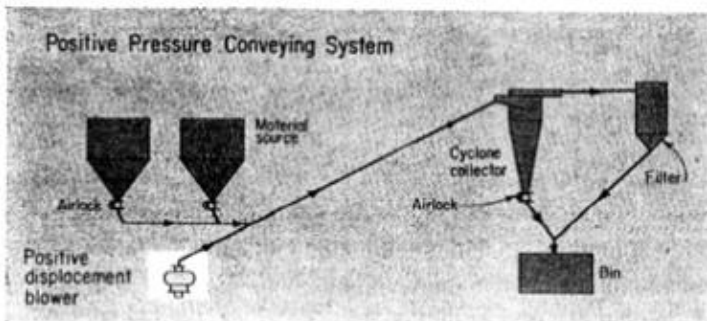
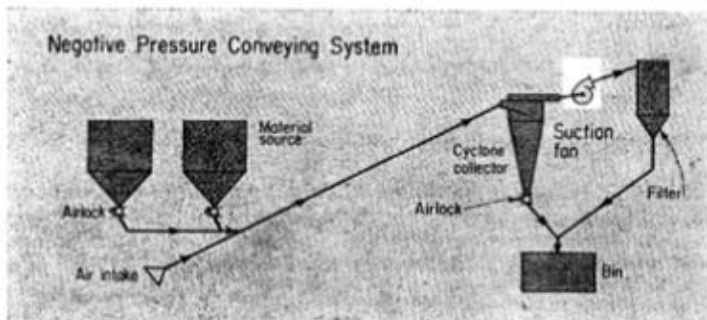
and air-solids mixtures through pipelines. He worked mainly with granular solids and with grain products, such as wheat. His empirical equations are still substantially correct when applied to material of this character.

From 1924 on, available data and literature on the subject increased rapidly, especially in the late 1940's. Spurred on by the tremendous growth of fluidized-solids techniques created by the need for aviation gasoline during World War II, oil refiners leaped into all phases of gas-solids contact. Almost immediately, interest in all elements of the country's industry ballooned when management realized that pneumatic systems, a close cousin to fluidization systems, could help close one door to increasing labor costs, while at the same time opening another to greater safety and sanitation. And of course, this new and widespread interest ultimately expressed itself in growing quantities of technical print.

Pneumatic systems have also captured the attention of both designer and architect, who find in its flexibility some release from the rigidity and space requirements of more conventional mechanical systems. Pneumatic conveying lines can go around corners and through walls and floors, where screw conveyors, bucket elevators, and most other types of mechanical units can go only with difficulty.

Flexibility of another kind is provided by self-cleaning characteristics that permit different materials to be conveyed in the same system without appreciable contamination.

Basically, pneumatic conveying systems can be separated into two types: Negative-pressure systems, characterized by relatively low capacity and low pressure losses; and positive-pressure systems, which have higher capacity and higher



pressure losses. Two good rules to follow in design work are:

- When conveying from several points to one point, use a negative-pressure system.

- When conveying from one point to many different points, use a positive system.

Pull the Solids Through

In a negative system, the centrifugal fan, rotary positive-displacement blower or other vacuum-producing unit is situated at the end of the system away from the solids pick-up point. It's necessary, therefore, to put a separating unit, such as a cyclone collector, between pick-up point and exhauster. Solid material discharges from the collector, separated air from the exhauster.

Depending on the collector's separating efficiency, a certain amount of solids entrained in the air stream may carry over into the exhauster. For this reason, designers often select a centrifugal fan as the vacuum producing unit—its large clearances enable it to tolerate the passage of appreciable quantities of entrained solids without serious damage to moving parts. If required, entrained dust can be separated from exhaust air by a filter on the discharge side of the fan.

Since capacity is often limited by the suction pressure which a centrifugal fan can develop, rotary positive-displacement blowers have come into more frequent use with negative systems. However, the extremely precise mechanical construction of these blowers seriously limits their tolerance for dust-laden air. Their use requires that some means be provided to insure a minimum of entrained dust in air exhausted through the blower. Since the efficiency of single cyclone separators generally falls short of tolerance limits, they

are combined with a dust-collecting unit.

With these, the exhaust air is filtered through cloth stockings, in a manner similar to the action of continuous automatic dust collectors. As with the automatic collectors, filter design permits isolation of each section for cleaning, while other sections continue the filtering action. Combinations of cyclones and dust filters are sometimes called product recovery units.

Product recovery units are fairly large, in relation to the other components of pneumatic system, because of the large cloth area required for efficient filtration of the air volume being handled. Its large size, in turn, necessitates heavy construction to withstand the system's vacuum.

Push the Solids Through

In a positive pressure system, the source of air flow is located at the head of the line, and air pushes the solids through the duct. It follows that there will be a positive pressure at the point where material enters the line; an airlock of some sort has to be used. Rotary vane units (star feeders) are preferred, but double and triple-gated locks are also employed. Star valves have the advantage of admitting material at a more uniform rate.

Other means of overcoming pressure at the entry point have been devised for the case where process solids are incompatible

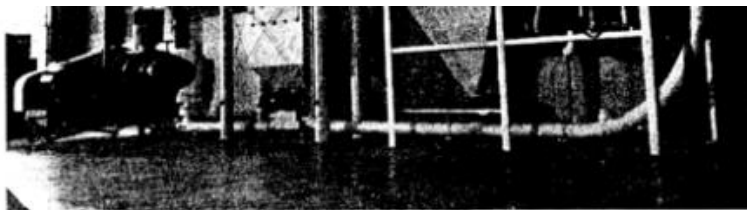
with a rotating valve. Among these are the use of a choke screw feeder, and also the method of superposing a slightly higher pressure on the materials container, and controlling the rate of feed with a slide gate.

Rotary positive-displacement blowers of the lobed or axial-flow type can produce pressures up to 15 psig. Although there are close tolerances between lobes, no actual contact exists; hence these units operate without internal lubrication. As such, they provide uncontaminated air.

Multistaging can produce higher pressures; however, this introduces temperature problems and additional expense. Therefore, most positive pressure systems operate within the 15-psig. range.

Because relatively low volumes of free air will move large quantities of material through a pressure system, the dust filter can be eliminated if the user is willing to accept small dust losses. Where a filter is required, it can be relatively small.

The table on the next page compares negative and positive systems. The weight ratios of material to air, which range from 1:1 up to 20:1, indicate why some systems are called "dilute" phase, and others "dense" phase. These terms are technically correct, but the term "fluidized," which is more and more frequently used as a synonym for dense-phase conveying, can be misleading. Fluidized



systems should be considered as a third distinct type of pneumatic system.

A fluidized state can be defined as a condition in which all particles are supported on a gas stream, with no material entrained in the stream itself. Material and conveying fluid move as a mass. The attainment and maintenance of this condition is a delicate operation, and one in which particle configuration plays a significant part. Very high ratios of material to air are the rule. As a corollary of the small air volumes used, total energy available in the air to move the supported-solids mass is low. Frictional or other forces that tend to upset the balance result in collapse of the fluidized phase.

Here Are Design Considerations

From the design point of view, there is no fundamental difference between suction and pressure systems, the choice generally being dependent on plant requirements and a consideration of economy. Design is basically a problem in determining the energy requirements. These can be expressed in pressure units, and from them, the size of the blower and required horsepower can be estimated.

Summation of the following five factors, in consistent units, gives the pressure drop across the system:

1. Acceleration energy needed to overcome inertia of the solids, and get them into motion.
2. Energy required to elevate the solids.
3. Energy required to sustain solid materials in the fluid stream, and overcome the material's friction in the conveying duct.
4. Energy losses associated with

Duct Size, Flow Rate, Friction Loss and Capacity Range

Duct Diameter	Flow, Scfm. at 5,000 Fpm.	Friction Loss, In. H ₂ O/100 Ft.	Usual Capacity, Thousand, Lb./Hr. Negative	Positive
4-in.	440	11.0	2-6	12-40
5-in.	680	8.0	3-10	15-60
6-in.	980	6.3	4-15	20-80
8-in.	1,800	4.5	15-30	30-160

changes of direction at bends and elbows.

5. Fluid losses in the duct, and at the terminals of the system. These are made up of pressure loss at the system's entrance, friction loss of the pure air stream in the duct work, pressure drop across the collector or separator at the end of system, and losses from any auxiliary units which may be incorporated into the system. Fluid head and kinetic energy terms are generally neglected, unless the system is characterized by unusually large vertical lifts or fluid velocities.

Four of these design components are based on an important variable—velocity. Many references in the literature describe how to determine conveying velocity of solid materials. Theoretical velocity for conveying fine particles can be calculated with Stokes' law; Newton's Law holds for large particles. Other investigators have suggested empirical formulas of more or less complexity.

There's a small fly in the ointment, however. All of these methods give only the critical or balancing velocities. So the designer usually assigns an additional empirical value to insure the sustained movement of the particles. Here, judgment comes into play; however, Alden's "Handbook of Industrial Exhaust Systems" offers a list of adequate conveying velocities in Table 19. This table suggests velocity ranges from 3,000 to 7,000 ft./min., depending on the bulk density of the material, and probably in part on the particle size and configuration.

For the purposes of this article, and for nearly all conveying systems involving material with bulk densities ranging from 25 to 60 lb./cu.ft., a velocity of 5,000 ft./min. will be found satisfactory. (This may seem to be an excessively high speed; however, the author has noted that particles in an air stream rarely attain more

than 80% of the theoretical air velocity—and in short systems, even less.)

Now let's look at the design factors in greater detail:

Acceleration—Material at rest has energy of position, which has to be converted to energy of motion. Substituting our assumed velocity of 5,000 ft./min. into the formula $E_a = Mv^2/2g$, we get an acceleration energy of 1,800 ft.-lb./min. per 1,000 lb./hr. of solids conveyed.

Lifting Energy—Energy required to lift a given amount of material a given distance can be expressed as $E_l = M \times d$.

Horizontal Requirements—This is probably the most controversial element of all. Unless the solids are of a type that can be held in suspension, that is, fairly light in weight and of particular particle geometry, they move along the bottom of the pipe in a fairly steady stream.

For our purposes we will assume, then, that the energy required to move a material is equal to: $E_h = M \times d \times f$, where f is actually a "finagle" factor. In the equation above, f is given as the coefficient of friction (calculated as the tangent of the angle of slide) between the material being conveyed and the material from which the duct is made. For most practical purposes, this factor provides satisfactory and duplicable results.

Bends and Elbows—It is desirable to make the transition from one direction to another a gradual one. Some granular materials, and even some finely powdered materials, have abrasive properties and can cause erosion at a bend. Also, sharp bends result in a stoppage or pile-up requiring re-acceleration.

For these reasons, elbows and bends in pneumatic conveying lines should have fairly long center-line radii, ranging from 36 to 72 in. It's possible to convey material around bends with shorter radii

Nomenclature

d	Distance, ft.
E_a	Energy of acceleration, ft.-lb./min.
E_l	Vertical-lift energy, ft.-lb./min.
E_h	Horizontal-run energy, ft.-lb./min.
E_e	Energy loss at elbows, ft.-lb./min.
f	Coefficient of friction.
g	Acceleration due to gravity, ft./sec. ²
M	Solids moved, lb./min.
R	Radius, ft.
v	Velocity, ft./sec.

than this, but only with considerable additional energy.

Assuming a radius of 48 in. for a 90-deg. elbow, the weight of solids moving around the bend is multiplied by the centrifugal force imparted to it. Using the formula $E_c = (Mv^2/gR) \times d \times f$, we obtain a value of 5,700 ft.-lb./min. per 1,000 lb./hr. of material handled.

Air Losses—Although all energy expenditures above have been stated in units of ft.-lb./min., air losses are usually expressed as in. H₂O. It is convenient for our purposes to leave them in these units. Air losses break down to pipe losses, entrance losses, cyclone separator resistance, and filter resistance. If the conveying line includes heat exchangers or intake filters, their resistances should be added.

Air resistance in the duct is a function of velocity and volume. The chart (see next page), reproduced from Marks, "Mechanical Engineers Handbook," gives pressure losses for 100-ft. lengths of duct as a function of flow rate and line diameter. Alden's Handbook presents a similar chart on pp. 104-5. Care must be taken to include equivalent footage involved for each elbow and bend; e.g. for a 48-in. radius, 90-deg. elbow, add 6.25 ft. of duct (from $2\pi R/4$).

Entrance losses are generally of small magnitude in relation to the rest of the system, and most always can be ignored. In most negative pressure systems, they are on the order of 2-3 in. H₂O.

Cyclone losses vary, and can usually be assumed to be twice the velocity pressure ($2\frac{1}{2}$ to 4 in.). Filter resistances are given, generally, by the manufacturer. Most commercial cloth-type collecting units are designed for an average resistance of 4 in. H₂O.

Math Doesn't Tell Whole Story

The two typical examples show a reasonable and workable approach to the problems in preliminary design of pneumatic conveyors. There is much more to the story than the final numbers show, however. There are so many little-known or dimly suspected variables and factors affecting the performance of pneumatic systems that we are pleasantly surprised when this performance corresponds exactly to our calculations.

Example 1—Typical System

Problem—Assume that we want to convey 3,000 lb./hr. of powdered resin from any one of three storage bins to a mixer. Conveying distance is 150 ft. horizontally and 25 ft. vertically; the conveying line includes six 90-deg. elbows. Measured angle of slide is 35°; assume $f = 0.7$ (Tangent 35° = 0.7). Calculate required power input.

Solution—We'll use a negative system.

Material Losses:

1. $E_1 = 1,800 \times 3 = 5,400$
2. $E_2 = (3,000/60) \times 25 = 1,250$
3. $E_3 = (3,000/60) \times 150 \times 0.7 = 5,250$
4. $E_4 = 5,700 \times 0.7 \times 6 \times 3 = 71,820$

Total material losses = 83,720

Assume that we'll use a 6-in. line. For this, the table shows a 980-cfm. flow rate. Therefore, energy losses attributable to solids flow can be expressed as:

$$83,720/(980 \times 5.2) = 16.5 \text{ in. H}_2\text{O}$$

where 5.2 is a factor that converts lb./ft.³ to in. H₂O.

Air Losses:

Also from the table, or chart, we see that air losses for 5,000 ft./min. in a 6-in.-dia. duct are 6.3 in. H₂O per 100 ft. So:

1. Duct losses

$$150 + 25 + (6 \times 6.25) = 212.25 \text{ ft. pipe} \\ (\text{where } 6.25 \text{ ft. is the length of a } 90^\circ \text{ elbow at a } 48\text{-in. radius}) \\ = (212.25/100) \times 6.3 = 13.4 \text{ in. H}_2\text{O}$$

2. Cyclone losses

$$= 3.0$$

3. Filter resistance

$$= 3.0$$

Total air losses = 19.4 in. H₂O

Material losses plus air losses = 16.5 + 19.4 = 35.9 in. H₂O. Converting this to horsepower:

$$\text{Hp.} = (\text{cfm.} \times \text{pressure losses}) / (6,350 \times \text{efficiency})$$

Efficiencies of centrifugal fans range from 40 to 66%. We'll use 50%.

$$= (930 \times 35.9) / (6,350 \times 0.5) = 11.1 \text{ hp.}$$

A 15-hp. motor, operating a centrifugal fan delivering 980 cfm. in a 6-in. line, will give an adequate margin of safety.

Example 2—An Exception

Problem—Make preliminary design calculations for a conveyor to move starch from a dryer to storage at the rate of 20,000 lb./hr. Horizontal conveying distance is 400 ft. and vertical lift is 50 ft. There will be four 90° elbows, two 45° elbows, and one 30° bend (a total of 5.33, 90° bends) in the conveying line. Angle of slide is 40°; $\tan 40^\circ = 0.835$.

If we convey from one point to one point, theoretically, a negative system should be most satisfactory. However, the quantity and distances involved here are such that pressure requirements exceed the capabilities of a centrifugal fan, and add unnecessary expense. Hence, a straight positive pressure system is indicated.

Solution—We'll use a positive system.

Material Losses:

1. $E_1 = 1,800 \times 20 = 36,000$
2. $E_2 = \frac{20,000}{60} \times 50 = 16,700$

$$3. E_3 = \frac{20,000}{60} \times 400$$

$$\times 0.835 = 111,000$$

$$4. E_4 = 5,700 \times 0.835$$

$$\times 20 \times 5.33 = 507,400$$

Total material losses = 671,100

For a 5-in. duct, the table shows a flow rate of 680 cfm.

$$671,100/(680 \times 5.2) = 190 \text{ in. H}_2\text{O}$$

Air Losses:

From the table, losses are 8.0 in. H₂O per 100 ft. So:

1. Duct losses

$$400 + 50 + (5.33 \times 6.25) = 483.3 \text{ ft. pipe} \\ = (483.3/100) \times 8.0 = 38.6 \text{ in. H}_2\text{O}$$

2. Cyclone losses

$$= 3.0$$

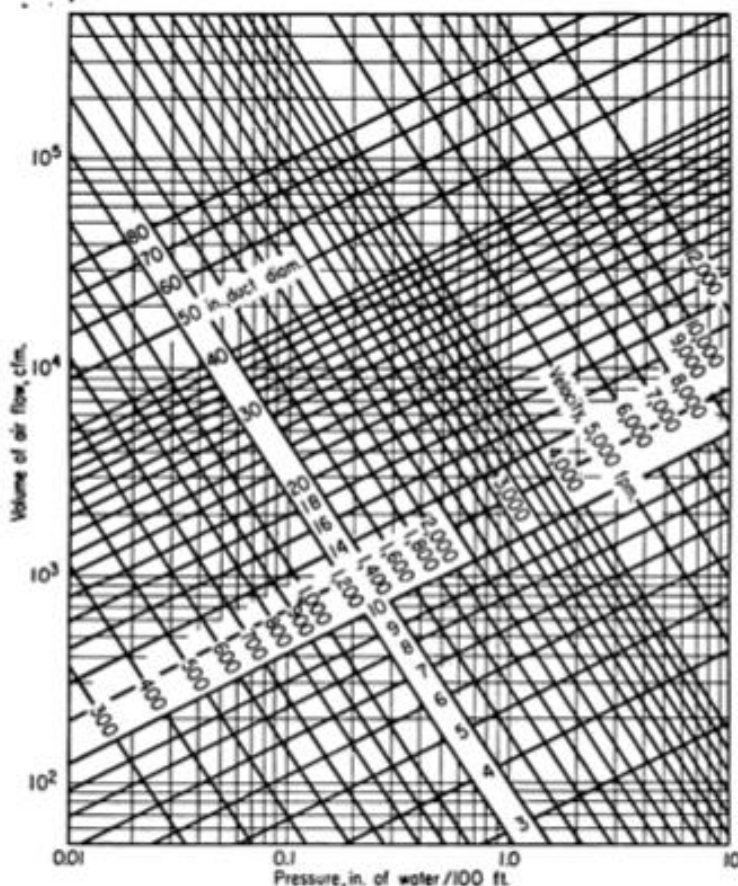
3. Filter resistance

$$= 3.0$$

Total air losses = 44.6 in. H₂O

Material losses plus air losses = 190 + 44.6 = 234.6 in. H₂O, or 234.6/27.78 = 8.5 psig.

A rotary positive-displacement blower, moving 680 cfm. against 8.5 psig., will suffice.



Accordingly, we temper theory with judgment and conservatism. The spread of horsepower ratings available in electric motors gives us ample opportunity to utilize this tempering facility; for example, if calculations indicate that 12 hp. is required, the use of a 15-hp. motor provides a 25% safety factor. If we get an answer of 10.5 hp., sufficient conservatism exists in the formulas to enable us to specify a 10-hp. motor without hesitation.

There are other more difficult problems of choice, which can assume considerable proportions, and which justify the existence of the specialist for final design. For example, characteristics of materials can be deceiving. Free-flowing soda ash, apparently an ideal material to convey, is sluggish, and requires

extra power. Finely ground pigments such as Fe_2O_3 , build up rapidly in elbows and cyclones, eventually stopping the flow. A slight change in the percentage of water of hydration will mean the difference between a highly abrasive alumina and one that will cause no wear at all.

Then again, things other than purely economic considerations often determine the choice of a system. In some crushing and grinding operations, a negative conveying system will also serve the secondary objective of drawing air through the unit for cooling and cleaning. Chances are that a negative system will win out for such an application, even though a positive pressure system would cost less money. When inert gases are used for conveying, and the pres-

ence of oxygen is undesirable, positive pressures are preferable. On the other hand, when material being conveyed is toxic or noxious, the need to avoid outward leakage is frequently a dominating factor in the choice of a negative conveying unit.

The pneumatic-conveying specialist can provide still another service in the problem of choice. We haven't said much about disadvantages of pneumatics, but there are a few. Many instances arise where air handling is not economical or feasible, and where other types of conveying are more practical. Screw conveyors, vertical screw lifts, bucket elevators and belts usually require less power to operate per ton of solids handled. Some mechanical units can move fragile materials more gently than air can. The specialist frequently combines pneumatic and mechanical units, retaining the function desired, while still effecting considerable savings.

Remember to Consider These

In contemplating final design and installation of a conveyor, any project engineer should consider, or furnish the supplier of the system, with the following information:

1. Distance traversed. This involves the lift, horizontal distance, and number of bends.
2. Solids characteristics. Size analysis, bulk density, and degree of hygroscopicity of the material to be conveyed.
3. Feed considerations. Will the rate of introduction to the conveying line be uniform, or should the supplier provide for uniform feed rate?
4. Automation. To what degree is it desired? Should switches and diverter valves be manual or automatic?
5. Electrical. What are the current characteristics in the plant?

In closing, it might be well to point out that the diversity of special uses to which pneumatic conveying systems can be put is unlimited. For example, they can be used for drying, heating or cooling while conveying. They can be designed to maintain the moisture content of the material being conveyed. They can even be used, to a limited degree, for size separation and size reduction. These uses, however, make another story.

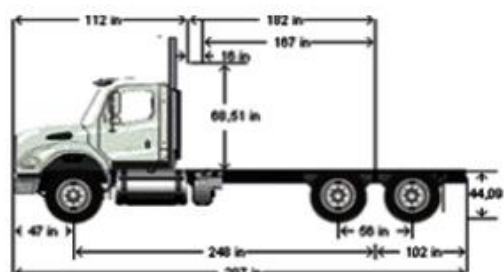
Anexo C: Ficha técnica chasis Supersucker

CHASIS CABINA M2 112

CHASIS M2 112 6X4 60K DD13 410 MIXTO EPA 10



PESO		
Tara	18.191 Lb.	(8.251 Kg)
Carga útil	41.809 Lb.	(18.964 Kg)
Peso bruto vehicular	60.000 Lb.	(27.215 Kg)
Peso eje delantero	9.511 Lb.	(4.314 Kg)
Peso eje trasero	8.680 Lb.	(3.937 Kg)
Suspensión delantera	Hoja Angosta 14.600 Lb.	
Suspensión trasera	Resorte Tuftrac 46.000 Lb.	
Largo Carrozado	284" (721 cm)	



KAUFMANN

56 2 2720 2000 - 56 2 2720 2842 | servicioclientes@kaufmann.cl | kaufmann.cl

CHASIS CABINA M2 112

CHASIS M2 112 6X4 60K DD13 410 MIXTO EPA 10



INFORMACIÓN TÉCNICA

VEHÍCULO

Tipo de vehículo	Chasis Cabina
Tracción	6x4
Distancia entre ejes	248" (630 cm)

MOTORIZACIÓN

Motor	DD13
Nivel de emisiones	EPA 10 GHG17
Potencia de motor	410 HP
Cilindrada	12800 cc
Torque (1050 RPM)	1650 Lb/Ft
Freno de motor	Freno Jacobs
Potencia de freno de motor (2300rpm)	536 BHP
Sistema eléctrico	12V

TRANSMISIÓN

Modelo	EATON RTLO-16918B
Embrague	Doble Disco Cerámico Eaton
Tipo de transmisión	Mecánica (Velocidades: 18 R:4)
Relación de eje trasero	3.91

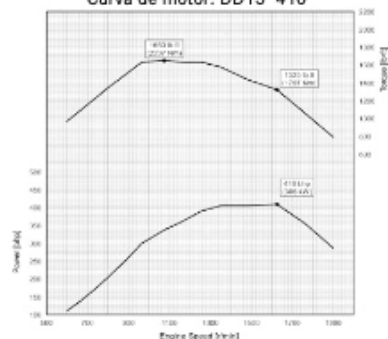
OTROS

Cabina	112" BBC Convencional De Aluminio Con Techo Plano
Tipo de cabina	Cabina Simple
Neumáticos delanteros	11R22.5 16 Capas
Neumáticos traseros	11R22.5 16 Capas
Llantas delanteras	Acero 22.5X8.25
Llantas traseras	Acero 22.5X8.25
Depósitos de combustible	Izq: 100 Gal. (380 L.)
Depósito de AdBlue	23 Gal. (87 L.)
Bloqueo	Longitudinal: SI Transversal: SI
Tipo de frenos	Tambor Meritor Trabajo Severo
Sistema de frenos	ABS

EQUIPAMIENTO Y SEGURIDAD

Aire acondicionado	SI
Tempomat	SI

Curva de motor: DD13 410



Santiago: Pajaritos [Casa Matriz] | Quilicura | San Bernardo | Vicuña Mackenna | La Dehesa | Cantagallo
 Regiones: Arica | Iquique | Antofagasta | Calama | Copiapó | La Serena | Viña del Mar | Placilla | Rancagua | Curicó | Linares
 Talca | Chillán | Los Angeles | Temuco | Valdivia | Osorno | Llanquihue | Puerto Montt | Castro | Coyhaique | Punta Arenas

Kaufmann se reserva el derecho de modificar las especificaciones de sus productos sin previo aviso.
 Fotografías son referenciales y pueden incluir opcionales.

Anexo D: Ficha técnica camión Supersucker



CAMIÓN ASPIRADOR SUPERSUCKER



Descripción

El Supersucker es un camión aspirador de alto vacío, genera un flujo de aire de alta potencia para transportar materiales sólidos, líquidos y fangos a través de líneas de succión de 8" de diámetro. Este equipo es ideal para eliminar desechos, recuperación de materiales a granel y llevar a cabo limpiezas ambientales en espacios reducidos.

El material aspirado ingresa al equipo a través de una entrada de 8", luego se produce la separación del material en la tolva, esto producto de la desaceleración del aire. Aquellas partículas que no son decantadas en esta etapa, pasan por medio del flujo de aire al ciclón, en donde son decantadas, quedando retenidos un 98% de las partículas antes de pasar a las cámaras de filtros de manga, donde el resto de las partículas quedarán en los 60 filtros que cuentan con sistema de aire reverso para su limpieza y así evitar la saturación de ellos.

OPCIONALES

- Boom Giratorio con manguera de 8".
- Hidrolavadora hidráulica con estanque de 375 lts.
- Descarga Neumática (Presurizada).
- Kit vías férreas.
- Tolva de acero inoxidable.
- Bomba para descarga de lodo.
- Carrete antiestática retráctil.
- Kit de mangueras y acoples.

INCLUYE

- Garantía por 1 año.



PESCO.CL | PESCO.COM.PE | ventas@pesco.cl

Especificaciones Técnicas

Modelo	Cap. de almacenamiento	Tolva	Ángulo de levante
6227	15 m³	15 m³	Acero 1/4" espesor

Sistema de Aspiración

Bomba de vacío	Desplazamiento	Flujo de aire	Vacío	Dist. máx. aspirado
Dresser	Positivo	6.000 CFM	28" de mercurio	300 mts

Características del chasis

Motor	Disposición de ejes	Caja de cambios	Cap. de ejes
15 m³	6x4	Eaton Fuller mecánico Allison automático	Delantero: 20.000 lb Trasero: 46.000 lb

Dimensión

Largo	Ancho	Alto
10,36 mt	2,44 mt	3,80 mt