

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO
MIXTO DE DOS ETAPAS PARA CEREALES**

JUAN PABLO VEGA TRIANA

CARLOS EDUARDO ARAQUE MANRIQUE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2009

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO
MIXTO DE DOS ETAPAS PARA CEREALES**

JUAN PABLO VEGA TRIANA

CARLOS EDUARDO ARAQUE MANRIQUE

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

GILBERTO PARRA

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

A mis padres

Juan Pablo Vega Triana

DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermana

Carlos Eduardo Araque Manrique

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias.

A todos los que nos apoyaron y nos brindaron su cariño y amistad.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	29
1. OBJETIVOS	31
1.1 OBJETIVO GENERAL	31
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
2. GENERALIDADES DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO	33
2.1 DEFINICIÓN DE TRANSPORTE NEUMÁTICO	33
2.2 HISTORIA DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO	34
2.3 UTILIZACIÓN DE TRANSPORTADORES NEUMÁTICOS PARA TRANSPORTE DE CEREALES	35
2.4 PROPIEDADES DE LOS CEREALES PARA EL TRANSPORTE NEUMÁTICO	36
3. PROCESO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO	38
3.1 FLUIDIZACIÓN	38
3.2 TIPOS DE TRANSPORTE NEUMÁTICO	40
3.2.1 TRANSPORTE EN FASE DILUIDA	42
3.2.2 TRANSPORTE EN FASE DENSA	42

4. CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSPORTADORES NEUMÁTICOS	44
4.1 TRANSPORTADORES POR SUCCIÓN	44
4.2 TRANSPORTADORES POR PRESION	46
4.3 TRANSPORTADORES COMBINADOS	47
5. ELEMENTOS DE UN TRANSPORTADOR NEUMÁTICO	49
5.1 FUENTES DE AIRE	49
5.1.1 GENERALIDADES	49
5.1.2. TIPOS DE ELEMENTOS SOPLANTES	50
5.1.2.* VENTILADOR	50
5.1.2.* SOPLADOR	51
5.1.2.* COMPRESOR	52
5.2 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN DE MATERIAL	53
5.2.1 GENERALIDADES	53
5.2.2 TIPOS DE DOSIFICADORES	54
5.2.2.* VENTURI	54
5.2.2.* BOQUILLA DE SUCCIÓN	55
5.2.2.* TORNILLO	56
5.2.2.* VALVULA ROTATIVA	57
5.3 VÁLVULAS DE DESVÍO	59
5.4 SEPARADORES CICLÓNICOS	60

5.4.1 GENERALIDADES	61
5.4.2 FAMILIAS DE SEPARADORES CICLÓNICOS	64
5.4.2.* FAMILIA DE CICLONES DE ALTA EFICIENCIA	65
5.4.2.* FAMILIA DE CICLONES DE ALTA CAPACIDAD	66
5.4.2.* FAMILIA DE CICLONES CONVENCIONALES	67
5.4.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE CICLONES	69
5.4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CICLONES	73
6. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TUBERÍA	74
6.1 MÉTODO ANALÍTICO	74
6.2 MÉTODO DE FISCHER	76
6.3 MÉTODO DE EDITORIAL LABOR	78
6.4 MÉTODO EMPÍRICO	80
6.5 MÉTODO DE Mc CABE	81
7. MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO	86
8. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA CÁLCULO DE VARIABLES EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO	101
8.1 MANEJO DEL PROGRAMA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO	101
9. CÁLCULO Y DISEÑO DEL TRANSPORTADOR NEUMÁTICO DEL MODELO PROPUESTO	114

9.1 DISEÑO DE CICLONES O SEPARADORES	114
9.2 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA	118
9.2.1 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE TUBERÍA EN ETAPA DE SUCCIÓN	120
9.2.2 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE TUBERÍA EN ETAPA DE PRESIÓN	122
9.3 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍA	123
9.3.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN TUBERÍA EN ETAPA DE SUCCIÓN	123
9.3.2 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN TUBERÍA EN ETAPA DE PRESIÓN	126
9.3.3 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN ACCESORIOS	129
9.3.4 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN LA SECCION DE SOLO AIRE	131
9.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA EN EL SISTEMA	133
9.5 VÁLVULA DOSIFICADORA	134
9.6 VÁLVULA DE DESVÍO	141
9.7 SELECCIÓN DEL SOPLADOR	141

10. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSPORTADOR	
NEUMÁTICO DEL MODELO PROPUESTO	143
10.1 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES DE LAS	
PRUEBAS REALIZADAS AL TRANSPORTADOR NEUMÁTICO	151
11. PRESUPUESTO	153
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	157
BIBLIOGRAFÍA	159
ANEXOS	160

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Transportador neumático industrial	35
Figura 2. Tubería desgastada por el paso de material	36
Figura 3. Proceso de fluidización.	39
Figura 4. Patrones de flujo en tubería de transporte horizontal	41
Figura 5. Transporte en fase diluida	42
Figura 6. Transporte en fase densa	43
Figura 7. Sistemas de transporte disponible para transporte neumático	44
Figura 8. Transporte por succión desde almacenes abiertos	46
Figura 9. Configuración típica de transporte por presión	47
Figura 10. Transportador neumático combinado	48
Figura 11. Tipos de unidades de movimiento de aire	50
Figura 12. Curva característica de un ventilador	51
Figura 13. Curva característica de un soplador	52
Figura 14. Características de variación de presión y caudal de diversos compresores	52
Figura 15. Venturi para dosificación de material	54
Figura 16. Boquilla de succión	55

Figura 17. Aplicación de boquilla de succión	56
Figura 18. Dosificadora de tornillo.	56
Figura 19. Válvula dosificadora	57
Figura 20. Diseños alternativos de válvulas rotativas	58
Figura 21. Opciones de ventear válvulas rotativas	58
Figura 22. Relación entre cantidad de material y revoluciones de la válvula rotativa	59
Figura 23. Válvula de desvío	60
Figura 24. Geometría del separador ciclónico	61
Figura 25. Definición de parámetros geométricos del separador ciclónico	62
Figura 26. Principio de funcionamiento de un separador ciclónico	63
Figura 27. Generación de vórtices de aire y partículas.	63
Figura 28. Tipos de ciclones	68
Figura 29. Ventajas y desventajas de los separadores ciclónicos	73
Figura 30. Diagrama de cuerpo libre de la mezcla sólido-fluido.	87
Figura 31. Presentación del programa de diseño del sistema de transporte neumático	102
Figura 32. Menú principal del programa de diseño del sistema de transporte neumático	103
Figura 33. Subprograma de diseño de ciclones o separadores.	104

Figura 34. Submenú de diseño de tubería	105
Figura 35. Subprograma de selección de diámetro	106
Figura 36. Subprograma de pérdidas de presión en la tubería de la etapa de succión.	107
Figura 37. Subprograma de selección de diámetro	109
Figura 38. Subprograma de pérdidas de presión en la tubería de la etapa de presión.	110
Figura 39. Subprograma de pérdidas en accesorios	111
Figura 40. Subprograma de pérdidas en la sección de solo aire	112
Figura 41. Variables de entrada en el subprograma de diseño de ciclones.	116
Figura 42. Resuspensión de material primer cálculo.	116
Figura 43. Primer cálculo de geometría y pérdidas de presión en el ciclón	117
Figura 44. Resuspensión de material calculo definitivo	117
Figura 45. Calculo definitivo de la geometría del ciclón.	118
Figura 46. Datos de entrada y cálculo de porosidad con el material más pesado y de mayor tamaño.	119
Figura 47. Resultados de la relación másica con el diámetro supuesto en succión.	121
Figura 48. Resultados de la relación másica con el diámetro supuesto en presión.	122

Figura 49. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas de presión en la etapa de succión parte uno	125
Figura 50. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas en la etapa de succión parte dos	125
Figura 51 Resultados de las pérdidas de presión en tubería en la etapa de succión.	126
Figura 52. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas de presión en la etapa de presión, camino 1 y 2, parte uno	128
Figura 53. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas de presión en la etapa de presión, camino 1, parte dos	128
Figura 54. Resultados de pérdidas de presión en la etapa de presión para el camino 1 lado izquierdo, camino 2 lado derecho	129
Figura 55. Datos entrada para las pérdidas en accesorios en el camino 1 lado izquierdo y camino 2 lado derecho	130
Figura 56. Resultados de pérdidas en accesorios para el camino 1	131
Figura 57. Resultados de pérdidas en accesorios para el camino 2	131
Figura 58. Datos de entrada del cálculo de las pérdidas en la sección de solo aire.	132
Figura 59. Resultados de las caídas de presión en la sección de solo aire	133

Figura 60. Resultados de potencia requerida por el sistema bajo las condiciones de diseño dadas. En el lado izquierdo resultados del camino 1, lado derecho resultados del camino 2	133
Figura 61. Tipos de rotor de válvula rotativa.	136
Figura 62. Aspas de válvula dosificadora.	137
Figura 63. Rodamientos sobre la carcasa.	138
Figura 64. Juego de poleas	140
Figura 65. Válvula dosificadora.	140
Figura 66. Válvula de desvío.	141
Figura 67. Soplador.	141
Figura 68. Transportador neumático	142
Figura 69. Direccionador de flujo	144
Figura 70. Boquilla de succión doble	145
Figura 71. Detalle de las perforaciones en la boquilla exterior	145
Figura 72. Material depositado en la base del acople al ciclón	146
Figura 73. Pared inclinada en el acople al ciclón	146
Figura 74. Válvula dosificadora con excesiva holgura entre aspas y carcasa	147
Figura 75. Cereales utilizados en las pruebas del transportador.	148
Figura 76. Filtro obstruido parcialmente.	151
Figura 77. Fenómenos observados.	152

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Presión de trabajo aproximada de diversos dispositivos de dosificación	54
Tabla 2. Eficiencia de remoción de las familias de ciclones	65
Tabla 3. Características de los ciclones de alta eficiencia	66
Tabla 4. Características de los ciclones de alta capacidad	67
Tabla 5. Características de los ciclones convencionales	68
Tabla 6. Parámetros y valores recomendados de diseño para ciclones.	72
Tabla 7. Ecuaciones del método analítico	75
Tabla 8. Ecuaciones del método de Fischer	77
Tabla 9. Ecuaciones del método empírico	80
Tabla 10. Datos de pruebas del transportador en etapa de presión.	149
Tabla 11. Datos pruebas del transportador en etapa de succión.	150

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Propiedades de los cereales para el transporte neumático	160
Anexo B. Prácticas de laboratorio	161
Anexo C. Manual de seguridad y uso del transportador neumático	171
Anexo D. Código de programación en MATLAB	175

GLOSARIO

CICLON: Elemento separador de partículas sólidas del aire u otro gas.

FLUIDIZACIÓN: Proceso mediante el cual una corriente de aire atraviesa las partículas sólidas y éstas se comportan como un fluido.

TRANSPORTE NEUMÁTICO: Es el movimiento de partículas sólidas mediante una corriente de aire u otro gas.

RESUSPENSIÓN: Es el fenómeno causado por el ingreso de aire a través de la válvula dosificadora y que mantiene el material en flotación, impidiendo su transporte.

VÁLVULA DOSIFICADORA: Es un elemento mecánico que regula la cantidad de material que ingresa a la tubería de transporte.

VELOCIDAD DE FLOTACIÓN: Es la velocidad del gas a la cuál un material permanece completamente suspendido, velocidades superiores a éste valor implican transporte neumático.

VÓRTICE: Torbellino de aire o de aire y material que se forma en el interior de un ciclón.

**TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE TRANSPORTE
NEUMÁTICO MIXTO DE DOS ETAPAS PARA CEREALES***

AUTORES: Juan Pablo Vega Triana

Carlos Eduardo Araque Manrique**

PALABRAS CLAVES: Transporte Neumático, Fluidización, Fase Densa, Fase Diluida, Válvula dosificadora, Ciclones

DESCRIPCIÓN:

Este documento contiene información general sobre el transporte neumático, especialmente el de cereales. Presenta diversos métodos de cálculo de condiciones de tubería, así como un programa realizado en el software computacional MATLAB, que con una interfaz en GUIDE permite al usuario calcular diversos sistemas de transporte neumático, brindándole las dimensiones geométricas y pérdidas de presión en los diferentes dispositivos del equipo como los separadores ciclónicos, tubería y accesorios, también calcula la potencia consumida por el soplador. Es una valiosa herramienta para determinar las condiciones de operación de los transportadores neumáticos.

También contiene información sobre el proceso de diseño de un transportador neumático a escala, para transportar diversos tipos de cereales. El equipo permitirá la realización de pruebas de laboratorio para analizar las propiedades de varios materiales y la observación de diversos fenómenos físicos como la fluidización y la creación de vórtices al interior de los separadores ciclónicos, también permite reconocer el tipo de flujo, en fase densa y diluida, este es un elemento importante para el diseño e investigación de transportadores neumáticos, porque la potencia y las pérdidas de presión están fuertemente influenciadas por este factor.

Mediante la construcción del modelo se espera incrementar el desarrollo intelectual e investigativo de los estudiantes de ingeniería mecánica en el área de diseño de maquinas; con la ayuda de manuales de laboratorio brindamos una forma fácil de usar y aprovechar el equipo.

*Trabajo de grado. Modalidad Investigación.

**Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Ingeniería Mecánica. Ing, Gilberto Parra.

**TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF PNEUMATIC TWO STAGE
CONVEYING SYSTEM FOR CEREALS***

AUTHORS: Juan Pablo Vega Triana

Carlos Eduardo Araque Manrique**

KEYWORDS: Pneumatic Convey, Fluidization, Dense Phase, Dilute Phase, Rotative Valve, Cyclons.

DESCRIPTION:

This document contains general information about pneumatic convey, of cereals specially. Presents diverse calculate methods of piping conditions, also a program developed in the computational software MATLAB, whit an interface in GUIDE allow calculate various systems of pneumatic convey, giving the geometrical dimensions and pressure losses in the devices of the equipment has cyclonic separators, piping and accessories, also calculate the power consumed for the blower. It is a valuable tool to determine operation conditions of pneumatic conveyors.

Also contain information about the process of design of a pneumatic scale conveyor, to transport diverse kind of cereals. The equipment will allow the realization of laboratory test to analyze the properties of various materials, and the observation of vortex in the interior of cyclonic separators. Also allows recognize the type of flow, in dense and dilute phases, this is an important element for design and research of pneumatic conveyors, because the power and pressure losses are greatly influenced by this factors.

Whit the construction of the model we hope increase the intellectual and investigative development of the mechanical engineering students in the design of machines area; whit the help of laboratory manuals we give an easy way to use and enjoy the conveyor.

*Trabajo de grado. Modalidad Investigación.

**Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Ingeniería Mecánica. Ing, Gilberto Parra.

INTRODUCCIÓN

El transporte neumático es uno de los procesos más interesantes para el movimiento de material, involucra conceptos de mecánica de fluidos, dinámica y diseño de máquinas entre otras áreas de la ingeniería, en general los modelos matemáticos del proceso son bastante complejo, debido a que el transporte de material mediante una corriente de gas genera interacciones entre las partículas y éstas son difíciles de analizar debido a las colisiones entre ellas y contra la tubería de transporte. Es por ello que continuamente se recurre a formulas empíricas o a parámetros encontrados experimentalmente para poder realizar un diseño adecuado.

Mediante el diseño de un transportador neumático, utilizando las ecuaciones básicas que rigen el proceso, trataremos de lograr un mayor entendimiento del fenómeno. También podremos brindar la posibilidad de que los estudiantes aprecien la teoría puesta en práctica generando una mayor interiorización de la información, al igual que una motivación adicional para continuar acrecentando el conocimiento sobre el transporte neumático.

El control de las variables y la forma como estas afectan un proceso es algo que se puede experimentar fácilmente con un sistema físico a escala que confirme o invalide nuestras suposiciones; generando continuas interrogantes y respuestas, y nos ayude a entender lo que sucede en la práctica, dejando de lado las idealizaciones teóricas.

El conocimiento del comportamiento real de este tipo de transportador, brindara herramientas valiosas para realizar mejores diseños, que satisfagan de la forma más adecuada las necesidades específicas de movimiento de material; también permite reconocer las características principales del sistema, resaltando las cualidades y defectos que posee el transporte neumático.

El diseño y construcción de un transportador neumático permitirá estudiar y visualizar el transporte de materiales sólidos a granel; también analizar cómo los diferentes tipos de flujo en la tubería pueden afectar el transporte, y así determinar los parámetros y variables más importantes para el correcto diseño y operación de estos sistemas tales como la velocidad mínima de la mezcla aire-sólido y la caída de presión en la tubería entre otros.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Contribuir con la formación integral de los estudiantes de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander, brindándoles la posibilidad de interactuar y descubrir las características de un sistema de transporte neumático de cereales.

1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar el modelo matemático para un sistema de transporte neumático.
2. Diseñar y construir un sistema de transporte neumático mixto de dos etapas para cereales.

Con las siguientes especificaciones del sistema:

- Capacidad de transporte 200 Kg de cereal por hora.
- Dos configuraciones distintas en la línea de transporte en la etapa de presión.
- Longitud de la línea de transporte de la primera configuración 75 centímetros horizontales y 30 centímetros verticales.
- Longitud de la línea de transporte de la segunda configuración 95 centímetros horizontales y 30 centímetros verticales.

Para lo cual se deberá:

- a. Diseñar y construir el sistema de transporte neumático que permita el movimiento del cereal desde la zona de carga hasta la de descarga.

Con las siguientes características:

- Mecanismo de accionamiento por medio de un soplador eléctrico de velocidad variable.
 - Medidores de presión en cada etapa del sistema.
 - Secciones de tubería transparente (Acrílico).
 - Carga de material por succión en la primera etapa.
 - Movimiento de material por presión en la segunda etapa.
- b.** Diseñar y construir dos separadores ciclónicos.
- Con las siguientes características:
- Sistema de dosificación de material en la base del primero.
 - Sistema de filtrado de aire en el segundo.
 - Paredes laterales transparentes (Acrílico) en los dos ciclones.
- 3.** Entregar Planos de construcción del sistema de transporte neumático completo y de cada componente en el software SolidWorks.
- 4.** Elaborar un manual de uso, prácticas de laboratorio y mantenimiento del transportador para el usuario.

2. GENERALIDADES DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO

2.1 DEFINICIÓN DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

El proceso de transporte neumático de material consiste principalmente en mover sólidos, ya sean polvos o partículas granulares dentro de una tubería. El movimiento del material se da por la combinación de un diferencial de presión y mediante una corriente de flujo de gas a presión.

Un transportador neumático presenta algunas limitaciones debido a que no puede transportar materiales húmedos (solo permite un nivel bajo de humedad) ni que tengan tendencia a adherirse, ya que la tubería podría quedar obstruida por el apelmazamiento del material, también está limitado su uso a materiales con baja fragilidad y baja abrasividad debido a que el material puede romperse al chocar con la tubería y con otras partículas, la abrasividad es un factor a tener en cuenta especialmente en los codos, debido a que en éstos elementos puede darse un desgaste excesivo.

En general un transportador neumático requiere más potencia por peso de material transportado que otras alternativas de transporte pero sus ventajas pueden compensar ésta deficiencia.

El transporte neumático puede ser usado con una gran cantidad de productos, como la arena, cemento, harina, productos químicos y productos alimenticios entre otros, debido a que el transporte se realiza mediante tuberías, es en general un proceso bastante limpio tanto para el producto como para el ambiente. Con las normas medioambientales actuales se convierte en una alternativa importante en diversos procesos industriales, además permite una gran flexibilidad en los recorridos, cambios de dirección y una fácil automatización lo que reduce los costos asociados al proceso de producción.

Otra de las ventajas es que permite la descarga de material mediante sistemas de vacío o aspiración, lo que lo hace importante cuando se requiere descargar material a granel de forma vertical como en el caso de barcos o vagones de tren o cuando éstos se encuentran apilados.

La cantidad de material que se puede transportar depende fundamentalmente de dos factores; el primero es la caída de presión que se puede dar en la línea de transporte y el segundo es el diámetro de la tubería. Generalmente la caída de presión depende de las características del elemento soplante, pero un buen diseño debe jugar con la combinación de ambos parámetros; no existe una combinación general que permita transportar todos los materiales de manera satisfactoria, cada producto posee características especiales y la decisión final a menudo se ve influenciada por factores indirectos, como son los costos iniciales del transportador o los costos de producción.

2.2 HISTORIA DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO

El transporte neumático es bastante antiguo, hace más de cien años se empezó su utilización, a pesar de ser un proceso muy común, aún existen gran cantidad de cosas que ignoramos, la mayor parte de los diseños se realizan usando la experiencia obtenida mediante prueba y error por investigadores o mediante relaciones encontradas con la observación del proceso, se han dado grandes pasos en el entendimiento del movimiento de material, hoy en día los esfuerzos están enfocados en encontrar formas de transportar mayor cantidad de materiales en fase densa, debido a las ventajas que presenta éste tipo de transporte, los avances en metalurgia y nuevos materiales también permiten disminuir la degradación de la tubería de transporte.

Hoy en día el transporte neumático está altamente difundido entre las industrias, se puede encontrar en puertos, minería, industrias química y

farmacéutica, plantas de producción de elementos plásticos, vidrios entre muchas otras.



Figura 1. Transportador neumático industrial

Debido a que el transporte se realiza en sistemas cerrados la poca contaminación del producto con el medio y viceversa han contribuido a la expansión de los sistemas de éste tipo en todo el mundo.

2.3 UTILIZACIÓN DE TRANSPORTADORES NEUMATICOS PARA TRANSPORTE DE CEREALES

Los sectores agropecuarios representan un gran campo de aplicación para el transporte neumático, ya que éste presenta características de higiene, flexibilidad, precisión, seguridad y confiabilidad; es también adaptable a cualquier necesidad en cuanto a capacidad y longitud, lo que simplifica notablemente el traslado de productos entre sectores de producción. Estas características lo convierten en uno de los medios más eficaces para el transporte de diversos productos agrícolas como cereales, lo cual vislumbra un futuro de amplia expansión de ésta forma de transporte.

Una de las razones primordiales de la utilización de un transportador neumático para cereales es su capacidad para aspirar el material sin la necesidad de una diferencia de alturas o un depósito contenedor, sumado a ello el transporte por el interior de una tubería disminuye la contaminación que absorben los cereales si se compara con los que son expuestos directamente al medio ambiente, esto lo hace muy útil aun en sitios con un alto nivel de contaminación, ya que el tránsito desde la zona de carga hasta la de descarga se hace sin tener contacto con el medio que lo rodea.

2.4 PROPIEDADES DE LOS CEREALES PARA EL TRANSPORTE

NEUMÁTICO

Cuando se desea transportar neumáticamente un material se deben analizar varias propiedades de los mismos, entre ellas el grado de abrasividad, ya que si éste es demasiado alto se tendrá un desgaste prematuro de la tubería de transporte y de los demás componentes del sistema, también es importante revisar su tendencia a pegarse, entre partículas y con las superficies, ya que se puede generar taponamiento de la tubería y un consumo excesivo de potencia, el material para el transporte neumático debe estar relativamente seco, y poseer poca fragilidad si se desea que mantenga su integridad a lo largo del recorrido, ya que la fricción y los impactos son permanentes.



Figura 2. Tubería desgastada por el paso de material

En general los cereales poseen propiedades que los hacen fáciles de transportar neumáticamente (Ver Anexo A), son algunos de los materiales más comunes en éste tipo de transporte, debido a que al realizarse en tuberías cerradas impiden el flujo de partículas contaminantes desde y hacia el medio que rodea los cereales, esto es fundamental con materiales que normalmente serán utilizados para el consumo humano.

3. PROCESO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

3.1 FLUIDIZACIÓN

Es el proceso que hace posible el transporte neumático; dependiendo del grado de fluidización que se logre con el material podemos tener diversos tipos de transporte, ya sea denso o diluido, el consumo de potencia y desgaste de los elementos del transportador están fuertemente asociados a éste concepto.

Se puede definir como la operación por la cuál las partículas sólidas son transformadas en un estado “fluido” a través del contacto con un gas o líquido. Este método de contacto posee varias características inusuales, una correcta aplicación de los procesos de fluidización permite el aprovechamiento del comportamiento de los materiales para realizar su transporte u otro tipo de procesos industriales.

Si se tiene una cama de partículas sólidas finas, un caudal pequeño de fluido pasa a través de los espacios vacíos, esto se conoce como lecho fijo. Con un incremento en el caudal, las partículas se separan y algunas vibran y se mueven en determinadas regiones; esto se conoce como lecho expandido.

A una velocidad aún más alta, se alcanza un punto en el cuál todas las partículas son suspendidas en el fluido ascendente, en éste momento la fuerza de fricción entre una partícula y el fluido contrarresta el peso de la partícula, la componente vertical de la fuerza de compresión entre partículas adyacentes desaparece. Se considera entonces que se ha alcanzado el estado de fluidización incipiente o mínima fluidización.

Un incremento en el caudal resulta en un estado de expansión progresiva del lecho, no se observa un burbujeo a gran escala, y toda la mezcla es

aproximadamente homogénea, esto se conoce como fluidización particulada o uniforme.

Con flujos más altos la agitación de las partículas se torna violenta y el movimiento es más vigoroso, el lecho no se expande mucho más allá del nivel de mínima fluidización, se presenta entonces una fluidización agregativa o burbujeante. Dependiendo de la geometría del recipiente, las burbujas pueden presentar el fenómeno de empaquetamiento, en el cuál su tamaño es tal que puede alcanzar las paredes, después de eso la porción de lecho por encima de la burbuja es empujada hacia arriba como por un pistón. Las partículas luego caen y la burbuja se desintegra, formando un movimiento oscilatorio que se repite, éste empuje puede ser aprovechado para realizar transporte de material en fase densa.

Hasta éste punto todas las mezclas sólido-fluido se consideran fase densa porque existe un límite superior del lecho claramente definido. Si el flujo tiene una velocidad suficientemente alta, la velocidad de arrastre de las partículas será excedida y los sólidos serán transportados con la corriente, en ése punto se tiene una fluidización, en fase diluida y con transporte de material.

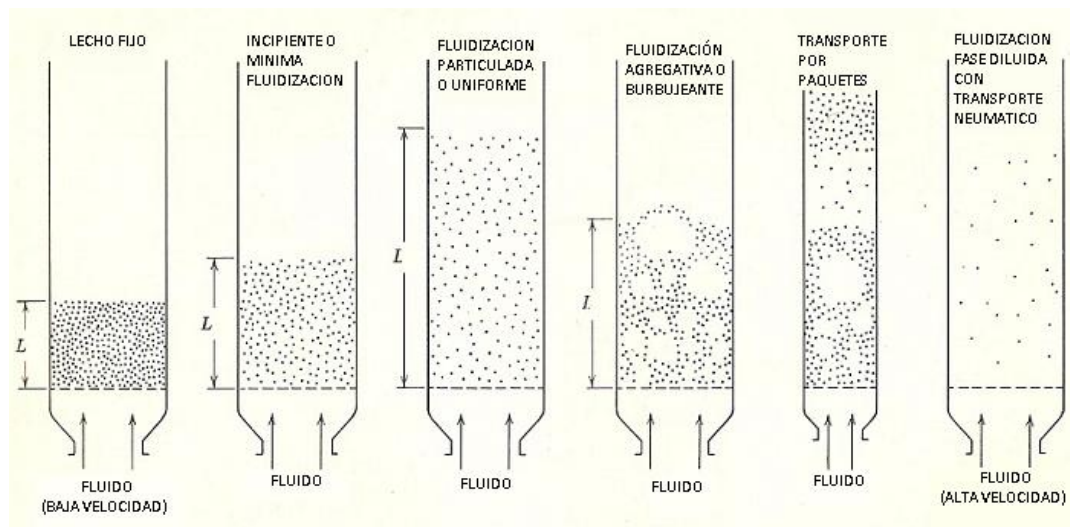


Figura 3. Proceso de fluidización.

3.2 TIPOS DE TRANSPORTE NEUMATICO

Aún no existe un consenso general para decidir cuando se presenta transporte en fase densa y fase diluida, en general se recurre a observaciones y descripción de dichas observaciones para determinar el tipo de transporte que se está presentando.

Existen algunos valores generales de algunas características del transportador neumático como son la velocidad de gas o el nivel de presión que pueden indicar fase densa o fase diluida pero Éstos valores dependen de la bibliografía que se analiza. Otros autores simplemente definen su concepto de fase densa y fase diluida, no existe un límite claramente visible para pasar un tipo de transporte a otro, algunas veces se recurre a dos conceptos para diferenciarlos; la velocidad de “choking” que es la velocidad límite entre los 2 tipos de transporte, velocidades por encima de su valor indican transporte en fase diluida y valores inferiores transporte en fase densa; se define como:

$$V_{choking} = \varepsilon_{ch} * \left(\frac{G}{\rho_s * (1 - \varepsilon_{ch})} + V_t \right) \quad (3.2.1)$$

Donde: ε_{ch} = Fracción de vacío en la tubería a la velocidad de “choking”

$$G = \text{Flujo másico de sólidos por unidad de área} = \frac{M_p}{A}$$

ρ_s = Densidad del sólido

V_t = Velocidad terminal o de flotación de la partícula

M_p = Flujo másico de sólidos

La velocidad de “choking” sólo es válida para transporte vertical. Para el transporte horizontal se definió de forma análoga la velocidad de saltación, ésta velocidad se define como:

$$V_{saltación} = \left[\frac{4 * M p * 10^{\alpha} * g^{\frac{\beta}{2}} * D^{\left(\frac{\beta}{2}-2\right)}}{\pi * \rho_f} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (3.2.2)$$

Donde: $\alpha = 1440 * X + 1.96$

$$\beta = 1100 * X + 2.5$$

X = Tamaño de la partícula

D = Diámetro de la tubería

ρ_f = Densidad del gas

g = Aceleración gravitacional.

Las anteriores definiciones no son universalmente aceptadas es por eso que muchas veces se dice que todo lo que no sea claramente fase densa es fase diluida o viceversa. La figura 4 presenta la evolución desde flujo altamente diluido hasta descender a transporte en fase densa con acumulación de material en la base de la tubería.

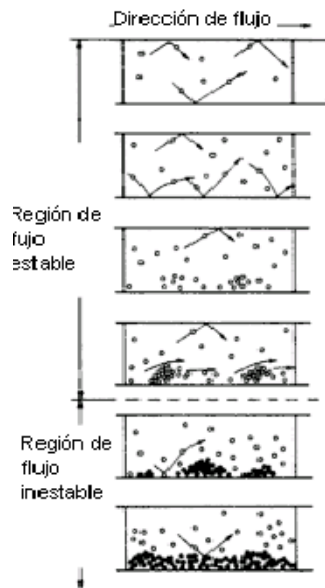


Figura 4. Patrones de flujo en tubería de transporte horizontal

3.2.1 TRANSPORTE EN FASE DILUÍDA

Casi cualquier material puede ser transportado de ésta forma, en general se trata de partículas totalmente suspendidas en el fluido de transporte, es decir no existe acumulación en la zona inferior de la línea de transporte, se puede transportar de ésta forma en sistemas de presión, vacío o combinados. En general un material que puede ser transportado en fase densa, también lo hará en fase diluida y para ello generalmente se requiere solamente un aumento de la velocidad del gas.

Se requieren grandes volúmenes de aire; el arrastre producido mantiene el sólido en suspensión al interior de la corriente, el gasto energético es importante por la necesidad de un suministro continuo de gran cantidad de fluido. Dependiendo de las características de abrasividad del material se pueden presentar inconvenientes de desgaste excesivo en la tubería. Debido a la gran cantidad de aire disponible para el transporte y su alta velocidad permite un flujo continuo de gran cantidad de material.

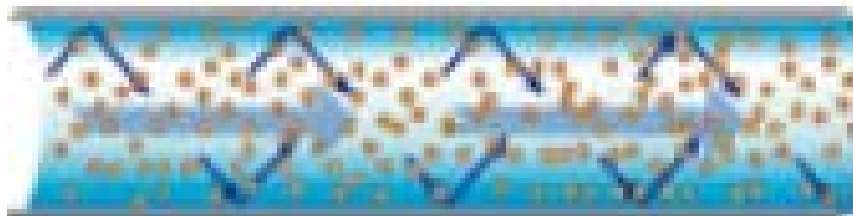


Figura 5. Transporte en fase diluida

3.2.2 TRANSPORTE EN FASE DENSA

A menudo es llamado flujo no suspendido, como su nombre lo indica el material no está completamente suspendido en la corriente de aire. Se puede presentar de varias formas, como ondulaciones de material o como paquetes de material separados por una zona de aire, aunque existen muchos puntos intermedios en que se presentan combinaciones de ambas. En general si en una tubería horizontal existe acumulación de material en la parte inferior o no se observa un

transporte diluido homogéneo del material estamos frente a un sistema de tipo denso. Por ésta razón algunos autores simplemente expresan que si no se tiene una fase diluida claramente identificable entonces estamos ante fase densa.

El volumen de aire requerido es bastante menor que en fase diluida, el solido se transporta por empuje haciendo “paquetes”, para ello se requiere un menor flujo de aire pero una mayor presión. La energía requerida es menor, al igual que el desgaste en la tubería, es recomendable cuando el material transportado es abrasivo, se pueden generar taponamientos debido a que el material crea una capa sobre la superficie inferior de la tubería, lo que restringe el flujo.



Figura 6. Transporte en fase densa

4. CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSPORTADORES NEUMÁTICOS

Dependiendo de las necesidades del proceso de transporte se puede poseer un transporte por succión (vacío), por presión o por una combinación de ambos.

Existe otro tipo de transporte en fase densa que se da con un equipo especial llamado tanque de soplado o de presión que envía porciones de material presurizado a través de la tubería, el transporte es intermitente. El siguiente diagrama representa las diversas combinaciones posibles y las características de cada tipo de transportador seleccionado.

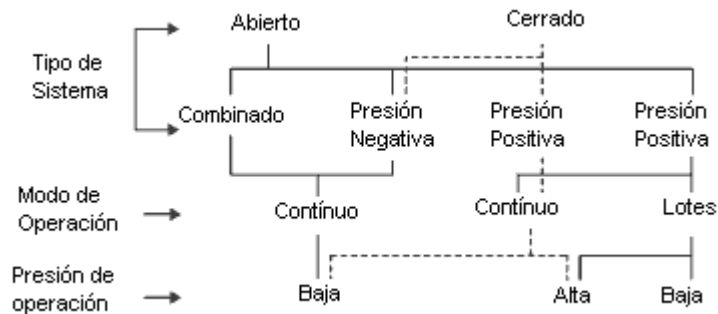


Figura 7. Sistemas de transporte disponible para transporte neumático

4.1 TRANSPORTADORES POR SUCCIÓN

El transporte por succión generalmente se usa para arrastrar material desde diversas fuentes hacia un punto común; si existe poca o nula diferencia de presión en los puntos de carga del material no existen problemas al utilizar ésta opción, el elemento dosificador del producto que entra al sistema es muy simple, si se compara con su similar de presión positiva.

Una ventaja de éstos sistemas es que el aire y las posibles fugas de gas se dan desde el exterior del sistema hacia el interior del mismo, por ésta razón el impacto por contaminación de las partículas de polvo al ambiente es

prácticamente nulo. Esta característica es fundamental cuando se trabaja con materiales tóxicos o peligrosos.

Cuando se desea transportar material apilado o de depósitos abiertos como barcos, el sistema de succión es la mejor opción, también lo es cuando se realizan labores de limpieza.

Debido a que el aire succionado por la unidad de potencia atraviesa el cuerpo de la misma, es importante que se realice un filtrado riguroso de la corriente de gas para evitar daños a la unidad.

Se debe prestar especial atención a lo siguientes detalles:

- 1) Cuando se transporta de forma continua, el material depositado en el recipiente de almacenamiento debe ser retirado continuamente, esto se hace generalmente mediante una válvula dosificadora en la base del mismo. Se pueden presentar problemas debido a que el aire que entra a la unidad de potencia puede ser obtenido a través de las fugas en ésta válvula y no del sitio donde se encuentra el material a transportar
- 2) El recipiente de almacenamiento debe ser diseñado para lidiar con el vacío del sistema.
- 3) Debido a que el aire succionado por la unidad de potencia atraviesa el cuerpo de la misma, es importante que se realice un filtrado riguroso de la corriente de gas para evitar daños a la unidad.

Las figuras 8 y 9 representan las configuraciones más comunes para el sistema de transporte neumático por succión, el primero permite transportar desde diversos puntos a un sitio común, el segundo posee una manguera flexible que permite alcanzar lugares complicados y llevar el material hasta un separador.

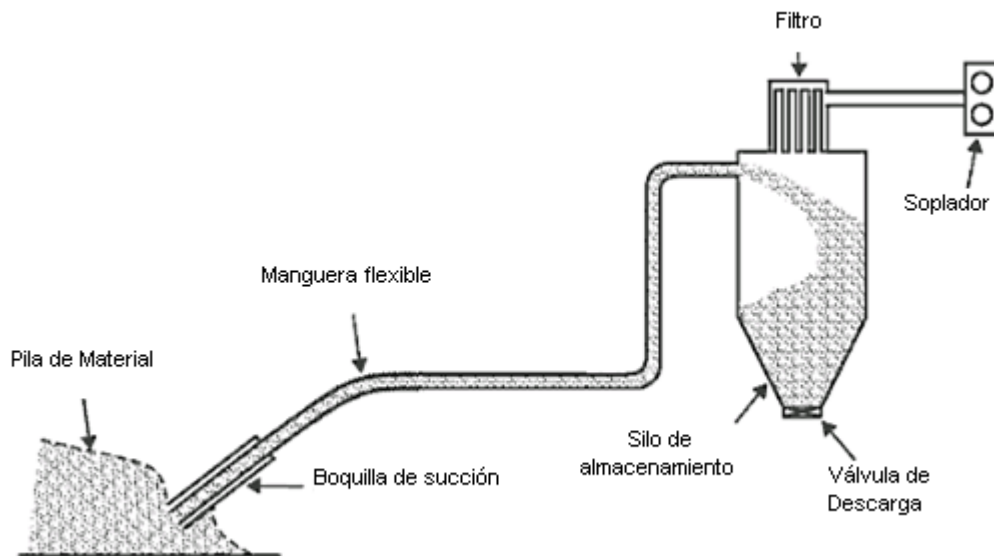


Figura 8. Transporte por succión desde almacenes abiertos

4.2 TRANSPORTADORES POR PRESIÓN

El transporte por presión permite transportar desde un punto a múltiples puntos mediante la adición de válvulas de desvío en la tubería.

En general el material puede ingresar al sistema directamente desde una tolva o recipiente de almacenamiento hacia la tubería de transporte mediante la acción de la presión atmosférica y la fuerza de gravedad, pero comúnmente se utilizan sistemas de dosificación en la base del recipiente para poder controlar la cantidad de material que ingresa al sistema, se debe tener cuidado al utilizar válvulas rotativas como sistemas de dosificación debido a que se pueden presentar fugas de aire considerables a través de ellas.

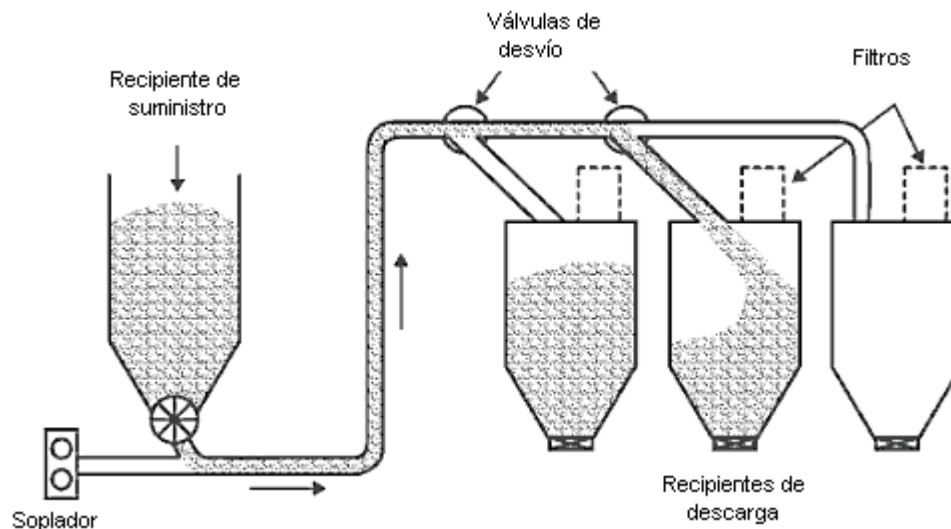


Figura 9. Configuración típica de transporte por presión

4.3 TRANSPORTADORES COMBINADOS

Poseen las características de ambos sistemas, se logra aumentar la distancia de transporte que se lograría si solamente se tuviera el sistema de vacío. Permiten cargar el material desde múltiples fuentes y hacia múltiples destinos.

Pueden funcionar con una sola unidad de potencia pero en éste caso se debe tener en cuenta que la diferencia de presión total del sistema (sección de vacío+ sección de presión) debe ser lograda con el mismo elemento. En el caso de que no sea posible realizar el proceso con una sola unidad, se usan dos, la primera ubicada al final de la etapa de succión y la segunda al inicio de la zona de presión

Se debe poseer un sistema de filtrado al final de cada etapa para evitar daños internos a la unidad propulsora y envío de material a la atmósfera.

Adicionalmente es fundamental que el tamaño de la tubería en cada etapa del proceso sea cuidadosamente escogida debido a que las condiciones de presión y de cantidad de material (cuando se cuenta con dosificación al final de la primera etapa) pueden ser muy diferentes.

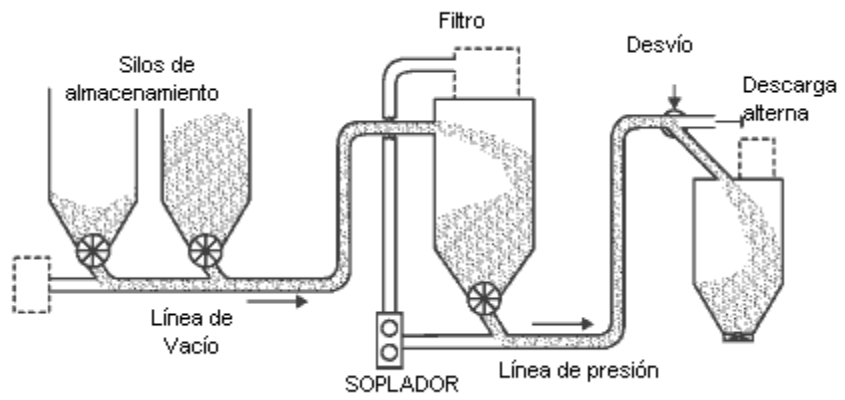


Figura 10. Transportador neumático combinado

5. ELEMENTOS DE UN TRANSPORTADOR NEUMÁTICO

Los transportadores neumáticos son en general bastante simples, poseen pocas partes en movimiento y son ampliamente recomendados para transporte de granos o polvos, sus partes principales son: una fuente de gas comprimido, (generalmente aire) un elemento dosificador de material, una tubería de transporte y un elemento separador de la mezcla solido-fluido, también puede existir un sistema de filtrado, cuando las condiciones lo requieran. De igual forma, si el sistema lo requiere se pueden utilizar válvulas de desvío para cambiar los recorridos del material y sus sitios de carga y descarga.

5.1 FUENTES DE AIRE

5.1.1 GENERALIDADES

La fuente de aire para un transportador neumático es el corazón del sistema. Es a menudo una de las decisiones más importantes a tomar. Se debe ser cuidadoso con la elección cuando se realiza un diseño debido a que por lo general éste elemento es el de mayor costo y la capacidad potencial de transporte depende directamente de éstos elementos, al igual que la mayor parte de la potencia consumida.

Los requerimientos de presión están fuertemente influenciados por la distancia de transporte, para largas distancias a menudo se utilizan varias unidades ubicadas a intervalos en la tubería; de ésta forma se evita tener un equipo único voluminoso y poco rentable cuándo se desea disminuir la cantidad de material.

Los accesorios que posee el sistema son otra fuente importante de caídas de presión. Las válvulas dosificadoras, los codos y las tuberías de diámetro reducido generan un componente importante de los requerimientos de presión que debe suplir la unidad.

Las necesidades de gas dependen fundamentalmente de la cantidad de material a transportar, el diámetro de la tubería y de la relación másica de material y fluido escogida. Un aumento en los parámetros anteriores implica mayores caudales de aire, la unidad debe ser capaz de proveer el volumen de aire requerido para el funcionamiento adecuado del sistema. Existe una gran variedad de unidades de movimiento de aire por lo que se puede satisfacer de manera adecuada prácticamente cualquier necesidad.

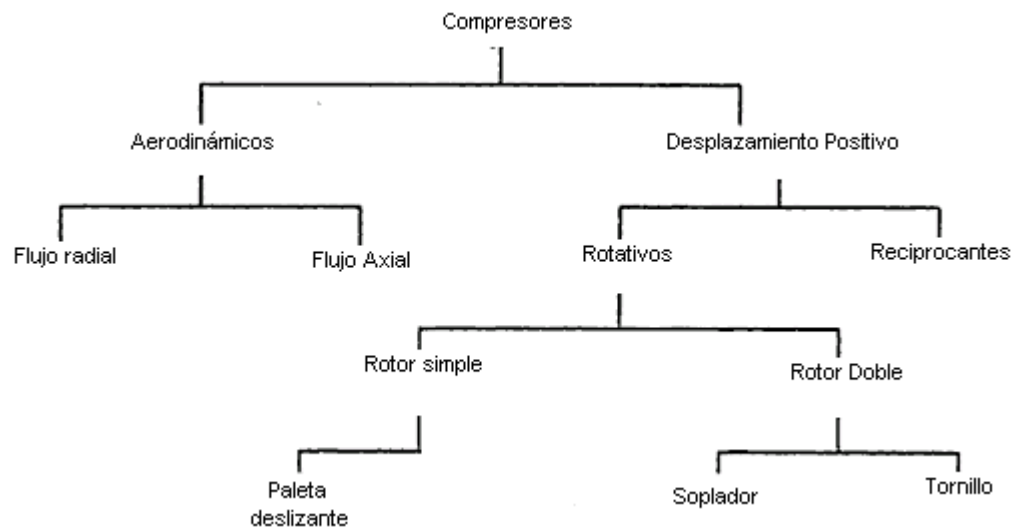


Figura 11. Tipos de unidades de movimiento de aire

5.1.2 TIPOS DE ELEMENTOS SOPLANTES

Los dispositivos más comunes son los ventiladores, sopladores y compresores.

5.1.2.* VENTILADOR

Generan altos caudales de fluido a baja presión, generalmente son usados en sistemas de fase diluida y de poca longitud, su uso se da en sistemas con pocas posibilidades de obstrucción de la tubería. Pueden ser usados en sistemas mixtos de presión y vacío, especialmente con materiales ligeros y con poca adherencia.

El aumento en la tasa de material transportado se puede dar incrementando el diámetro de la tubería, pero esto implica un mayor caudal de aire requerido.

Presenta la desventaja de una curva característica casi plana, que permite una gran variación del caudal entregado debido a los requerimientos de presión del sistema, lo anterior puede generar inconvenientes cuando se presenta acumulación de material y en consecuencia una mayor caída de presión, en éste caso es probable que el flujo de aire suministrado no sea suficiente para mantener suspendido el material y se obstruya la tubería.

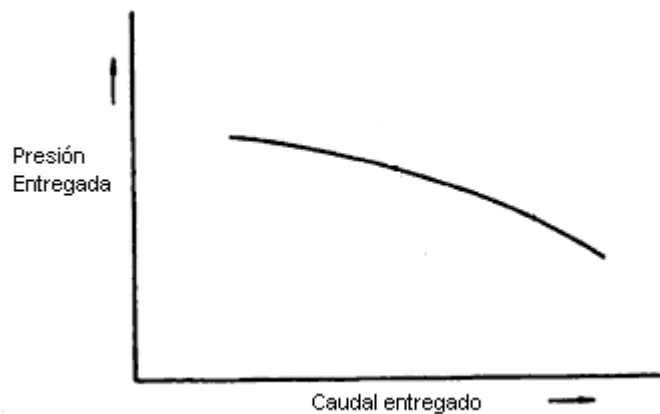


Figura 12. Curva característica de un ventilador

5.1.2.* SOPLADOR

Son usados ampliamente en sistemas con caídas de presión inferiores a 1 bar, son probablemente los equipos más utilizados en sistemas de fase diluida, ya que permiten niveles medios de caudal y presión. Pueden ser utilizados en sistemas mixtos, y su curva característica indica que tienen poca variación en el caudal entregado independientemente de los requerimientos de presión, esto hace que las obstrucciones en la tubería ocasionadas por el material depositado debido a disminución en el caudal de aire son menos probables que con el uso de ventiladores.

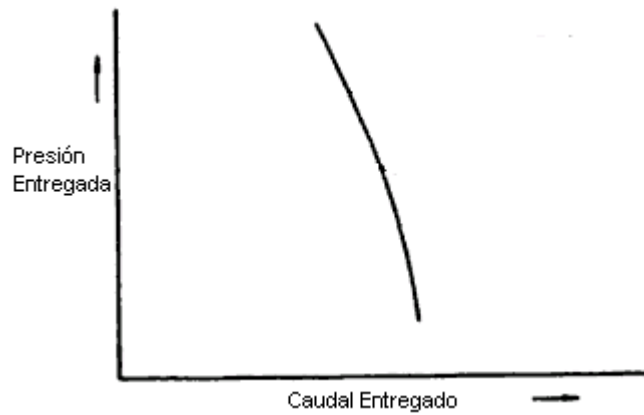


Figura 13. Curva característica de un soplador

5.1.2.* COMPRESOR

Existe gran variedad de equipos de éste tipo, en general permiten tener niveles medios o altos de presión y un caudal elevado de aire (una sola unidad puede generar presiones de 60 PSI o superiores y caudales de 3000 Pies³/min), se utilizan en sistemas de trabajo pesado; puede presentar inconvenientes debido a que en algunos tipos el flujo es altamente pulsante y variable como se muestra en la figura 14.

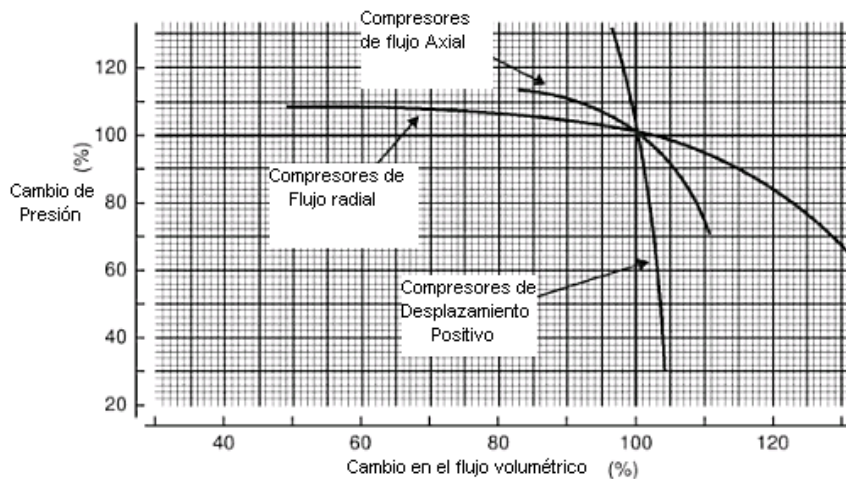


Figura 14. Características de variación de presión y caudal de diversos compresores

5.2 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN DE MATERIAL

5.2.1 GENERALIDADES

En general un dosificador introduce un material prácticamente estacionario a corrientes de gas a alta velocidad, ya sean presurizadas o en vacío. Es el elemento individual que más contribuye con la caída de presión del sistema, esto se debe principalmente a un intercambio de momento del fluido a las partículas junto con una gran cantidad de turbulencia en la mezcla solido-fluido en la zona de alimentación, por ésta razón deben ser cuidadosamente seleccionados buscando minimizar las pérdidas de éste tipo.

Los sistemas de dosificación de material son muy importantes porque permiten controlar la relación másica de material a transportar por un volumen determinado de aire, de ésta forma se puede cambiar la potencia requerida por el transportador o el tipo de transporte, que puede pasar de fase densa a diluida y viceversa.

En sistemas combinados pueden funcionar como separadores entre las etapas del transportador, donde funcionan como sellos o como dosificadores para el empaque del producto transportado al final de la etapa, generalmente se ubican en la base de los separadores o de los elementos de almacenamiento de material.

Dependiendo de la presión de trabajo del sistema se selecciona el sistema de dosificación más conveniente como muestra la tabla 1.

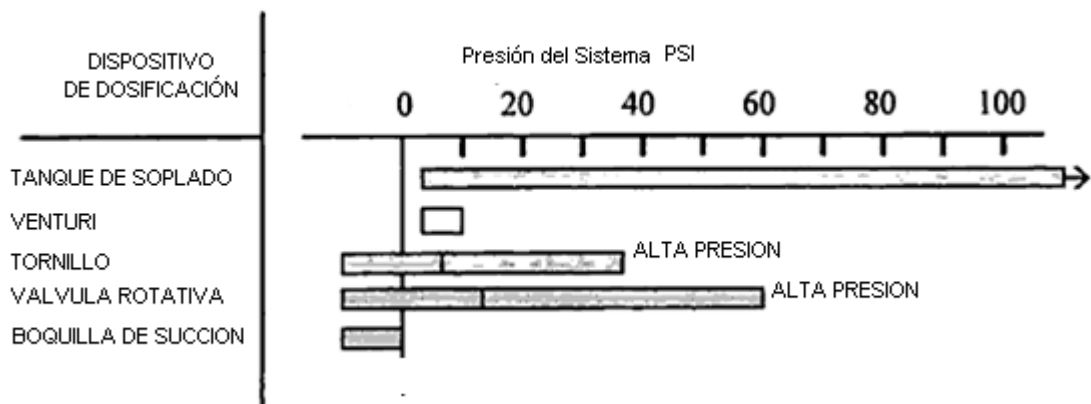


Tabla 1. Presión de trabajo aproximada de diversos dispositivos de dosificación

5.2.2 TIPOS DE DOSIFICADORES

Dependiendo de las necesidades se tienen múltiples opciones de dosificación, de tornillo, válvulas rotativas, venturi, boquillas de succión entre otros.

5.2.2.* VENTURI

Es el sistema más simple, la dosificación se da como consecuencia de la caída de presión provocada por la corriente de aire que al atravesar la garganta del dispositivo crea una zona de presión negativa que permite la entrada del material.

Está limitado a distancias cortas y baja cantidad de material.

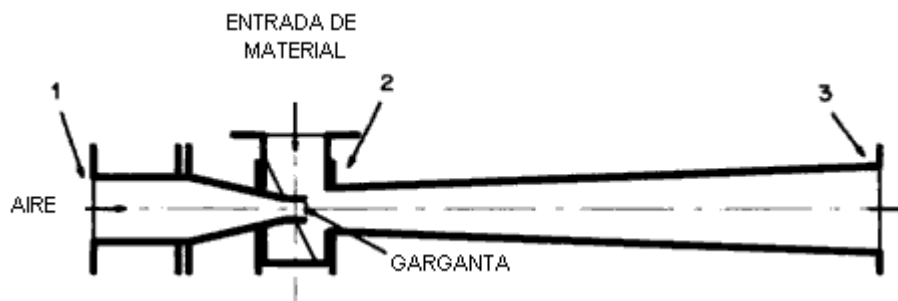


Figura 15. Venturi para dosificación de material

5.2.2.* BOQUILLA DE SUCCIÓN

Mecánicamente es un sistema bastante simple que se usa en sistemas de vacío, consiste de 2 tubos concéntricos, el interno está conectado directamente a la línea de transporte, el externo de un diámetro poco mayor posee la parte inferior abierta y la parte superior cubierta pero con perforaciones que permiten el paso de aire hacia el tubo interno. Mediante el deslizamiento del elemento externo sobre el interno se modifica la forma y la cantidad de material que es transportado.

Debido al suministro de aire a través del espacio entre los tubos se evita el atascamiento de material en la punta de la boquilla, es muy útil en labores de limpieza debido a que permite una gran versatilidad, sobre todo si se monta el tubo externo sobre una tubería flexible.

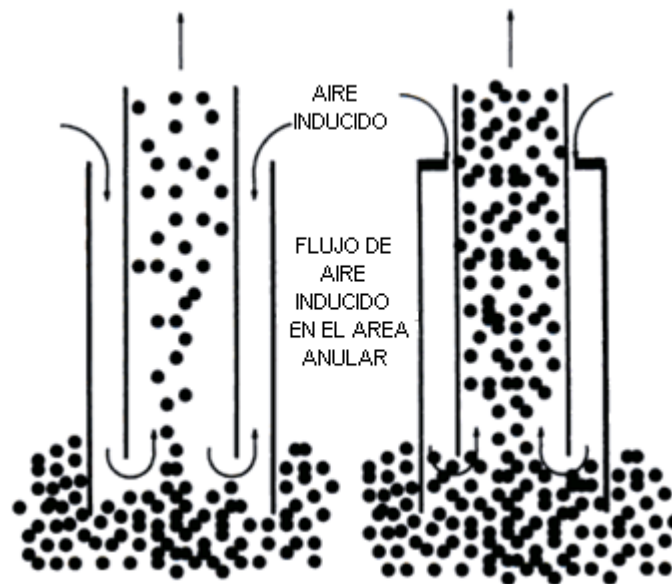


Figura 16. Boquilla de succión

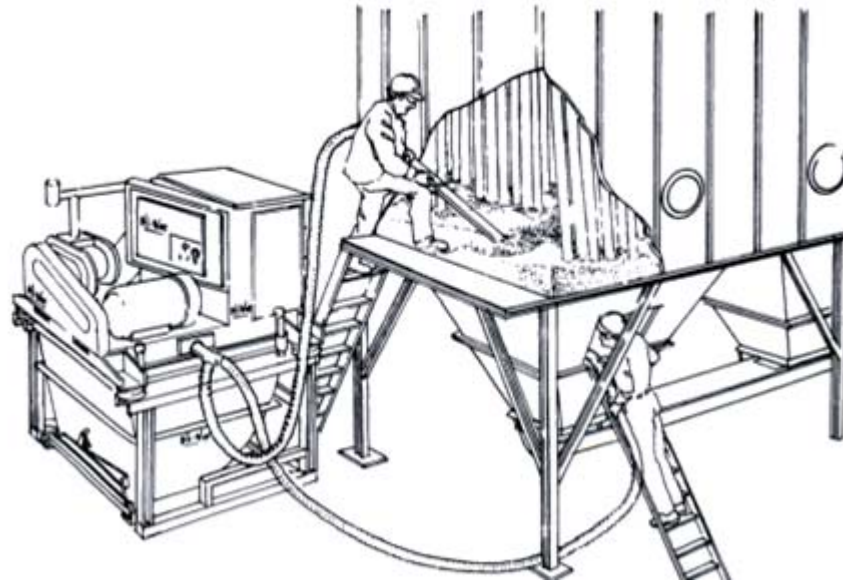


Figura 17. Aplicación de boquilla de succión

5.2.2.* TORNILLO

El dosificador de tornillo puede ser usado en sistemas de presión o vacío. Mediante la rotación de un tornillo logra introducir material en la línea de transporte; un elemento de desplazamiento positivo que logra variar la cantidad de material transportado mediante la variación de su velocidad de rotación.

Puede presentar problemas de fugas de aire a través de su carcasa especialmente en sistemas de presión.

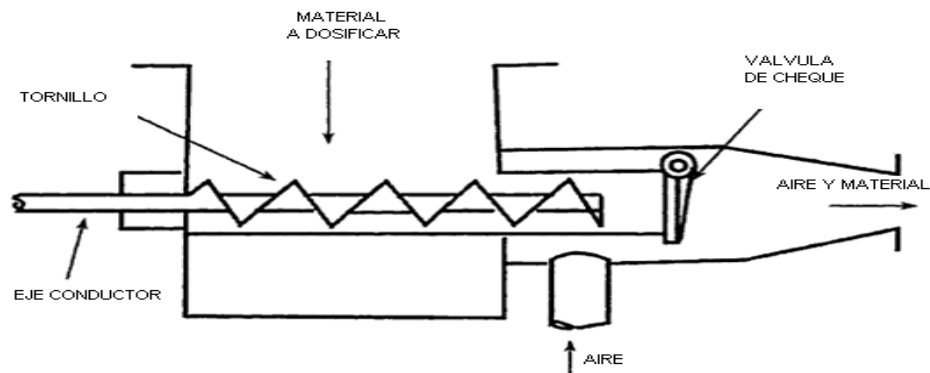


Figura 18. Dosificadora de tornillo

5.2.2.* VALVULA ROTATIVA

Es el elemento de dosificación más utilizado, puede funcionar en sistemas de presión o vacío, en niveles bajos, medios o de alta presión; en muchos casos se utiliza como sello de aire entre las diferentes etapas del transportador.

Está compuesto por un rotor con paletas ubicadas longitudinalmente y que crean espacios o “bolsillos” que al ser llenados por el material y debido a la rotación del eje es depositado en la zona inferior por acción de la fuerza de gravedad. El rotor está encerrado en una carcasa y el material es transportado entre el eje, las paletas y la carcasa; mediante la variación de la velocidad del eje motriz se puede alterar la cantidad de material dosificado en la línea de transporte.

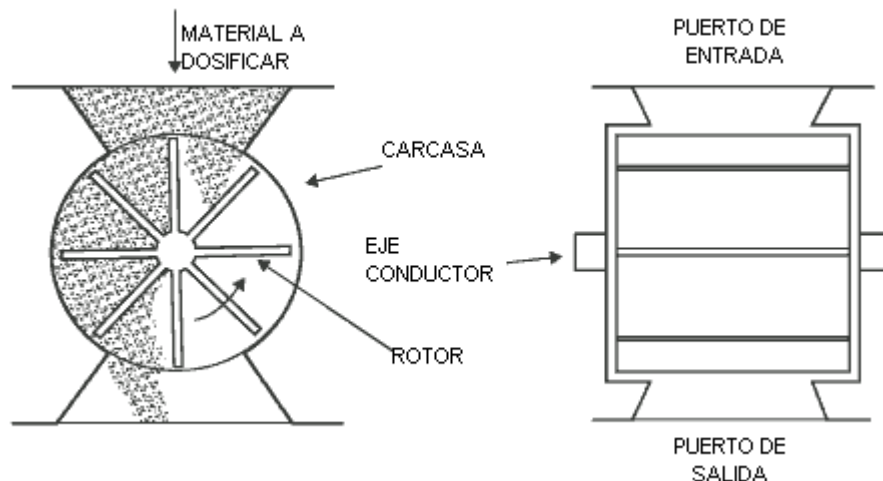


Figura 19. Válvula dosificadora

Debido a los espacios entre las paletas y a la diferencia de presión entre las partes superior e inferior de la válvula se puede generar una corriente de aire ascendente, que puede generar pérdidas considerables de fluido y resuspensión del material, es decir flotación del mismo sin permitir la entrada a la válvula, por ésta razón se puede optar por diseños alternativos que tienen sus puertos de entrada y salida desalineados o perpendiculares las aspás al flujo de material

como se muestra en la figura 20, de ésta forma se busca que sea más difícil el paso de aire; también se puede dirigir el aire que entra hacia lugares externos y que no impidan el llenado como se muestra en la figura 21.

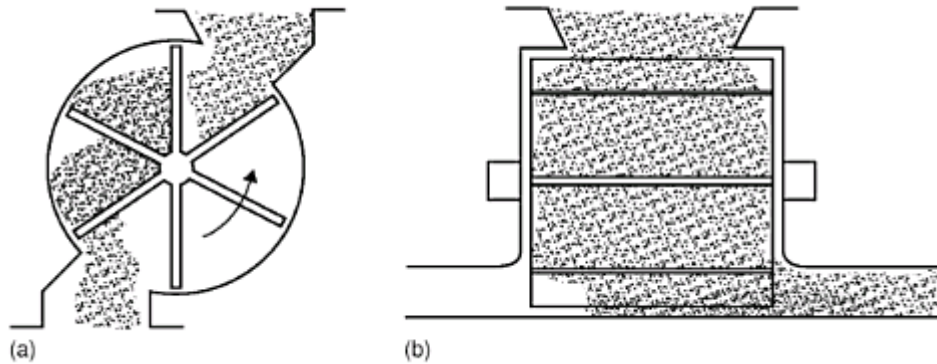


Figura 20. Diseños alternativos de válvulas rotativas. a) Puertos desalineados

b) Aspas perpendiculares al flujo

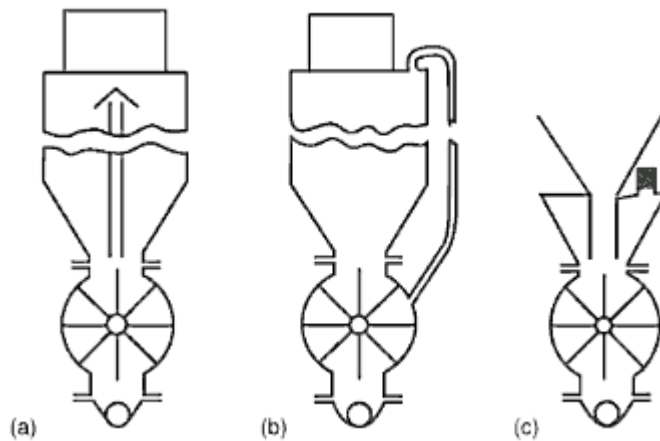


Figura 21. Opciones de ventear válvulas rotativas. a) A través del ciclón. b) Por la carcasa y dirigida a la salida de aire del ciclón. c) Por el puerto de entrada.

Con las válvulas rotativas se debe prestar atención al tiempo de llenado de los bolsillos, ya que éste puede ser bastante pequeño si se tiene en cuenta que éstos dispositivos tienen una velocidad de rotación entre 20 y 60 revoluciones por minuto, si el número de paletas es muy grande es probable que no se tenga un llenado adecuado, pues el material no tendrá tiempo de fluir ni hacia el interior ni hacia el exterior, la figura 22 muestra la relación entre la cantidad de material dosificado y las revoluciones de la válvula.

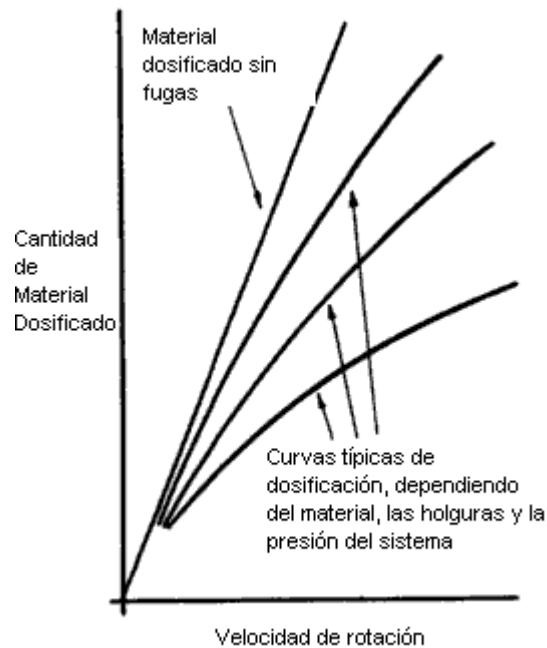


Figura 22. Relación entre cantidad de material y revoluciones de la válvula rotativa

5.3 VALVULAS DE DESVÍO

Las válvulas de desvío son elementos mecánicos que se encargan de cambiar la trayectoria del material transportado en la corriente de gas mediante la alineación de la tubería de entrada con diversos puertos como lo muestra la figura 23

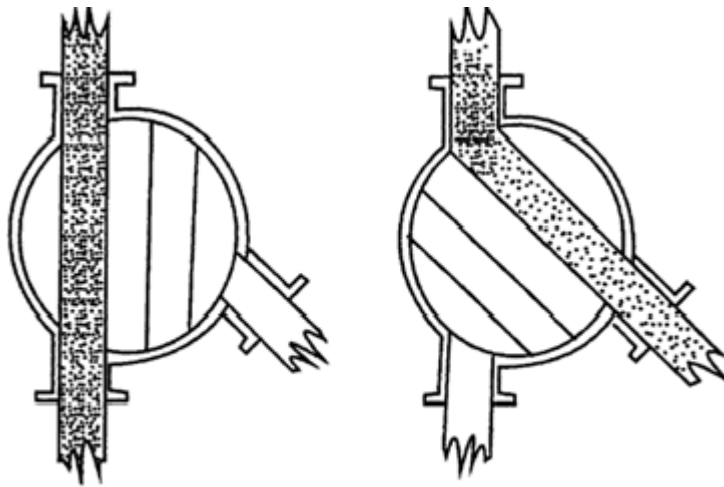


Figura 23. Válvula de desvío

Existen múltiples configuraciones de válvulas de desvío, existen diseños con accionamiento manual o automático, normalmente con elementos neumáticos, éste tipo de válvulas permiten la carga y descarga de material desde y hacia distintos recipientes de almacenamiento.

Permiten también la automatización del proceso de transporte si poseen accionamiento mecánico. Las válvulas de desvío son uno de los componentes mecánicos que le brindan mayor versatilidad a un transportador neumático, pues permiten cambios de dirección progresivos, sin generar las caídas de presión elevadas que un codo estándar puede presentar y a diferencia de éstos puede rotar sobre su eje para brindar rutas alternas.

5.4 SEPARADORES CICLÓNICOS

Los separadores ciclónicos (a menudo llamados simplemente ciclones) son equipos utilizados para realizar la separación de material sólido que se encuentra suspendido en una corriente de gas, son altamente efectivos especialmente con partículas mayores a 10 micrómetros, aunque existen diseños especiales que pueden desempeñarse satisfactoriamente con

partículas de hasta 200 micrómetros; también pueden ser usados con niebla, es decir pequeñas cantidades de agua en una corriente de gas.

Sus aplicaciones típicas son el control de la contaminación del aire ocasionado por diversas fuentes como plantas de generación de electricidad a base de combustibles fósiles, hornos, incineradores y aplicaciones agroindustriales en general.

Constituyen uno de los métodos de separación más económicos, no cuentan con partes móviles y los materiales para su construcción pueden ser bastante económicos.

5.4.1 GENERALIDADES

Un ciclón está formado básicamente por un cilindro vertical con fondo cónico, una entrada tangencial normalmente cuadrada, un ducto en la parte superior que se encarga de retirar el aire limpio y otro inferior que extrae el material sólido previamente separado.

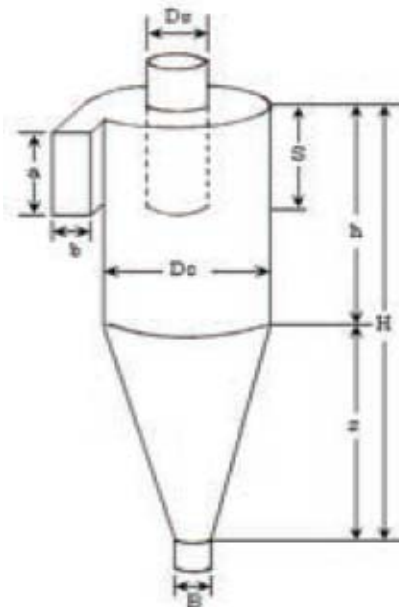


Figura 24. Geometría del separador ciclónico

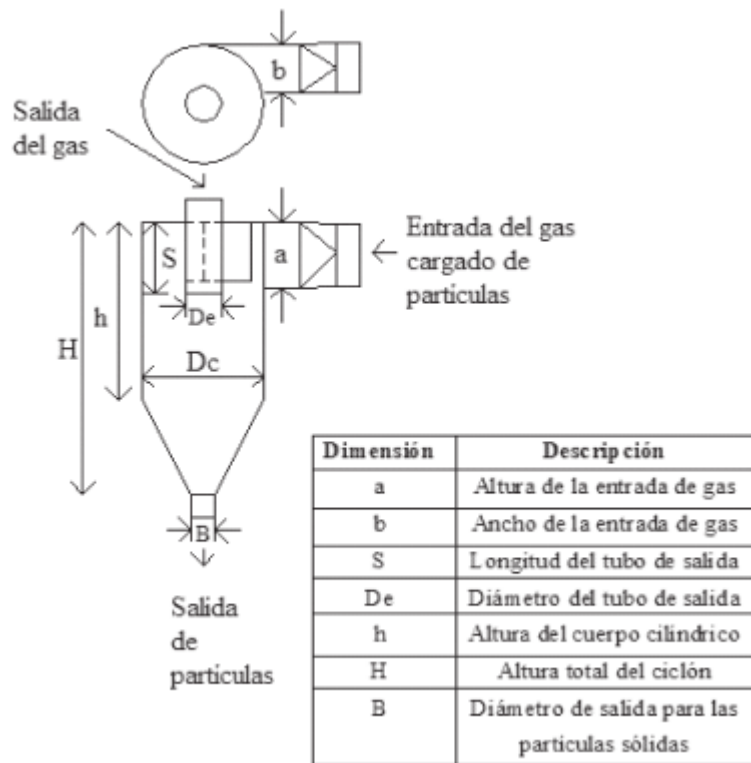


Figura 25. Definición de parámetros geométricos del separador ciclónico

Su principio de funcionamiento es el de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga; las partículas sólidas viajan en la corriente de gas y entran tangencialmente al ciclón, donde chocan con las paredes del mismo, por ésta razón se recomienda un puerto de entrada cuadrado y que sea más alto que ancho, de ésta forma se garantiza un incremento en la superficie tangencial, esto brinda una mayor eficiencia de separación.

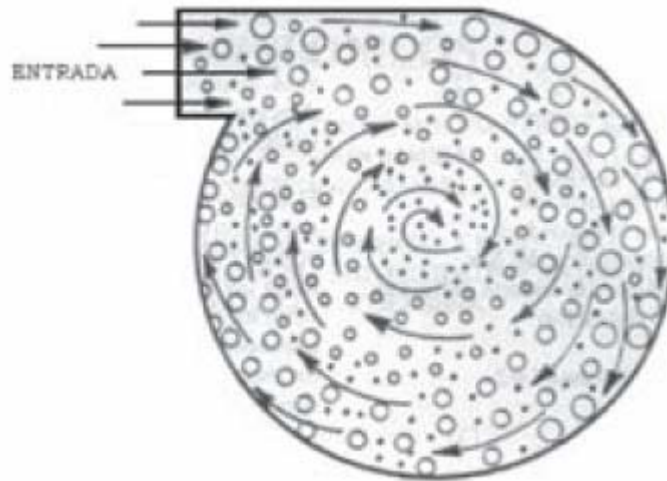


Figura 26. Principio de funcionamiento de un separador ciclónico
(Impactación inercial)

Luego de que la mezcla gas-sólido entra al ciclón se presenta un doble vórtice, uno exterior formado por la corriente de gas que entra al ciclón, las partículas sólidas, debido a su inercia tienden a moverse hacia la periferia del equipo alejándose de la entrada del gas y acumulándose en la base cónica. El segundo vórtice es creado por el gas luego de que alcanza la base del ciclón para luego ascender por la zona central describiendo una hélice.

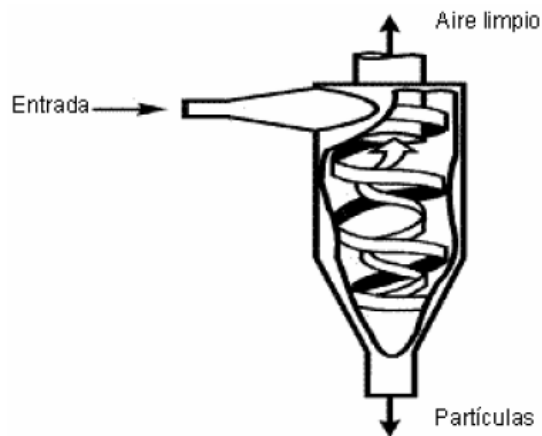


Figura 27. Generación de vórtices de aire y partículas.

Básicamente los ciclones se comportan como cámaras de sedimentación, pero son más eficientes que éstas debido a que no utilizan la fuerza gravitacional para lograr la separación sino la fuerza centrífuga. Debido a que la fuerza centrífuga depende de la velocidad del gas y del radio de giro es posible que ésta fuerza sea mucho mayor que la gravitacional; la mayor parte de la recolección se da en la zona cónica debido a la reducción en el radio de giro.

Se podría pensar que si se aumenta la velocidad de entrada al ciclón se tendría una mayor eficiencia de separación pero esto no es cierto debido a la resustentación del material; cuando la velocidad del gas es demasiado alta es posible que en el fondo del ciclón parte del material sea arrastrado por el vórtice interno que sale del ciclón; esto entorpece la separación y salida de material por la parte inferior del ciclón, en general se recomienda que la velocidad de entrada debe estar entre 15,2 m/s y 27,4 m/s, se recomienda diseñar para velocidades de 22 m/s. El incremento de la velocidad por encima de los valores recomendados implica un mayor gasto de energía ocasionado por una caída de presión más alta y una eficiencia de recolección menor.

Aunque un cambio en las condiciones de operación genera una variación en la eficiencia del ciclón, el factor que más influye es el diámetro del mismo. Un ciclón de diámetro más pequeño a una caída de presión fija es más eficiente, pero a menudo se requiere utilizar varias unidades en paralelo para lograr la capacidad requerida.

5.4.2 FAMILIAS DE SEPARADORES CICLÓNICOS

Los ciclones de entrada tangencial pueden ser clasificados en 3 grandes familias o tipos que tienen características definidas; ciclones de alta eficiencia, ciclones de alta capacidad y ciclones convencionales.

La tabla 2 presenta los valores de eficiencia de separación estándar es decir partículas de un tamaño superior a 10 micrómetros, para partículas de 10 micrómetros y de 2,5 micrómetros para cada familia.

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM10	PM2.5
Convencionales	70 - 90	30 - 90	0 - 40
Alta eficiencia	80 - 99	60 - 95	20 - 70
Alta capacidad	80 - 99	10 - 40	0 - 10

Tabla 2. Eficiencia de remoción de las familias de ciclones

5.4.2.* FAMILIA DE CICLONES DE ALTA EFICIENCIA

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para separar adecuadamente partículas de 5 micrómetros con una eficiencia cercana al 90%. Los diseños de éste tipo presentan caídas de presión grandes, por lo que el consumo de energía es elevado, en general éstos equipos se diseñan teniendo en cuenta la caída de presión máxima permisible.

Los parámetros que definen las dimensiones del ciclón para cada tipo de esta familia, están definidos en la tabla 3.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Tabla 3. Características de los ciclones de alta eficiencia

5.4.2.* FAMILIA DE CICLONES DE ALTA CAPACIDAD

Los ciclones de alta capacidad están diseñados para partículas de más de 20 micrómetros aunque es posible que con partículas más pequeñas se presente algún grado de separación.

En la siguiente tabla se encuentra las correlaciones que identifican la geometría y características de la familia de ciclones de alta capacidad, y para cada tipo en esta familia.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón	
		Stairmand	Swift
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.75	0.8
Ancho de entrada	b/Dc	0.375	0.35
Altura de salida	S/Dc	0.875	0.85
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.75	0.75
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.7
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.7
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4
Factor de configuración	G	29.79	30.48
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	7.96
Número de vórtices	N	3.7	3.4

Tabla 4. Características de los ciclones de alta capacidad

5.4.2.* FAMILIA DE CICLONES CONVENCIONALES

Los ciclones convencionales se encuentran en una gran cantidad de tamaños, la entrada al equipo puede ser rectangular o circular. Sirven para la separación de partículas más grandes, la caída de presión no es tan elevada y en general poseen una buena eficiencia de separación para la mayoría de las aplicaciones, de acuerdo a su disposición geométrica se pueden tener las siguientes configuraciones.

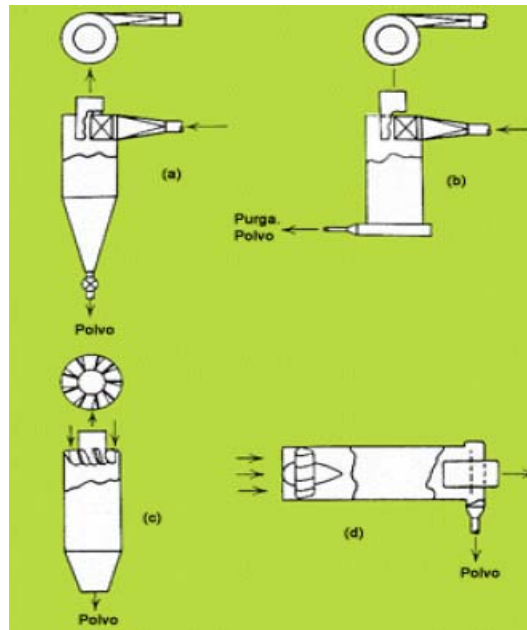


Figura 28. Tipos de ciclones. a) Entrada tangencial y descarga axial; b) Entrada tangencial y descarga periférica; c) Entrada y descargas axiales; d) Entrada axial y descarga periférica

Los parámetros que definen las dimensiones y características de cada tipo de ciclón dentro de la familia convencional están definidos en la siguiente tabla 5.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	b/D_c	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	S/D_c	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	h/D_c	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	z/D_c	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida partículas	B/D_c	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	6.0	5.5	3.9	6.0

Tabla 5. Características de los ciclones convencionales

5.4.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE CICLONES

El comportamiento de los diferentes tipos de ciclones dependen esencialmente de dos variables, la velocidad del gas en la entrada del ciclón y el tamaño de la partícula, a partir de estas dos variables escogemos la familia de ciclones que mejor se adapte a las condiciones de proceso.

En nuestro diseño específico se necesita separar cereales en donde el grano de menor tamaño es de 4480 micrómetros y el de mayor tamaño es de 10030 micrómetros viendo esto y comparando con la tabla 2, es claro que el tipo de partícula a mover entraría en la columna de partícula estándar (PST), que me identifica un tamaño de partícula mayor a 10 micrómetros.

Al tener partículas de gran tamaño los separadores ciclónicos que mejor se comportan para este tipo de material son los de la familia convencional, de esta familia seleccionaremos los ciclones con entrada tangencial y salida axial tipo ZENZ.

Teniendo las correlaciones que me identifican las dimensiones geométricas del ciclón en la tabla 5, diseño el ciclón.

Para el cálculo del diámetro del ciclón se identifican los datos de entrada de diseño: Primero la capacidad de separación deseada, segundo la densidad del gas o vehículo de transporte, tercero la velocidad de entrada del gas en el ciclón que está en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s y cuarto el tamaño de la partícula a separar.

Calculo de las dimensiones del ciclón convencional tipo Zenz:

1. Calculo del caudal de gas que entra al ciclón de forma tangencial (Qg):

$$Mg = \frac{Ms}{\mu} \quad (5.3.3.1)$$

$$Qg = \frac{Mg}{\rho g} \quad (5.3.3.2)$$

Donde: M_s = Flujo másico de material (solido)

μ = Relación de flujo másico entre material y gas

M_g = Flujo másico del gas

ρ_g = Densidad del gas

2. Calculo del área de entrada al ciclón (A_{ec}):

$$A_{ec} = \frac{Qg}{V_{g_{ec}}} \quad (5.3.3.3)$$

Donde: $V_{g_{ec}}$ = Velocidad de gas en la entrada del ciclón

3. Calculo del diámetro según correlaciones de la tabla (5):

$$A_{ec} = a * b \quad (5.3.3.4)$$

$$a = 0.5 * D_c \quad (5.3.3.5)$$

$$b = 0.25 * D_c \quad (5.3.3.6)$$

$$A_{ec} = a * b = (0.5 * D_c) * (0.25 * D_c) \quad (5.3.3.7)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{A_{ec}}{0.5 * 0.25}} \quad (5.3.3.8)$$

4. Calculo de las demás dimensiones del ciclón:

- Altura de entrada al ciclón (a): $a = 0.5 * D_c$ (5.3.3.9)
- Ancho de entrada al ciclón (b): $b = 0.25 * D_c$ (5.3.3.10)
- Altura de salida del ciclón (S): $S = 0.75 * D_c$ (5.3.3.11)
- Diámetro salida del ciclón (Ds): $D_s = 0.5 * D_c$ (5.3.3.12)

- Altura parte cilíndrica del ciclón (h): $h = 2 * Dc$ (5.3.3.13)
 - Altura total ciclón (H): $H = 4 * Dc$ (5.3.3.14)
 - Altura parte cónica del ciclón (z): $z = 2 * Dc$ (5.3.3.15)
 - Diámetro de salida del polvo (B): $B = 0.5 * Dc$ (5.3.3.16)
5. Calculo de velocidad de saltación, de la misma forma expuesta en la sección 3:

$$V_S = \left[\frac{4 * M_s * 10^{\alpha} * g^{\frac{\beta}{2}} * D_t^{\left(\frac{\beta}{2} - 2\right)}}{\pi * \rho * g} \right]^{\frac{1}{\beta + 1}} \quad (5.3.3.17)$$

Donde: $\alpha = 1440 * D_p + 1.96$

$$\beta = 1100 * D_p + 2.5$$

D_p = Tamaño de la partícula a transportar

g = Aceleración de la gravedad

D_t = Diámetro de tubería

Para conocer si hay o no resuspensión en el ciclón se tiene que cumplir la siguiente condición.

$$\frac{V_{g_{ec}}}{V_S} < 1.35 \quad (5.3.3.18)$$

6. Calculo de la caída de presión en el ciclón ΔP_c :

$$NH = K * \frac{a * b}{D_S^2} \quad (5.3.3.19)$$

Donde: NH = número de cabezas de velocidad (ver tabla (5))

$K = 16$ para ciclones con entrada tangencial

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} * \rho g * V_{g e c}^2 * N H \quad (5.3.3.20)$$

Existen parámetros que permiten evaluar el desempeño adecuado de un ciclón, entre ellos se tiene el diámetro del ciclón, la caída de presión, la relación entre la velocidad de entrada del gas y la velocidad de saltación que me representan si hay o no resustentación en el fondo del ciclón, es decir partículas que permanecen en flotación.

Velocidades de entrada muy bajas permiten la sedimentación de partículas y neutralizan el efecto de la fuerza centrífuga generando disminución en la eficiencia de colección; a velocidades de entrada muy altas pueden resuspender partículas previamente colectadas, disminuyendo también la eficiencia. La experiencia indica que la velocidad de entrada al ciclón debe situarse en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Kalen y Zenz propusieron la existencia de una “velocidad de saltación” en el ciclón para explicar por qué la eficiencia de colección algunas veces descendía con incrementos en la velocidad de entrada. De lo anterior se puede observar que lo ideal es trabajar con velocidades de entrada lo suficientemente altas para aprovechar el efecto de la aceleración centrífuga, sin sobrepasar la velocidad que implica resuspensión del material ya colectado.

Estos parámetros de diseño son una recomendación, más no una imposición en el momento de diseñar.

Parámetro	Valor
Diámetro del ciclón (<i>DC</i>)	< 1.0 m
Caída de presión	< 2488.16 Pa
Relación de velocidades (<i>Vi/Vs</i>)	< 1.35
Velocidad de entrada	15.2 - 27.4 m/s

Tabla 6. Parametros y valores recomendados de diseño para ciclones.

5.4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CICLONES

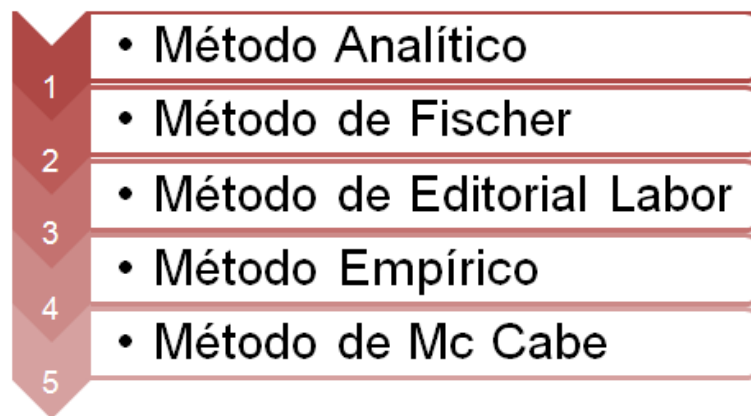


Figura 29. Ventajas y desventajas de los separadores ciclónicos

6. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TUBERÍA

Para la determinación de los fenómenos que se da en la tubería con el flujo de una mezcla de aire y partículas solidas existen diferentes métodos que modelan el comportamiento de la mezcla durante el transporte neumático.

El siguiente esquema muestra los diferentes métodos que se utilizan para la determinación de las condiciones en la tubería.



6.1 MÉTODO ANALÍTICO

El método analítico descompone y distingue todos los componentes que reúne el fenómeno del transporte neumático o flujo de una mezcla de gas – solido. Este método es estrictamente energético, donde se evalúan las pérdidas de energía durante el transporte por un gas de las partículas a través de un ducto.

El siguiente cuadro identifica los modelos matemáticos que se utilizan en el método:

TIPO DE ENERGIA	MATERIAL A TRANSPORTAR	GAS O VEHICULO DE TRANSPORTE
Energía de aceleración para vencer la inercia de los sólidos y ponerlos en movimiento	$\frac{1}{2} * M_s * V_s^2$	$\frac{1}{2} * M_g * V_g^2$
Energía para elevar los sólidos o potencial	$M_s * \rho_s * g * h$	$M_g * \rho_g * g * h$
Energía necesaria para vencer la fricción entre la pared del ducto y la mezcla	$M_s * g * L * f_z$	$\frac{2 * f_g * L * V_g}{D}$
Perdidas de energía por cambios de dirección (accesorios, codos, etc)	$\frac{M_s * V_s^2 * \pi * \left(r + \frac{D}{2}\right) * N * f_i}{2 * g * r}$	$\frac{2 * M_g * f_g * k * V_g^2}{2 * D * g}$

Tabla 7. Ecuaciones del método analítico

Donde: M_s = Flujo másico de material (solido)

V_s = Velocidad del material (solido)

M_g = Flujo másico del gas

V_g = Velocidad del gas

ρ_s = Densidad del material (sólido)

g = Aceleración de la gravedad

h = Diferencia de altura

L = Distancia de transporte

f_z = Coeficiente de fricción entre el material y el ducto

f_g = Coeficiente de fricción entre el gas y el ducto

D = Diámetro de tubería

r = Radio de curvatura del codo

N = Número de codos

k = Constante que depende de las características físicas del accesorio

6.2 MÉTODO DE FISCHER

El método de Fischer es característico por ser muy conservativo ya que sobre diseña el sistema resultante tomando parámetros con valores relativamente elevados para asegurarse de prevenir cualquier obstrucción o interferencia en el flujo.

Este método utiliza cuatro tipos de energía las cuales son, energía pérdida en codos y accesorios, energía consumida por el transporte horizontal, energía consumida por el transporte vertical, la energía de aceleración y la energía consumida por el flujo de gas identificada por las siguientes ecuaciones. La siguiente tabla me determina los valores de las pérdidas de energía mediante ecuaciones:

Energía de aceleración	$Ea = Ms * \frac{Vs^2}{2}$
Energía consumida por el transporte horizontal	$Eth = Ms * g * L * fz$
Energía consumida por el transporte vertical	$Etv = Ms * g * h$
Energía perdida en codos y accesorios	$Ec = Ms * Vs^2 * \theta * fz * N$
Energía consumida por el aire	$Eg = \frac{\rho g * Vg^2 * fg * LT * Qg}{2 * D}$
Energía total consumida	$ET = Ea + Eth + Etv + Ec + Eg$

Tabla 8. Ecuaciones del metodo de Fischer

Donde: Ms = Flujo másico de material (solido)

Vs = Velocidad del material (solido)

Mg = Flujo másico del gas

Vg = Velocidad del gas

ρs = Densidad del material (solido)

g = Aceleración de la gravedad

h = Distancia vertical de transporte

L = Distancia de horizontal de transporte

LT = Longitud total de transporte

fz = Coeficiente de fricción entre el material y el ducto

fg = Coeficiente de fricción entre el gas y el ducto

D = Diámetro de tubería

θ = Angulo de curvatura

N = Numero de codos

Qg = Caudal de gas

6.3 MÉTODO DE EDITORIAL LABOR

Este método de Editorial Labor calcula la caída de presión por carga para que mediante algunas correcciones con factores sugeridos en tablas y graficas podremos hallar un diámetro de tubería.

En este método los datos de entrada para el cálculo y diseño son la densidad del material, la longitud total de la tubería o de transporte, capacidad de transporte, numero de codos y longitud vertical de transporte

Conociendo el material a transportar y sus características (Anexo A) encontramos la velocidad mínima de transporte. Teniendo en cuenta la relación másica deseada se calcula la densidad de la mezcla.

Para el cálculo del diámetro aproximado de tubería multiplicamos la velocidad mínima de transporte por un factor de seguridad de 1.5; Teniendo estos valores hallamos el diámetro mediante la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{Ms}{15 \cdot \pi \cdot \rho m \cdot V}} \quad (6.3.1)$$

Con el diámetro calculado se estandariza, y se recalculan la densidad de la mezcla y la velocidad.

$$\rho m^* \cdot V^* = \frac{Ms}{15 \cdot \pi \cdot Dn^2} \quad (6.3.2)$$

El valor de la densidad de la mezcla recalculado deberá ser:

$$\rho m^* = \frac{\rho m^* \cdot V^*}{20} \quad (6.3.3)$$

Calculo de las pérdidas de presión de carga:

$$\Delta P = \rho m^* \cdot \left(\frac{V^{*2}}{2.9} \cdot \left(2.5 + f3 \cdot N + \left(L \cdot f2 / Dn \right) \right) + H \right) \quad (6.3.4)$$

Donde: Ms = Flujo másico de material (solido)

V = Velocidad mínima de transporte (Ver Anexo A)

ρm = Densidad de la mezcla

D = Diámetro de tubería

ρm^* = Densidad de la mezcla corregida

V^* = Velocidad mínima de transporte corregida

Dn = Diámetro de tubería estandarizado

L = Distancia total de transporte

$f2$ = Coeficiente de fricción del gas con respecto al material

f_3 = Factor de rozamiento en codos

N = Numero de codos

H = Distancia vertical de transporte

6.4 MÉTODO EMPÍRICO

Es el método más usado en el diseño de sistemas neumáticos en la industria. Se tienen en cuenta los fundamentos teóricos expuestos por M. Gasterstadt.

Este método en general es la sumatoria de las pérdidas de presión por transporte horizontal, perdidas de presión por transporte vertical, perdidas de presión en codos, perdidas de presión en ciclones y perdidas por aceleraciones.

Perdidas por fricción en el transporte horizontal	$\frac{\left(\frac{\mu}{K} + 1\right) * Lh * \Delta P}{100}$
Perdidas por fricción en el transporte vertical	$\frac{2 * \left(\frac{\mu}{K} + 1\right) * (Lv + (10 * D * N)) * \Delta P}{100}$
Perdidas en ciclones	Equivale a una cabeza de velocidad por ciclón
Perdidas por aceleraciones	$2.25 * \mu * PV * Na$

Tabla 9. Ecuaciones del metodo Empirico

Donde: μ = Relación másica = M_s/M_g

M_s = Flujo másico de material (solido)

M_g = Flujo másico del gas

Lh = Distancia total horizontal

ΔP = Caída de presión en 100 pies de tubería

Lv = Distancia total vertical

D = Diámetro de tubería

N = Numero de codos

PV = Presión de velocidad

Na = Número de aceleraciones

6.5 MÉTODO DE Mc CABE

Este método parte de la presión en la entrada del equipo que en un principio es un dato desconocido, pero que se puede evaluar utilizando cualquiera de los métodos anteriormente nombrados, este método utilizara los siguientes datos de entrada para el desarrollo del mismo: Temperatura del aire, diámetro de tubería, velocidad de salida del aire, diámetro de la partícula, la relación másica entre material y gas, esta relación es recomendable tomarla por debajo de 10 para transporte diluido o a densidad baja, la densidad del material, la longitud de la tubería de transporte

Procedimiento para evaluar la caída de presión a lo largo de todo el sistema:

1. Se calcula la densidad del aire en la entrada del sistema (ρa):

$$\rho a = 29.492 * \left(\frac{Pa + Patm}{359} \right) * (460 + T) * Patm \left(\frac{lb}{pie^3} \right) \quad (6.5.1)$$

Donde:

Pa = Presión a la entrada del equipo

$Patm$ = Presión atmosférica

T = Temperatura del aire

2. Se calcula el flujo másico o la capacidad de transporte, por unidad de área (G):

$$G = Vb * \rho a \left(\frac{lb}{pie^2 * s} \right) \quad (6.5.2)$$

Donde:

Vb = Velocidad de salida del aire

3. Se calcula el numero de Reynolds (Re) y así hallar el coeficiente de fricción del gas con respecto a las paredes de la tubería

$$Re = \left(\frac{DT * G}{\mu} \right) \quad (6.5.3)$$

Donde:

DT = Diámetro de la tubería

μ = Viscosidad dinámica del gas

Con el número de Reynolds se lee el coeficiente de fricción del gas en tablas.

4. Ahora se supone una densidad de gas media (ρm), debe ser ligeramente inferior a la densidad del gas hallada (ρa) y se calcula una velocidad de gas medio.

$$Vm = \frac{G}{\rho a m} \frac{Pies}{s} \quad (6.5.4)$$

Donde:

Vm = Velocidad de gas media

ρ_{am} =Densidad media del gas

5. Se evalúa la densidad del gas en la salida para comprobar el dato de ρ_{am} calculado anteriormente.

$$\rho_{am} = \left(\frac{(\rho_s - \rho_m) * \rho_m * g * D_p^3}{3 * V_m^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.5.5)$$

Donde:

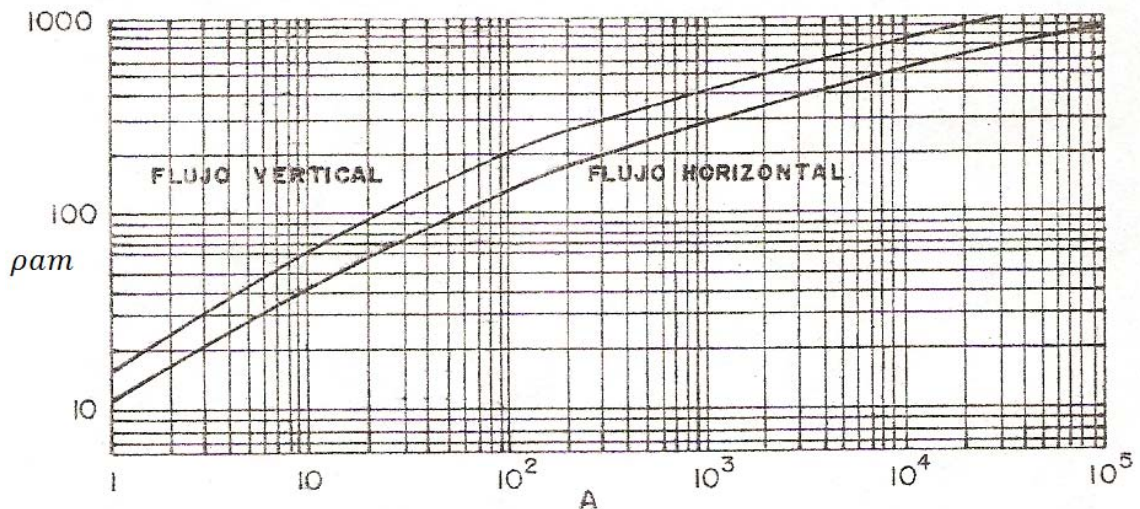
ρ_s =Densidad del material

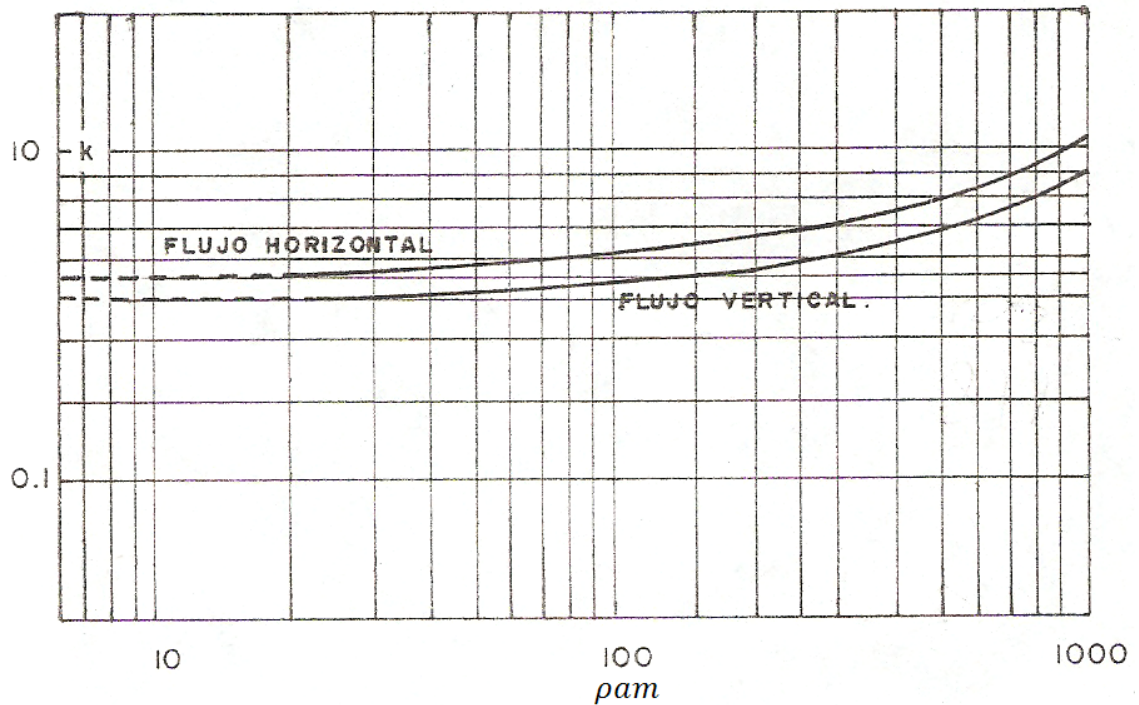
ρ_m =Densidad del gas a la salida

g = Aceleración de la gravedad

D_p = Diámetro de la partícula

6. Teniendo las gráficas para flujo horizontal y vertical se leen los factores de a y k y con estos valores se calcula (B):





$$B = 1 + \left(a * \left(\frac{DT}{Dp} \right)^2 \right) * \left(\frac{Dm * R}{Re * Ds} \right) k \quad (6.5.6)$$

Donde:

R = Relación másica

7. Ahora se evalúa la presión de salida (P_b) con una ecuación de balance general de energía

$$P_b = P_a + \frac{\left[(1 + R) * (Z_b - Z_a) + \left(\left(\frac{R}{29} \right) * (V_b^2 * V_a^2) \right) + ((2 * BFL) * \left(\frac{Vm^2}{g * Dt} \right)) \right]}{\left[\left(\frac{1}{Dm} \right) + \left(\frac{R}{Ds} \right) \right]} \quad (6.5.7)$$

Donde:

V_a = Velocidad de entrada del gas

8. Se calcula una densidad del gas en la salida ρ_{ab}

$$\rho_{ab} = \rho_{aa} * \left(\frac{P_b}{P_a + P_m} \right) \quad (6.5.8)$$

$$\rho_{amr} = \frac{(\rho_{aa} + \rho_{ab})}{2} \quad (6.5.9)$$

Ahora se compara el valor de ρ_{am} supuesto con el valor hallado de ρ_{amr} , estos valores tienen que dar muy cercanos y si no se toma el promedio de los dos y se sigue iterando hasta conseguir una buena aproximación entre los dos valores y ya con la densidad media del gas se puede calcular la caída de presión para el sistema.

7. MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

Debido a la complejidad de los procesos presentes en el transporte neumático, una aproximación teórica que lo modele debe contener gran cantidad de variables y requiere la aplicación de una amplia variedad de conceptos físicos para lograr una aproximación aceptable al fenómeno.

A continuación presentaremos un conjunto de ecuaciones que pretenden dar una comprensión general del transporte neumático. Con la adecuada utilización de las mismas lograremos determinar la caída de presión ocasionada por el transporte de material.

A diferencia de la mayor parte de los métodos usados para el cálculo de condiciones de tubería, el que presentaremos a continuación pretende dar explicación matemática a los procesos, sin recurrir a ecuaciones empíricas, lo que hace mucho más generales los resultados obtenidos.

El modelo no discrimina entre transporte en fase densa y fase diluida de una forma directa, pero mediante el cambio de la relación másica de sólido y aire se puede obtener soluciones igualmente válidas para los dos tipos de transporte. Permite también determinar las caídas de presión en el sistema independientemente de si se tiene transporte en presión o vacío (succión), lo anterior lo convierte en una de las formas más completas para determinar las caídas de presión en tuberías horizontales, verticales o inclinadas.

El desarrollo de modelo se basa en la utilización simultánea de ecuaciones de:

- 1) Balance de masa
- 2) Balance de momentum
- 3) Balance de energía.

La figura 30 presenta un diagrama de cuerpo libre para un diferencial de tubería que contiene una corriente de aire transportando partículas sólidas (mezcla). Las fuerzas se descomponen en los ejes X y Y y se hace el balance de momentum para aire y solido.

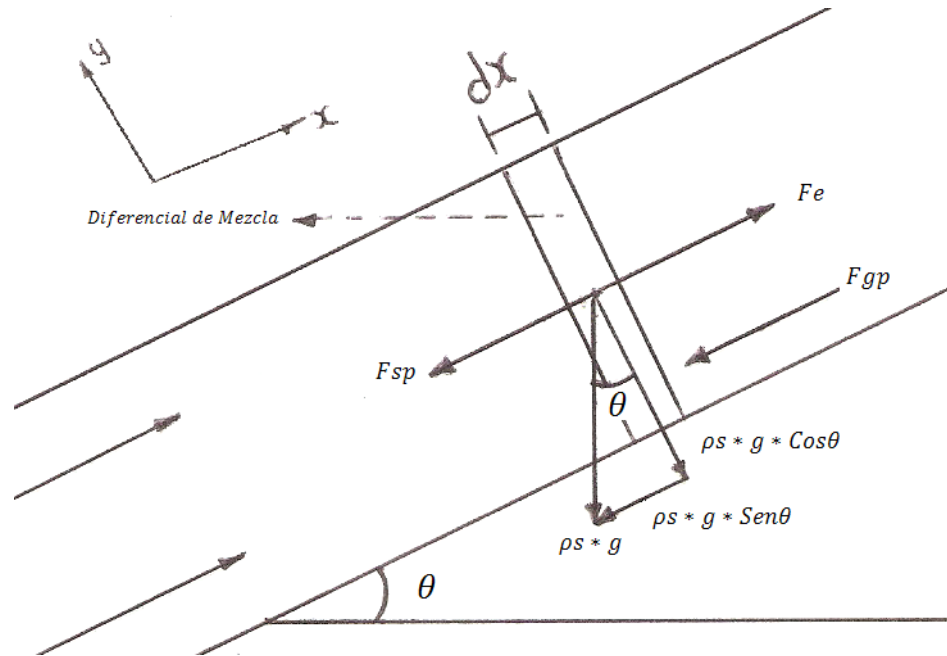


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre de la mezcla sólido-fluido.

Diferencial de mezcla:

Donde: ρ_g = Densidad del gas (aire)

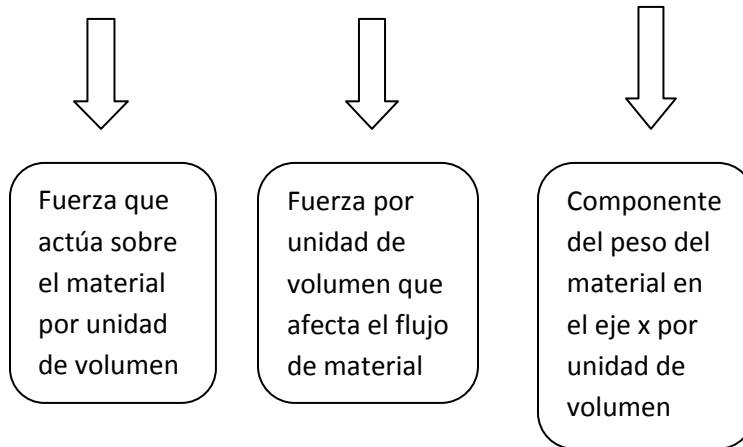
ρ_s = Densidad del solido (cereal)

ε = Porosidad

F_e = Fuerza de empuje de la corriente de gas

1) Ecuación de balance de momentum en el eje x para el material (cereal)

$$\rho_s * \frac{dV_s}{dt} = -\frac{d}{dx} [(1 - \varepsilon) * P] - \rho_s * g * \text{sen}\theta - F_{sp} + F_{gs} \quad (7.1)$$



F_{sp} = Fuerza de interacción entre el material y la pared o superficie de la tubería.

F_{gs} = Fuerza de interacción entre el gas y el material.

g = Aceleración de la gravedad.

2) Ecuación de balance de momentum en el eje x para el gas (aire).

$$\rho_g * \frac{dV_g}{dt} = -\frac{d}{dx} (\varepsilon * p) - \rho_g * g * \text{sen}\theta - F_{gp} - F_{gs} \quad (7.2)$$

F_{gp} = Fuerza de resistencia que ofrece la pared o tubería al flujo de gas.

Donde
$$F_{gp} = \frac{f_g}{D} * \frac{\rho_g}{2} * V_g^2 + F_v \quad (7.3)$$

f_g = Factor de fricción del gas

D = Diámetro de la tubería

V_g = Velocidad del gas

Fv = Fuerza vibracional del material.

Concepto de potencia vibracional:

Debido a que las partículas de material vibran a lo largo del eje Y cambia el perfil de velocidad del aire y éste no se comporta como en un tubo vacío, por lo tanto la fuerza de fricción asociada será diferente.

Donde: $Pv = \rho s * g * \text{Cos}\theta * Vf * \text{Cos}\theta$ (7.4)

Pv = Potencia vibracional ($\frac{W}{m^3}$)

$\rho s * g * \text{Cos}\theta$ = Componente del peso en el eje Y del material

$Vf * \text{Cos}\theta$ = Componente de la velocidad del fluido en el eje Y

$$Pv = Fv * Vg \text{ (7.5)}$$

A partir de (4) y (5) se obtiene

$$Fv = \rho s * g * \frac{Vf}{Vg} * \text{Cos}^2\theta \text{ (7.6)}$$

Donde:

Vf = Velocidad de flotación de la partícula

A continuación se suman los balances de momentum en el eje X (Ecuaciones (1) y (2))

Se obtiene la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned}
\rho_s * \frac{dV_s}{dt} + \rho_g * \frac{dV_g}{dt} \\
= -\frac{dp}{dx} - * \frac{fg}{D} * \frac{\rho_g}{2} * Vg^2 - \rho_s * g * \text{sen}\theta - \rho_g * g * \text{sen}\theta \\
- Fv - Fsp
\end{aligned}$$

(7.7)

En la ecuación (7) se desconocen los factores Fsp y Fv

$$\text{Pero } Fsp = \frac{fz}{D} * \frac{1}{2} * \rho_s * V_s^2 \quad (7.8)$$

Donde: fz = Coeficiente de fricción del material (cereal)

Los siguientes datos se requieren para el funcionamiento del modelo y se pueden encontrar experimentalmente o en tablas, por lo que no se consideran incógnitas en las ecuaciones.

$$fz, fg, \rho_g, \rho_s$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7) se obtiene la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}
\rho_s * \frac{dV_s}{dt} + \rho_g * \frac{dV_g}{dt} \\
= -\frac{dp}{dx} - \frac{fg}{D} * \frac{\rho_g}{2} * Vg^2 - \rho_s * g * \text{sen}\theta - \rho_g * g * \text{sen}\theta \\
- \rho_s * g * \frac{Vf}{Vg} * \text{Cos}^2\theta - \frac{fz}{D} * \frac{1}{2} * \rho_s * V_s^2
\end{aligned}$$

(7.9)

Resolviendo el lado izquierdo de la ecuación (9) y por el concepto de derivadas materiales; se tiene en general que:

$$\frac{dVg}{dt} = \frac{\partial Vg}{\partial t} + Vg \frac{\partial Vg}{\partial x} \quad (7.10)$$

$$\frac{dVs}{dt} = \frac{\partial Vs}{\partial t} + Vs \frac{\partial Vs}{\partial x} \quad (7.11)$$

$$Vg = Vg(x) \quad (7.10a)$$

$$Vs = Vs(x) \quad (7.11a)$$

Si asumimos flujo continuo de aire en la tubería y que éste no varía con el tiempo, sino exclusivamente con la distancia obtenemos:

$$\frac{dVg}{dt} = Vg * \frac{dVg}{dx} \quad (7.12)$$

$$\frac{dVs}{dt} = Vs * \frac{dVs}{dx} \quad (7.13)$$

Luego realizamos un balance de masa para el gas en un tubo de área transversal constante.

$$\rho g * Vg = cte = \dot{m}g \quad (7.14)$$

Donde: $\dot{m}g$ = Flujo másico de gas por unidad de área $\left(\frac{kg}{s \cdot m^2}\right)$

Balance de masa para el material:

$$\rho s * Vs = cte = \mu * \rho g * Vg = \mu * \dot{m}g \quad (7.15)$$

Donde: $\mu = \frac{\dot{m}s}{\dot{m}g}$

Sustituyendo (10) a (15) en (9) se obtiene:

$$-\frac{dp}{dx} = \rho g * Vg \left[\frac{dVg}{dx} + \mu \frac{dVs}{dx} \right] + \frac{fg}{D} * \frac{\rho g}{2} * Vg^2 + \rho g * g * \text{sen}\theta \left[1 + \mu \frac{Vg}{Vs} \right] + \mu * \rho g * \frac{Vg}{Vs} \left[g * \frac{Vf}{Vg} * \text{Cos}^2\theta + \frac{fz}{2*D} * Vs^2 \right] \quad (7.16)$$

Existe una diferencia entre ρg y ρG , el primer término representa la densidad del gas en el proceso de transporte neumático, la densidad nominal del gas (ρG) se ve afectada por la presencia del material mediante la siguiente relación.

$$\rho g = \varepsilon * \rho G$$

Asumiendo flujo másico constante del gas se tiene:

$$\rho G * Vg = cte = \dot{m}G$$

De lo anterior y derivando el producto $\rho G * Vg = cte$

$$\rho G * \frac{dVg}{dx} + Vg \frac{d\rho G}{dx} = \frac{dcte}{dx} = 0$$

$$\rho G * \frac{dVg}{dx} = -Vg \frac{d\rho G}{dx} \quad (7.17)$$

De la ecuación de estado se tiene:

$$PV = nRT$$

$$PV = \frac{m}{M} * RT$$

$$\rho G = \frac{\text{masa de gas}}{\text{Volumen de gas}}$$

$$P = \rho G * \frac{R * T}{M}$$

Donde: P = Presión del gas (Pa)

M = Masa molar del gas (*moles*)

T = Temperatura del gas (k)

n = Número de moles

R = Constante de gas

V = Volumen

Reescribiendo la ecuación (7.17) y usando $\rho G = \frac{P * M}{R * T}$

$$\rho g * \frac{dVg}{dx} = -Vg * \frac{d\rho G}{dx} = -Vg * \frac{d}{dx} \left(\frac{P * M}{R * T} \right) = -Vg * \frac{M}{R * T} * \frac{dP}{dX} = -\frac{\rho G}{P} * Vg * \frac{dP}{dx}$$

(7.18)

$$\frac{dP}{dx} < 0$$

$$\frac{dVg}{dx} > 0$$

Balance de energía para el gas:

Consideramos el proceso isotérmico y adiabático, la temperatura del fluido puede considerarse constante si las velocidades son menores a 30 m/s .

$$h + \frac{1}{2} * Vg^2 = cte \text{ (7.19)}$$

$$h = h(t)$$

$$T \cong cte$$

Donde: $h = \text{Entalpía} \left(\frac{kJ}{kg} \right)$

Teniendo en cuenta que la velocidad del sólido V_s aumenta como una función de x al igual que la V_g (gas), tenemos las siguientes relaciones:

$$\frac{V_g - V_s}{V_{ga} - V_{sa}} = \sqrt{\frac{\rho G a}{\rho G}} = \sqrt{\frac{P a}{P}} \quad (7.20)$$

Donde: $V_{ga} = \text{Velocidad del gas en el estado de referencia} \left(\frac{m}{s} \right)$

$V_{sa} = \text{Velocidad del sólido en el estado de referencia} \left(\frac{m}{s} \right)$

$\rho G a = \text{Densidad del gas en el estado de referencia} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$

$P a = \text{Presión del gas en el estado de referencia} (Pa)$

Nota: El estado de referencia es tomado a presión atmosférica y temperatura ambiente.

Calculo de la velocidad de flotación:

La velocidad de flotación depende de la densidad del sólido y el tamaño de las partículas. Existe dificultad para estimarla con fórmulas matemáticas, ya que depende de la concentración de partículas en la corriente. Una forma más práctica es relacionarla exclusivamente con la densidad.

$$V_f = f(\rho G) = V_{fa} * \sqrt{\frac{\rho G a}{\rho G}} = V_{fa} * \sqrt{\frac{P a}{P}} \quad (7.21)$$

Derivando con respecto a x la ecuación 7.20 se obtiene:

$$\frac{d}{dx}(Vg - Vs) = (Vga - Vsa) * \frac{\sqrt{Pa}}{P}$$

$$\frac{d}{dx}(Vg - Vs) = (Vga - Vsa) * \sqrt{Pa} * \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{\sqrt{P}}\right)$$

$$\frac{d}{dx}(Vg - Vs) = (Vga - Vsa) * \sqrt{Pa} * \left(-\frac{1}{2}\right) * P^{-\frac{3}{2}} * \frac{dP}{dx} \quad (7.22)$$

Combinando las ecuaciones (7.18), (7.20) y (7.22) obtenemos:

$$\frac{(Vg - Vs)}{(Vga - Vsa)} = \sqrt{\frac{Pa}{P}}$$

$$\sqrt{Pa} = \sqrt{P} * \left(\frac{Vg - Vs}{Vga - Vsa}\right)$$

$$\frac{dVg}{dx} - \frac{dVs}{dx} = (Vga - Vsa) * \sqrt{P} * \left(\frac{Vg - Vs}{Vga - Vsa}\right) * \left(-\frac{1}{2}\right) * P^{-\left(\frac{3}{2}\right)} * \frac{dP}{dx}$$

$$\frac{dVg}{dx} - \frac{dVs}{dx} = -\frac{1}{2} * \frac{(Vg - Vs)}{P} * \frac{dP}{dx}$$

Teniendo que: $\frac{dVg}{dx} = -\frac{Vg}{P} * \frac{dP}{dx}$ obtenemos:

$$-\frac{Vg}{P} * \frac{dP}{dx} - \frac{dVs}{dx} = -\frac{1}{2} * \frac{(Vg - Vs)}{P} * \frac{dP}{dx}$$

$$-\frac{dVs}{dx} = \frac{Vg}{P} * \frac{dP}{dx} - \frac{1}{2} * \frac{(Vg - Vs)}{P} * \frac{dP}{dx}$$

$$-\frac{dV_s}{dx} = \frac{1}{P} * \frac{dP}{dx} * \left[V_g - \frac{1}{2} * V_g + \frac{1}{2} V_s \right]$$

$$-\frac{dV_s}{dx} = \frac{1}{P} * \frac{dP}{dx} * \left[\frac{1}{2} * V_g + \frac{1}{2} * V_s \right]$$

Finalmente obtenemos:

$$\frac{dV_s}{dx} = \left(-\frac{1}{2} \right) * \frac{(V_g + V_s)}{P} * \frac{dP}{dx} \quad (7.23)$$

En la ecuación (16) se utilizaron las densidades parciales de gas y sólido ρ_g y ρ_s , para un desarrollo adecuado se debe hablar de porosidad o fracción de vacío ε , dicho término corresponde a los espacios de aire que existen al interior del material, cuando éste no está compactado, depende de la geometría de la partícula a transportar y del tamaño de las mismas, anteriormente se utilizó el término pero no fue definido matemáticamente.

$$\varepsilon = \frac{\rho_g}{\rho_G} \quad (7.24)$$

Recíprocamente

$$(1 - \varepsilon) = \frac{\rho_s}{\rho_S} \quad (7.25)$$

Reescribiendo las ecuaciones de continuidad para las partículas y el gas respectivamente.

Para las partículas:

$$M_s = A * V_s * (1 - \varepsilon) * \rho_S \quad (7.26)$$

Donde: M_s =Flujo másico del sólido $\left(\frac{kg}{s}\right)$

A =Area transversal del ducto transparente (m^2)

Para el gas:

$$Mg = A * Vg * \varepsilon * \rho G \quad (7.27)$$

La relación

$$\mu = \frac{Ms}{Mg} = \frac{Vs*(1-\varepsilon)*P}{Vg*\varepsilon*\rho G} \quad (7.28)$$

μ permite determinar el tipo de transporte, ya sea fase densa o fase diluida, también permite determinar la porosidad de la mezcla sólido-gas, μ es uno de los factores más importantes en el transporte neumático, dependiendo de ésta relación se tendrá mayor o menor capacidad de transporte, también afecta en gran medida la caída de presión a través de la tubería y el caudal de aire requerido, se debe ser cuidadoso con la selección de su valor, pues se puede incurrir en gastos energéticos innecesarios.

Si sustituimos desde la ecuación (7.18) hasta la (7.28) en la ecuación general (7.16) y teniendo que $\rho g = \varepsilon * \rho G$ tenemos que:

$$\begin{aligned} -\frac{dP}{dx} = & \varepsilon * \rho G * Vg * \left[\frac{dVg}{dx} + \mu * \frac{dVs}{dx} \right] + \frac{fg}{D} * \frac{\varepsilon * \rho G}{2} * Vg^2 + \varepsilon * \rho G * g \\ & * \text{sen}\theta \left(1 + \mu * \frac{Vg}{Vs} \right) + \mu * \varepsilon * \rho G * \frac{Vg}{Vs} \left(g * \frac{Vf}{Vg} * \text{Cos}^2\theta + \frac{1}{2} \right. \\ & \left. * \frac{fz}{D} * Vs^2 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{dP}{dx} - \varepsilon * \rho G * Vg * \left[\frac{dVg}{dx} + \mu * \frac{dVs}{dx} \right] \\
= \frac{fg}{D} * \frac{\varepsilon * \rho G}{2} * Vg^2 + \varepsilon * \rho G * g * \text{sen}\theta \left(1 + \mu * \frac{Vg}{Vs} \right) + \mu \\
* \varepsilon * \rho G * \frac{Vg}{Vs} \left(g * \frac{Vf}{Vg} * \text{Cos}^2\theta + \frac{1}{2} * \frac{fz}{D} * Vs^2 \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{dP}{dx} - \varepsilon * \rho G * Vg * \frac{dVg}{dx} - \varepsilon * \rho G * Vg * \mu * \frac{dVs}{dx} \\
= \frac{fg}{D} * \frac{\varepsilon * \rho G}{2} * Vg^2 + \varepsilon * \rho G * g * \text{sen}\theta \left(1 + \mu * \frac{Vg}{Vs} \right) + \mu \\
* \varepsilon * \rho G * \frac{Vg}{Vs} \left(g * \frac{Vf}{Vg} * \text{Cos}^2\theta + \frac{1}{2} * \frac{fz}{D} * Vs^2 \right)
\end{aligned}$$

Y teniendo:

$$\frac{dVg}{dx} = -\frac{Vg}{P} * \frac{dP}{dx} \quad \gamma$$

$$\frac{dVs}{dx} = -\frac{(Vg+Vs)}{2*P} * \frac{dP}{dx}$$

Obtenemos

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dx} * \left[\frac{\varepsilon * \rho G * Vg^2}{P} + \frac{\varepsilon * \rho G * Vg * \mu * (Vg + Vs)}{2 * P} - 1 \right] \\
= \frac{fg}{D} * \frac{\varepsilon * \rho G}{2} * Vg^2 + \varepsilon * \rho G * g * \text{sen}\theta \left(1 + \mu * \frac{Vg}{Vs} \right) + \mu \\
* \varepsilon * \rho G * \frac{Vg}{Vs} \left(g * \frac{Vf}{Vg} * \text{Cos}^2\theta + \frac{1}{2} * \frac{fz}{D} * Vs^2 \right)
\end{aligned}$$

(7.29)

La ecuación (7.29) es finalmente la ecuación general que modela el proceso de transporte neumático en una tubería con un ángulo de inclinación θ , pero en la mayoría de los casos se tienen tuberías que son verticales u horizontales, por lo que la anterior ecuación se puede transformar en:

Para tubería vertical.

$\text{sen}\theta = 1$ y $\text{cos}\theta = 0$ y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \left[-1 + \frac{\varepsilon * \rho G * Vg^2}{P} + \frac{1}{2} * \varepsilon * \rho G * \mu * \frac{Vg * (Vg + Vs)}{P} \right] \frac{dP}{dx} \\ & = \frac{fg}{D} * \frac{\rho g}{2} * Vg^2 + \varepsilon * \rho G * g * \left(1 + \mu * \frac{Vg}{Vs} \right) + \frac{1}{2} * \mu * \varepsilon \\ & * \rho G * \frac{Vg}{Vs} * \frac{fz}{D} * Vs^2 \end{aligned}$$

(7.30)

Para tubería horizontal.

$\text{sen}\theta = 0$ y $\text{cos}\theta = 1$ y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \left[-1 + \frac{\varepsilon * \rho G * Vg^2}{P} + \frac{1}{2} * \varepsilon * \rho G * \mu * \frac{Vg * (Vg + Vs)}{P} \right] \frac{dP}{dx} \\ & = \frac{fg}{D} * \frac{\rho g}{2} * Vg^2 + \mu * \varepsilon * \rho G * \frac{Vg}{Vs} \left(g * \frac{Vf}{Vg} + \frac{1}{2} * \frac{fz}{D} * Vs^2 \right) \end{aligned}$$

(7.31)

Debido a la gran cantidad de parámetros involucrados y la forma característica de la ecuación obtenida, lo más recomendable es utilizar el método de Runge-Kutta para solucionar la ecuación diferencial.

Para realizar un proceso de diseño adecuado y ágil, las ecuaciones anteriores se programaron en Matlab, junto con otras para obtener un procedimiento que

permite calcular condiciones de tubería para transporte neumático, así como geometría y caída de presión en ciclones y tuberías con aire exclusivamente, también brinda la posibilidad de calcular pérdidas en accesorios y la selección del elemento soplante adecuado, junto con la potencia requerida como se muestra en la sección 8 y el anexo D.

8. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA CÁLCULO DE VARIABLES EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO

Para el diseño del sistema de transporte neumático de dos etapas para cereales se utilizó la herramienta computacional MATLAB y su interfase gráfica GUIDE, de esta manera calculamos las diferentes variables en el proceso de transporte para los distintos cereales que se utilizaron en las pruebas.

A continuación daremos un recorrido por el programa de diseño de sistema de transporte neumático para el uso adecuado del mismo.

8.1 MANEJO DEL PROGRAMA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

El programa se ejecuta desde MATLAB, abriendo la carpeta donde se encuentra el programa, abro el archivo (Presentación_Programa.m), al abrir el archivo se ejecutará tecleando F5, en ese momento se abrirá una pantalla inicial de presentación que identifica el nombre del programa y sus autores, el botón continuar dará paso al menú principal del programa.

Presentación del Programa

Diseño de Sistema de Transporte Neumático



*Por: Carlos Eduardo Araque Manrique
Juan Pablo Vega Triana*

CONTINUAR

Figura 31. Presentación del programa de diseño del sistema de transporte neumático

El menú principal cuenta con seis botones identificados, el orden en que se deben ejecutar estos botones será el siguiente:



Figura 32. Menú principal del programa de diseño del sistema de transporte neumático

1. Hacer click en el botón “Diseño Ciclones”.

Este botón abrirá una interfase grafica donde se verán las variables de entrada que se utilizaran para el cálculo de las pérdidas de presión en el ciclón y su respectiva geometría como lo muestra la grafica en la pantalla; estas variables de entrada serán:

- Relación másica
- Capacidad
- Densidad del gas
- Velocidad del gas, que se seleccionara entre las velocidades recomendadas o se podrá ingresar el dato que se desee.

- Diámetro de la partícula, este dato depende exclusivamente del material, en el programa se encuentran algunos cereales donde seleccionando cualquiera de ellos se obtendrá un tamaño de partícula ya tabulado, pero se podrá ingresar el tamaño de partícula, del material que desee en la casilla vacía.

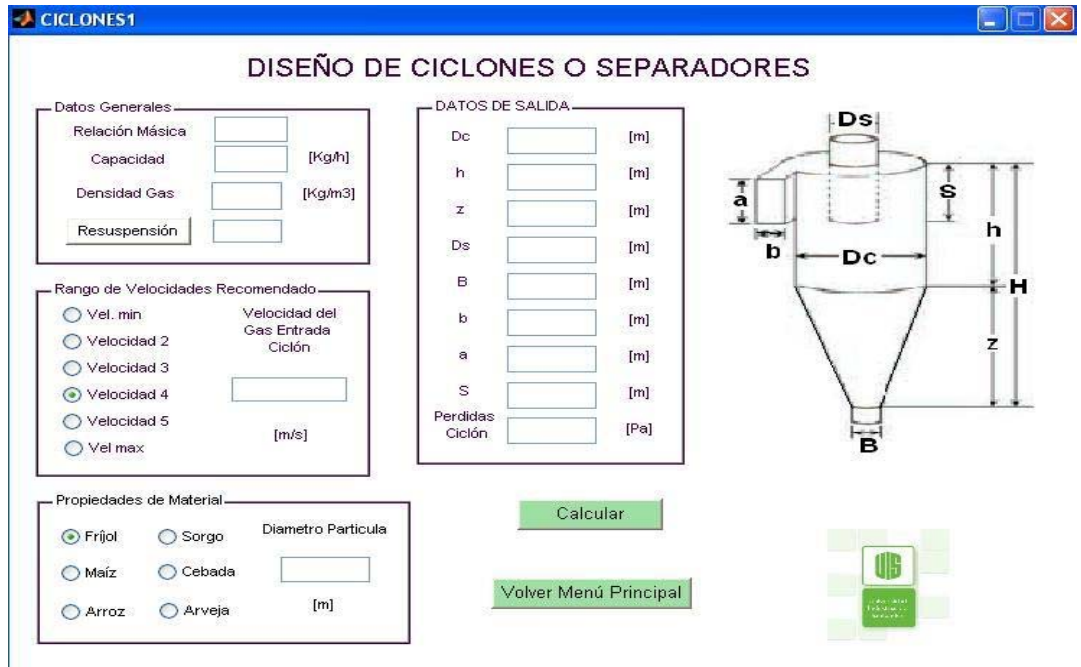


Figura 33. Subprograma de diseño de ciclones o separadores

Luego de tener los datos de entrada me dispongo a ejecutar el botón de “Resuspensión” e inmediatamente el botón de “Calcular” y obtendré el valor de la resuspensión, geometría y las pérdidas de presión en el ciclón.

Para volver al menú principal presiono en el botón “Volver Menú Principal”.

2. Hacer click en el botón “Perdidas Tubería”.

Al ingresar a “Perdidas Tubería” se encuentra con una interfase con seis botones los cuales se ejecutaran en el siguiente orden:



Figura 34. Submenú de diseño de tubería

- Selección diámetro succión
- Pérdidas tubería succión
- Selección diámetro presión
- Pérdidas tubería presión
- Pérdidas totales tubería
- Volver menú principal

Cuando se ingresa al botón “Selección Diámetro Succión” se verá la siguiente interfase grafica:

SELECCIÓN DIÁMETRO SUCCIÓN

Propiedades de Material

Frijol Densidad del material
 Sorgo [Kg/m³]
 Maíz
 Cebada Velocidad Recomendada
 Arroz de Transporte
 Arveja [m/s]

Datos de Entrada

Densidad del Gas [Kg/m³]

Capacidad Transporte [Kg/h]

Díametro Tubería [m]




Figura 35. Subprograma de selección de diámetro

El procedimiento para la selección del diámetro en succión será el siguiente:

Primero: Se selecciona el material que se quiere transportar y se obtendrá un valor de su densidad y su velocidad recomendada de transporte, las casillas también están abiertas para el dato del material que se desee transportar.

Segundo: Se ingresa el dato de la densidad del gas que servirá como vehículo de transporte para el material.

Tercero: Ingresamos el dato de capacidad que será la cantidad de material que quiero transportar.

Cuarto: Ejecutamos el botón “Porosidad”.

Quinto: Suponemos un diámetro de tubería estandarizado.

Sexto: Al ingresar estos datos se calcula la relación másica entre material y gas, presionando “Relación Másica”.

Desde este subprograma se envía directamente al segundo botón del submenú de diseño de tubería Figura 34, ejecutando “Ir a Pérdidas Succión”.

Cuando se ingresa al programa “Pérdidas Tubería Succión” se obtendrá una interfase de la siguiente forma:

Figura 36, Subprograma de pérdidas de presión en la tubería de la etapa de succión

La forma en que los datos deben ser ingresados en esta parte será de la siguiente forma:

Primero: Se elige el material a transportar, que deberá ser el mismo material con el que se ha trabajado durante todo el programa, este me dará los datos de densidad de material, diámetro de partícula y el coeficiente de fricción del material con respecto a la superficie de la tubería, si el material a transportar no se encuentra se podrá ingresar los datos directamente en las casillas.

Segundo: Se digita la capacidad que se desea transportar en succión, el diámetro de tubería en succión y las distancias de transporte tanto horizontal como vertical que se desean en la etapa de succión, todos los datos deberán ser coherentes durante el uso de todo el programa en la etapa de succión.

Tercero: Se ingresa el dato de densidad del gas que será el mismo con el que se ha estado trabajando durante el programa, y su viscosidad dinámica.

Cuarto: Se ejecutaran los botones de la siguiente forma, primero “Porosidad”, segundo “Velocidad de Flotación”, tercero “Velocidad del Gas”, cuarto “Coeficiente Fricción”, quinto “Velocidad del Sólido”, sexto “Pérdidas Tubería Horizontal”, séptimo “Pérdidas Tubería Vertical”, octavo “Pérdidas Tubería Succión Totales”.

Para volver al subprograma de selección de diámetro succión se ejecutara el botón “Volver a Selección Diámetro”, para seguir con el diseño de la tubería se ingresa al submenú de diseño de tubería Figura(X), oprimiendo “Ir a Pérdidas Totales Tubería”.

Ahora se ejecuta el botón “Selección Diámetro Presión” y abrirá una pantalla con una interfase grafica con estas características:

Selección_diametro_presion

SELECCIÓN DIÁMETRO PRESIÓN

Propiedades de Material

<input checked="" type="radio"/> Frijol	Densidad del material	
<input type="radio"/> Sorgo		<input type="text"/> [Kg/m ³]
<input type="radio"/> Maíz		
<input type="radio"/> Cebada	Velocidad Recomendada de Transporte	
<input type="radio"/> Arroz		<input type="text"/> [m/s]
<input type="radio"/> Arveja		

Datos de Entrada

Densidad del Gas	<input type="text"/>	[Kg/m ³]
Capacidad Transporte	<input type="text"/>	[Kg/h]
Porosidad	<input type="text"/>	
Díámetro Tubería	<input type="text"/>	[m]

Relación Másica

Ir a Perdidas Presión




Figura 37. Subprograma de selección de diámetro

Al igual que en la selección del diámetro de succión se realizara el mismo procedimiento para la etapa de presión teniendo en cuenta que el diámetro de tubería puede ser diferente si se desea en la etapa de presión una capacidad de transporte diferente a la de la etapa de succión.

Realizado el procedimiento de selección de diámetro en presión se ejecuta el botón “Ir a Perdidas Presión” y se abrirá la siguiente pantalla.

PERDIDAS TUBERIA PRESIÓN

Propiedades de Material

Frijol
 Sorgo
 Maíz
 Cebada
 Arroz
 Arveja

Densidad del material [Kg/m3]

Díametro de Partícula [m]

Coefficiente Fricción

Velocidad del Sólido [m/s]

Datos Generales

Capacidad de Transporte [Kg/h]

Díametro Tubería [m]

Velocidad de Flotación [m/s]

Porosidad

Distancia Horizontal [m]

Distancia Vertical [m]

Propiedades del Gas

Densidad [Kg/m3]

Viscosidad [N*s/m2]

Velocidad del Gas [m/s]

Coefficiente Fricción

Perdidas Tubería Horizontal [Pa]

Perdidas Tubería Vertical [Pa]

Perdidas Tubería Presión Totales [Pa]

Figura 38. Subprograma de pérdidas de presión en la tubería de la etapa de presión

El procedimiento que se realiza en el cálculo de las pérdidas en la etapa de presión será el mismo que se realizó en la etapa de succión, teniendo en cuenta la coherencia de los datos en la etapa de presión.

Al regresar al submenú de diseño de tubería Figura (X), se ejecuta el botón “Pérdidas Totales Tubería” obteniendo el valor de la suma entre las pérdidas totales en succión y las pérdidas totales en presión, por último ingresamos a “Volver Menú Principal”.

3. Hacer click en “Perdidas Accesorios”.

Este botón muestra una interfase grafica que cuenta con la siguiente apariencia:

PERDIDAS ACCESORIOS

Datos de Entrada

Número Codos

Número válvulas

Densidad Gas [Kg/m³]

Constante Válvulas

Costante Codos

Dímetro Tubería [m]

Velocidad Gas [m/s]

Propiedades de Material

Frijol
 Maíz
 Arroz
 Sorgo
 Cebada
 Arveja

Densidad del material

[Kg/m³]

Densidad Mezcla [Kg/m³]

Perdidas Accesorios Codos [Pa]

Perdidas Accesorios Válvulas [Pa]

Perdidas Totales [Pa]



Figura 39. Subprograma de pérdidas en accesorios

El proceso de ingreso de datos será el siguiente:

Primero: Se digitarán el número de codos que se encuentran durante el trayecto, el número de válvulas, densidad del gas, las constantes de válvulas y codos que dependerán de su geometría y su forma de acople, diámetro de la tubería y la densidad del material escogiendo uno de los cereales que se encuentran en el panel o digitando en la casilla la densidad del material que desee.

Segundo: Se ejecutaran los botones en el siguiente orden:

- Velocidad gas
- Densidad mezcla
- Perdidas accesorios codos

- Pérdidas accesorios válvulas
- Pérdidas totales
- Volver menú principal

4. Hacer click en “Pérdidas solo aire”.

The screenshot shows a software window titled "Perdidas_solo_aire" with a blue title bar. The main content area is titled "Perdidas en la sección de solo aire". On the left, there is a box labeled "Datos de Entrada" containing several input fields: "Número Codos", "Longitud Horizontal [m]", "Longitud Vertical [m]", "Densidad Gas [Kg/m3]", "Viscosidad Gas [N*s/m2]", "Constante Accesorios", "Capacidad Transporte", "Velocidad Gas [m/s]", and "Diámetro Tubería [m]". On the right, there are four buttons with corresponding output fields: "Perdidas Tubería Horizontal [Pa]", "Perdidas Tubería Vertical [Pa]", "Perdidas Codos [Pa]", and "Perdidas Totales [Pa]". Below these buttons is a "Volver Menú Principal" button. A note at the bottom center states: "NOTA: La constante de accesorios se encuentra en tablas dependiendo de sus características, por ejemplo si los accesorios son codos el valor de la constante depende de su ángulo y de como están acoplados." In the bottom right corner, there is a logo for "Universidad Industrial de Santander" with a green square background.

Figura 40. Subprograma de pérdidas en la sección de solo aire

En esta parte del programa se ingresaran los datos de entrada de la siguiente manera, primero el número de codos, la longitud horizontal y vertical de la sección de solo aire, la densidad del gas, la viscosidad dinámica del gas, la constante de accesorios y la capacidad de transporte que se manejo durante la etapa de succión y segundo ejecutar los botones en el siguiente orden: “Velocidad Gas”, “Diámetro Tubería”, “Pérdidas Tubería Horizontal”, “Pérdidas

Tubería Vertical”, “Pérdidas Codos”, “Pérdidas Totales” y “Volver Menú Principal”.

5. Hacer click en “Pérdidas Totales”

Este botón me calculara la suma de todas las pérdidas anteriormente halladas.

6. Hacer click en “Potencia Requerida”

Este botón me dará una potencia requerida para el proceso que se quiere, con esta potencia se podrá escoger el equipo soplante que sirva para manejar la capacidad del proceso a estas condiciones.

9. CÁLCULO Y DISEÑO DEL TRANSPORTADOR NEUMÁTICO DEL MODELO PROPUESTO

El sistema de transporte neumático para cereales de dos etapas fue calculado y diseñado con los siguientes requerimientos.

1. Capacidad de transporte de 200 Kg/h tanto para succión como para presión
2. Distancias de transporte:
 - Longitud horizontal en etapa de succión de 0.25 metros
 - Longitud vertical en etapa de succión de 0.75 metros
 - Longitud horizontal en etapa de presión de 0.64 metros
 - Longitud vertical en etapa de presión de 0.645 metros
3. Propiedades del material a transportar (seis cereales diferentes)
4. Propiedades del gas que servirá de vehículo de transporte (aire)

9.1 DISEÑO DE CICLONES O SEPARADORES

Para el diseño de los separadores ciclónicos el primer paso es la selección de una familia de ciclones y un tipo de ciclón que cumpla con las siguientes características:

- Ciclón de entrada tangencial y salida axial
- Como la partícula de menor tamaño que se va a transportar tiene 1560 micrómetros y la de mayor tamaño tiene 10030 micrómetros Ver Anexo A, el ciclón debe tener un buen comportamiento con partículas de gran tamaño

Para partículas de tamaño mayores a 20 micrómetros los ciclones de la familia convencional son los que mejor se adaptan y comportan, así que de la familia de ciclones convencionales escogemos un ciclón tipo Zenz.

Para el cálculo de las dimensiones del ciclón hallamos un diámetro de ciclón (D_c)

1. Identificación de los datos de entrada

- Capacidad de material a transportar $M_s = 200 \text{ Kg/h}$
- Velocidad de entrada del gas en el ciclón que se recomienda este entre 15.2 m/s y 27.4 m/s ver Anexo A, en nuestro diseño se escogerá la velocidad de gas en la entrada al ciclón de 22 m/s
- Densidad del vehículo de transporte o del gas que en nuestro caso será aire a temperatura ambiente $\rho_G = 1.23 \text{ Kg/m}^3$
- Se supone una relación másica entre material y gas de 10, para tener un transporte en la frontera de fase densa y diluida.
- Se diseña con la partícula de mayor tamaño (diámetro) (Frijol) ya que sería la más crítica de separar eficientemente por el ciclón. $D_p = 0.01003 \text{ m}$ y la que más problemas de resuspensión tendría.

Datos Generales	
Relación Másica	<input type="text" value="10"/>
Capacidad	<input type="text" value="200"/> [Kg/h]
Densidad Gas	<input type="text" value="1.23"/> [Kg/m3]
Resuspensión	<input type="text"/>

Rango de Velocidades Recomendado	
<input type="radio"/> Vel. min	Velocidad del Gas Entrada
<input type="radio"/> Velocidad 2	Ciclón
<input type="radio"/> Velocidad 3	
<input checked="" type="radio"/> Velocidad 4	<input type="text" value="22"/>
<input type="radio"/> Velocidad 5	[m/s]
<input type="radio"/> Vel max	

Propiedades de Material		
<input checked="" type="radio"/> Frijol	<input type="radio"/> Sorgo	Diametro Particula
<input type="radio"/> Maíz	<input type="radio"/> Cebada	<input type="text" value="0.01003"/>
<input type="radio"/> Arroz	<input type="radio"/> Arveja	[m]

Figura 41. Variables de entrada en el subprograma de diseño de ciclones

Teniendo las variables de entrada mostradas en la Figura 41, calculamos la resuspensión, la geometría y las pérdidas de presión en el ciclón, siguiendo las ecuaciones y el proceso que se muestra en la sección (5).

Resuspensión	<input type="text" value="2.66"/>
--------------	-----------------------------------

Figura 42. Resuspensión de material primer cálculo

Con este primer cálculo se puede apreciar que hay resuspensión en la parte inferior del ciclón a estas condiciones específicas.

DATOS DE SALIDA		
Dc	0.040527	[m]
h	0.0810541	[m]
z	0.0810541	[m]
Ds	0.0202635	[m]
B	0.0101318	[m]
b	0.0101318	[m]
a	0.0202635	[m]
S	0.0304715	[m]
Perdidas Ciclón	2381.28	[Pa]

Figura 43. Primer cálculo de geometría y pérdidas de presión en el ciclón

Los resultados muestran un ciclón con dimensiones demasiado pequeñas para la observación de fenómenos dentro de él, así que se recalcula con una capacidad de transporte mucho mayor y así obtener un ciclón de mayores dimensiones para la observación de vórtices de material y gas en las prácticas de laboratorio para lo cual será definitivamente diseñado.

Cambiando la capacidad a separar por $M_s = 2766 \text{ Kg/h}$ se obtendrán los siguientes resultados:

Resuspensión	1.44312
--------------	---------

Figura 44. Resuspensión de material calculo definitivo

Recalculando con la nueva capacidad de transporte obtenemos una menor resuspensión pero sin embargo sigue existiendo, en la sección 9.4 se dará solución para la resuspensión del material en el ciclón.

DATOS DE SALIDA		
Dc	0.150715	[m]
h	0.30143	[m]
z	0.30143	[m]
Ds	0.0753574	[m]
B	0.0376787	[m]
b	0.0376787	[m]
a	0.0753574	[m]
S	0.113319	[m]
Perdidas Ciclón	2381.28	[Pa]

Figura 45. Calculo definitivo de la geometría del ciclón.

Recalculando las dimensiones del ciclón obtenemos unas dimensiones más aptas para la observación de fenómenos durante las prácticas de laboratorio.

9.2 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE TUBERÍA

Para la determinación del diámetro de tubería tanto en la etapa de succión como la de presión se tendrán los siguientes datos de entrada:

- Capacidad a transportar $M_s = 200$ kg/h
- Velocidad del gas que será la velocidad recomendada de transporte para cada material Ver Anexo A
- Densidad del material ver Anexo A
- Densidad del gas que en este caso será aire a temperatura ambiente

$$\rho_g = 1.23 \text{ Kg/m}^3.$$

La porosidad también será un dato adimensional de entrada implícito que se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon = (\rho_s) / (\rho_s + (\frac{\rho_g}{\rho_s})) \quad (8.2.1)$$

Donde: ε = Porosidad

ρ_s = Densidad del sólido (material)

ρ_g = Densidad del gas (aire)

Para los cálculos se utilizará el grano más pesado y de mayor tamaño (frijol), la siguiente figura muestra los datos de entrada al programa:

Propiedades de Material		
<input checked="" type="radio"/> Frijol	Densidad del material	
<input type="radio"/> Sorgo	<input type="text" value="760"/>	[Kg/m ³]
<input type="radio"/> Maíz		
<input type="radio"/> Cebada	Velocidad Recomendada de Transporte	
<input type="radio"/> Arroz	<input type="text" value="25.92"/>	[m/s]
<input type="radio"/> Arveja		

Datos de Entrada		
Densidad del Gas	<input type="text" value="1.23"/>	[Kg/m ³]
Capacidad Transporte	<input type="text" value="200"/>	[Kg/h]
Porosidad	<input type="text" value="0.99"/>	

Figura 46. Datos de entrada y cálculo de porosidad con el material más pesado y de mayor tamaño.

La porosidad tan alta refleja que tendrá que dar un transporte muy diluido es decir una relación másica muy baja.

9.2.1 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE TUBERÍA EN ETAPA DE SUCCIÓN

Para el cálculo de una relación másica diluida, suponemos un diámetro, luego se calcula una relación másica para posteriormente hallar las pérdidas en la tubería que se espera, den pérdidas pequeñas.

Suponiendo un diámetro de succión $D_{ts} = 0.0254$ m, es decir un diámetro de 1 pulg, calculamos la relación másica de la siguiente forma:

Primero: Se calcula el flujo másico de material en Kg/s

$$\dot{m}_s = M_{ss}/3600 \quad (8.2.1.1)$$

Donde: M_{ss} = Flujo másico de material en succión Kg/h

\dot{m}_s = Flujo masico de material en succión Kg/s

Segundo: Se calcula el área de la tubería en succión con el diámetro supuesto inicialmente:

$$A_{ts} = \left(\frac{\pi * D_{ts}^2}{4} \right) \quad (8.2.1.2)$$

Donde: A_{ts} = Área transversal de la tubería en succión m^2

D_{ts} = Diámetro supuesto de la tubería en succión m

Tercero: Se calcula el caudal de gas que pasa a través de la tubería en succión:

$$Q_{gs} = V_{gr} * \varepsilon * A_{ts} \quad (8.2.1.3)$$

Donde: Q_{gs} = Caudal de gas a través de la tubería de succión m^3/s

V_{gr} = Velocidad de transporte recomendada m/s

Cuarto: Se calcula el flujo másico de gas:

$$\dot{m}_g = Q_g * \rho_g \quad (8.2.1.4)$$

Donde: \dot{m}_g = Flujo masico de gas Kg/s

Quinto: Se calcula la relación másica:

$$\mu_s = \dot{m}_s / \dot{m}_g \quad (8.2.1.5)$$

Donde: R_s = Relación másica en succión (adimensional)

En la siguiente figura se muestran los resultados conseguidos bajo estas condiciones.

Propiedades de Material

Frijol Densidad del material

Sorgo 760 [Kg/m3]

Maíz

Cebada Velocidad Recomendada de Transporte

Arroz 25.92 [m/s]

Arveja

Datos de Entrada

Densidad del Gas 1.23 [Kg/m3]

Capacidad Transporte 200 [Kg/h]

Porosidad 0.99

Díámetro Tubería 0.0254 [m]

Relación Másica 3.47372

Ir a Perdidas Succión

UIS
Universidad Industrial de Santander

Figura 47. Resultados de la relación másica con el diámetro supuesto en succión.

Los resultados reflejan lo que se esperaba un transporte muy diluido.

9.2.2 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE TUBERÍA EN ETAPA DE PRESIÓN

El procedimiento para hallar la relación másica en presión será igual que el que se utilizó en la etapa de succión solo que esta vez supondremos un diámetro de presión de $D_{tp} = 0.0381$ m es decir un diámetro de 1.5 pulg.

Los resultados deberán mostrar un flujo aun mas diluido en esta etapa que en la de succión, ya que si aumento el diámetro, aumentare el área y por ende aumentare el caudal de gas que pasa por la sección transversal de la tubería, siendo el caudal directamente proporcional al flujo másico y este a su vez, inversamente proporcional a la relación másica.

Entre menor sea la relación másica mas diluido será la fase del transporte.

La figura 48 presenta los resultados obtenidos.

The image shows a software interface with two main sections: 'Propiedades de Material' and 'Datos de Entrada'. The 'Propiedades de Material' section has radio buttons for 'Frijol', 'Sorgo', 'Maíz', 'Cebada', 'Arroz', and 'Arveja'. The 'Frijol' option is selected. Below these are input fields for 'Densidad del material' (760 [Kg/m³]) and 'Velocidad Recomendada de Transporte' (25.92 [m/s]). The 'Datos de Entrada' section has input fields for 'Densidad del Gas' (1.23 [Kg/m³]), 'Capacidad Transporte' (200 [Kg/h]), 'Porosidad' (0.99), and 'Diámetro Tubería' (0.0381 [m]). To the right of these sections, there is a 'Relación Másica' field showing the value 1.54388 and a button labeled 'Ir a Perdidas Presión'. In the bottom right corner, there is a logo for 'Universidad Industrial de Santander'.

Figura 48. Resultados de la relación másica con el diámetro supuesto en presión.

Como se esperaba da un transporte más diluido.

9.3 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍA

Para las pérdidas de presión en la tubería tanto horizontal y vertical se calculan mediante las ecuaciones (7.31) y (7.32) respectivamente, siendo resuelta mediante el método numérico Runge Kutta 4.

Los datos de entrada que se tienen para el cálculo de pérdidas en tuberías tanto en la etapa de succión como en la etapa de presión son:

- Densidad del material (frijol) $\rho_s = 760 \text{ Kg/m}^3$
- Diámetro de la partícula (frijol) $D_p = 0.01003 \text{ m}$
- Coeficiente de fricción del material (frijol) con respecto a las paredes de la tubería $f_z = 0.306$
- Coeficiente de fricción del gas (aire) con respecto a las paredes de la tubería $f_g = 1.23$
- Capacidad de transporte $M_s = 200 \text{ Kg/h}$
- Diámetro de la tubería para etapa de succión $D_{ts} = 0.0254 \text{ m}$ y para etapa de presión $D_{tp} = 0.0381 \text{ m}$
- Porosidad $\varepsilon = 0.99$
- Velocidad de gas (aire), esta velocidad será la recomendada para el frijol $V_{gr} = 25.92 \text{ m/s}$
- Viscosidad dinámica del gas $\nu = 0.0000179 \text{ (N*s)/m}^2$

9.3.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN TUBERÍA EN ETAPA DE SUCCIÓN

Además de los datos de entrada anteriormente mencionados se tendrá en la etapa de succión los siguientes datos conocidos:

- Longitud horizontal de transporte $Lh = 0.25$ m
- Longitud vertical de transporte $Lv = 0.75$ m

Calculo del coeficiente de fricción del gas (aire) con respecto a las paredes de la tubería.

Primero: Se halla el número de Reynolds para el gas (aire)

$$Re = (Vgs * Dts) / \nu \quad (8.3.1)$$

Donde: Dts = Diámetro de tubería en etapa succión (m)

Vgs = Velocidad del gas en la etapa de succión. (m/s)

ν = Viscosidad del gas (aire) ($N * s/m^2$)

Segundo: Ya que tenemos un número de Reynolds tan pequeño por las bajas velocidades se considera flujo laminar completamente desarrollado, así que el coeficiente de fricción del gas es:

$$f = 64 / Re \quad (8.3.2)$$

Para el cálculo de la velocidad del sólido se utilizara la siguiente relación:

$$Vss = 0.8 * Vgs \quad (8.3.3)$$

Donde: Vss = Velocidad del sólido en la etapa de succión (m/s)

Vgs = Velocidad del gas en la etapa de succión (m/s)

Para el cálculo de la velocidad de flotación o de arrastre, que será una velocidad muy parecida a la velocidad recomendada de transporte, se hará de la siguiente forma:

$$Vf = 1.1 * \sqrt{\rho s} \quad (8.3.4)$$

Donde: Vf = Velocidad de flotación del material (fríjol) (m/s)

ρs = Densidad del material (fríjol) (Kg/m^3)

Las siguientes figuras me mostrarán los datos de entrada que se utilizan para el cálculo de las pérdidas de presión en la tubería en la etapa de succión.

Propiedades de Material

<input checked="" type="radio"/> Frijol	Densidad del material	<input type="text" value="760"/>	[Kg/m ³]
<input type="radio"/> Sorgo	Díametro de Partícula	<input type="text" value="0.01003"/>	[m]
<input type="radio"/> Maíz	Coefficiente Fricción	<input type="text" value="0.306"/>	
<input type="radio"/> Cebada			
<input type="radio"/> Arroz			
<input type="radio"/> Arveja			
Velocidad del Sólido		<input type="text" value="20.736"/>	[m/s]

Propiedades del Gas

Densidad	<input type="text" value="1.23"/>	[Kg/m ³]
Viscosidad	<input type="text" value="0.0000179"/>	[N*s/m ²]
Velocidad del Gas	<input type="text" value="25.92"/>	[m/s]
Coefficiente Fricción	<input type="text" value="0.00174006"/>	

Datos Generales

Capacidad de Transporte	<input type="text" value="200"/>	[Kg/h]
Díametro Tubería	<input type="text" value="0.0254"/>	[m]
Porosidad	<input type="text" value="0.99"/>	
Velocidad de Flotación	<input type="text" value="30.3249"/>	[m/s]
Distancia Horizontal	<input type="text" value="0.25"/>	[m]
Distancia Vertical	<input type="text" value="0.75"/>	[m]

Figura 49. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas de presión en la etapa de succión parte uno

Figura 50. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas de presión en la etapa de succión parte dos

Para el valor de las pérdidas se utilizan como ya se mencionó, las ecuaciones (7.30) y (7.31) para transporte horizontal y vertical respectivamente, despejando el diferencial de presión, aplicamos el método numérico Runge Kutta 4, este método se vera con claridad en el Anexo D en la parte de pérdidas de presión en la tubería horizontal o vertical en cualquiera de las dos etapas tanto presión o succión.

La siguiente grafica me muestra los resultados concretos de pérdidas en tubería horizontal, vertical y totales en la etapa de succión.

Perdidas Tubería Horizontal	3500.89	[Pa]
Perdidas Tubería Vertical	10507.4	[Pa]
Perdidas Tubería Succión Totales	14008.3	[Pa]

Figura 51 Resultados de las pérdidas de presión en tubería, en la etapa de succión.

Bajo las condiciones propuestas para el transporte neumático de frijol en la etapa de succión, se tiene un valor de perdidas relativamente alto para la distancia que se tiene esto es debido a la alta velocidad del gas.

9.3.2 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN TUBERÍA EN ETAPA DE PRESIÓN

Además de los datos de entrada mencionados en la sección 8.4, se tendrá en la etapa de presión los siguientes datos conocidos:

- Longitud horizontal de transporte $L_h = 0.64$ m - camino 1
- Longitud vertical de transporte $L_v = 0.645$ m - camino 1
- Longitud horizontal de transporte $L_h = 0.44$ m - camino 2
- Longitud vertical de transporte $L_v = 0.645$ m - camino 2

El cálculo del coeficiente de fricción del gas (aire) con respecto a las paredes de la tubería se hará de la misma forma como se hizo en la etapa de succión solo que se utilizaran los que se ingresen en la etapa de presión.

Primero: Se halla el número de Reynolds para el gas (aire)

$$Re = (V_{gp} * D_{tp})/v \quad (8.4.2.1)$$

Donde: D_{tp} = Diámetro de tubería en etapa presión (m)

V_{gp} = Velocidad del gas en la etapa de presión. (m/s)

v = Viscosidad del gas (aire) (N*s/m²)

Segundo: Ya que tenemos un número de Reynolds pequeño por las bajas velocidades se considera flujo laminar completamente desarrollado, así que el coeficiente de fricción del gas es:

$$f = 64/Re \quad (8.4.2.1)$$

Para el cálculo de la velocidad del sólido en la etapa de presión se utilizara el siguiente ecuación:

$$V_{sp} = (\mu_p * V_{gp} * \varepsilon * \rho_g) / ((1 - \varepsilon) * \rho_s) \quad (8.4.2.2)$$

Donde: ρ_s = Densidad del material (fríjol) (Kg/m³)

ρ_g = Densidad del gas (aire) (Kg/m³)

ε = Porosidad

μ_p = Relación másica en la etapa de presión

Para el cálculo de la velocidad de flotación o de arrastre, que será una velocidad muy parecida a la velocidad recomendada de transporte, se hará de la siguiente forma:

$$V_f = 1.1 * \sqrt{\rho_s} \quad (8.4.2.3)$$

Donde: V_f = Velocidad de flotación del material (fríjol) (m/s)

ρ_s = Densidad del material (fríjol) (Kg/m³)

Las siguientes figuras me mostraran los datos de entrada que se utilizan para el cálculo de las pérdidas de presión en tubería en la etapa de presión tanto para el camino 1 como para el 2.

Propiedades de Material		Datos Generales	
<input checked="" type="radio"/> Frijol	Densidad del material	Capacidad de Transporte	200 [Kg/h]
<input type="radio"/> Sorgo	760 [Kg/m ³]	Díametro Tubería	0.0381 [m]
<input type="radio"/> Maíz	Díametro de Partícula	Velocidad de Flotación	30.3249 [m/s]
<input type="radio"/> Cebada	0.01003 [m]	Porosidad	0.99
<input type="radio"/> Arroz	Coefficiente Fricción	Distancia Horizontal	0.64 [m]
<input type="radio"/> Arveja	0.306	Distancia Vertical	0.645 [m]
Velocidad del Sólido	6.41171 [m/s]		

Propiedades del Gas	
Densidad	1.23 [Kg/m ³]
Viscosidad	0.0000179 [N*s/m ²]
Velocidad del Gas	25.92 [m/s]
Coefficiente Fricción	0.00116004

Figura 53. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas de presión en la etapa de presión, camino 1, parte dos

Figura 52. Datos de entrada para el cálculo de pérdidas de presión en la etapa de presión, camino 1 y 2, parte uno

El camino dos tendrá una distancia horizontal de 0.44 m.

Para el valor de las pérdidas se utilizan como ya se menciono, las ecuaciones (7.31) y (7.32) para transporte horizontal y vertical respectivamente, despejando el diferencial de presión, aplicamos el método numérico Runge Kutta 4, este método se verá con claridad en el Anexo D en la parte de pérdidas de presión en la tubería horizontal o vertical en cualquiera de las dos etapas tanto presión o succión.

La siguiente grafica me muestra los resultados concretos de pérdidas en tubería horizontal, vertical y totales para los dos caminos definidos en la etapa de presión

Perdidas Tubería Horizontal	1032.34	[Pa]	Perdidas Tubería Horizontal	709.714	[Pa]
Perdidas Tubería Vertical	869.593	[Pa]	Perdidas Tubería Vertical	869.593	[Pa]
Perdidas Tubería Presión Totales	1901.93	[Pa]	Perdidas Tubería Presión Totales	1579.31	[Pa]

Figura 54. Resultados de pérdidas de presión en la etapa de presión para el camino 1 lado izquierdo, camino 2 lado derecho

Bajo las condiciones propuestas para el transporte neumático de frijol en la etapa de presión, se tienen un valor de pérdidas bajo.

9.3.3 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN ACCESORIOS

Ya que solo se tienen accesorios como válvulas de desvió y codos de 90° en la etapa de presión, se calcularan estas pérdidas para los dos caminos establecidos anteriormente.

Para el camino 1 se tienen los siguientes accesorios

- Dos codos de 90° embridados con una constante de accesorios de 0.3.

Para el camino 2 se tienen los siguientes accesorios

- Dos codos de 90° embridados con una constante de accesorios de 0.3
- Dos válvulas de desvió que se consideraran como codos de 90° de gran radio embridados con una constante de accesorio de 0.2

Los datos de las constantes en accesorios se apreciaran en la referencia (9), pagina 491.

Los siguientes serán los datos de entrada:

Datos de Entrada	
Número Codos	<input type="text" value="2"/>
Número válvulas	<input type="text" value="0"/>
Densidad Gas	<input type="text" value="1.23"/> [Kg/m ³]
Constante Válvulas	<input type="text" value="0"/>
Costante Codos	<input type="text" value="0.3"/>
Díametro Tubería	<input type="text" value="0.0381"/> [m]
Velocidad Gas	<input type="text" value="25.92"/> [m/s]

Propiedades de Material	
<input checked="" type="radio"/> Frijol	<input type="radio"/> Maíz
<input type="radio"/> Sorgo	<input type="radio"/> Cebada
<input type="radio"/> Arroz	<input type="radio"/> Arveja
Densidad del material	
<input type="text" value="760"/>	[Kg/m ³]

Datos de Entrada	
Número Codos	<input type="text" value="2"/>
Número válvulas	<input type="text" value="2"/>
Densidad Gas	<input type="text" value="1.23"/> [Kg/m ³]
Constante Válvulas	<input type="text" value="0.2"/>
Costante Codos	<input type="text" value="0.3"/>
Díametro Tubería	<input type="text" value="0.0381"/> [m]
Velocidad Gas	<input type="text" value="25.92"/> [m/s]

Propiedades de Material	
<input checked="" type="radio"/> Frijol	<input type="radio"/> Maíz
<input type="radio"/> Sorgo	<input type="radio"/> Cebada
<input type="radio"/> Arroz	<input type="radio"/> Arveja
Densidad del material	
<input type="text" value="760"/>	[Kg/m ³]

Figura 55. Datos entrada para las perdidas en accesorios en el camino 1 lado izquierdo y camino 2 lado derecho.

Los resultados se harán con una velocidad de gas igual a la velocidad de gas que se da en la etapa de presión y el diámetro que se da en la parte de presión.

La densidad de la mezcla es aproximación, ya que el flujo es demasiado diluido la proporción volumétrica de la mezcla material – gas es casi cero, así que la densidad de la mezcla es muy cercana a la del gas.

Resultados de pérdidas en accesorios:

Densidad Mezcla	1.60939	[Kg/m ³]
Perdidas Accesorios Codos	324.379	[Pa]
Perdidas Accesorios Válvulas	0	[Pa]
Perdidas Totales	324.379	[Pa]

Figura 56. Resultados de pérdidas en accesorios para el camino 1

Densidad Mezcla	1.60939	[Kg/m ³]
Perdidas Accesorios Codos	324.379	[Pa]
Perdidas Accesorios Válvulas	216.253	[Pa]

Figura 57. Resultados de pérdidas en accesorios para el camino 2

9.3.4 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN LA SECCIÓN DE SOLO AIRE

Esta sección calculara las pérdidas que se dan en la parte de solo aire, es decir la sección de tubería donde el aire que succiona va sin material.

Los datos de entrada se verán en la siguiente figura.

Datos de Entrada		
Número Codos	3	
Longitud Horizontal	0.15	[m]
Longitud Vertical	0.92	[m]
Densidad Gas	1.23	[Kg/m3]
Viscosidad Gas	0.0000179	[N*s/m2]
Costante Accesorios	0.3	
Capacidad Transporte	200	
Velocidad Gas	2.91532	[m/s]
Díametro Tubería	0.0753574	[m]

Figura 58. Datos de entrada del cálculo de las pérdidas en la sección de solo aire.

Para el cálculo de la velocidad del gas limpio se utilizarán las ecuaciones que se muestran en la sección 8.2.1, teniendo en cuenta que el área se calcula con el diámetro D_s del ciclón, no se tendrá en cuenta la porosidad ya que el aire no se encuentra con flujo de material y la relación másica será la calculada en la etapa de succión.

$$\dot{m}_s = M_{ss}/3600$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_s/\mu_s;$$

$$Q_g = \dot{m}_g/\rho_g;$$

$$A = \frac{\pi * D_s^2}{4};$$

$$V_g = Q_g/A;$$

Los resultados de las pérdidas de presión en la sección de solo aire serán:

Perdidas Tubería Horizontal	0.0441091	[Pa]
Perdidas Tubería Vertical	0.270536	[Pa]
Perdidas Codos	4.70424	[Pa]
Perdidas Totales	5.01888	[Pa]

Figura 59. Resultados de las caídas de presión en la sección de solo aire.

9.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA EN EL SISTEMA

Para el cálculo de la potencia requerida en el sistema se tendrá la suma de todas las caídas de presión halladas en las secciones anteriores y se multiplicara por el caudal más alto que manejaría un soplador con una velocidad igual a la manejada en la etapa de presión y un área que tendría el diámetro que se supuso en la etapa de presión.

Resultados de potencias para camino 1 y para camino 2.

Perdidas Totales	18620.9	[Pa]	Perdidas Totales	18514.5	[Pa]
Potencia Requerida	0.725068	[Hp]	Potencia Requerida	0.712283	[Hp]

Figura 60. Resultados de potencia requerida por el sistema bajo las condiciones de diseño dadas. En el lado izquierdo resultados del camino 1, lado derecho resultados del camino 2

Como la potencia requerida es pequeña consideramos la suposición de diámetros correcta.

Con esta potencia podremos seleccionar el equipo que suministrará el caudal de aire que mejor se comporte, además considerando el factor económico.

9.5 VÁLVULA DOSIFICADORA

Para cumplir con los requerimientos de transporte de material que es de $200 \frac{kg}{h}$, se optó por un diseño de válvula de dosificación rotativa, debido a que su construcción es relativamente simple y porque con un sencillo juego de poleas podemos utilizar todo el espectro de velocidades recomendadas para el transporte neumático que son de 20 rpm hasta 60 rpm, opciones como el tornillo transportador o las compuertas o exclusas, son el primero innecesariamente complicado para un sistema de baja presión, y el segundo no permite cambios en la cantidad de material dosificado lo que restringe en gran medida el funcionamiento del equipo.

La ecuación general de éste tipo de válvula está dada de la siguiente forma:

$$\dot{m}_s = \rho_s * V * n * N * \emptyset * \frac{60}{1000} \quad (9.4.1)$$

Donde: \dot{m}_s = Flujo másico de material a través de la válvula ($\frac{ton}{h}$)

ρ_s = Densidad del material ($\frac{kg}{m^3}$)

V = Volumen de un bolsillo (m^3)

n = Número de bolsillos o compartimientos ($\frac{1}{rev}$)

N = Revoluciones del eje de la válvula ($\frac{rev}{min}$)

\emptyset = Factor de llenado

El factor de llenado aparece debido a que la velocidad de rotación de la válvula puede impedir que el material fluya adecuadamente hacia el interior de la misma, por lo que los bolsillos no se llenan completamente, de ésta forma se reduce la capacidad de dosificación. Ver figura 22

Para nuestro transportador, deseamos una dosificación de 200 kg/h de material, tomamos la velocidad mínima recomendada de rotación de la válvula que es de 20 rpm, decidimos diseñar para la arveja, que según las tablas de densidades es el cereal menos denso del grupo con 580 kg/m³, por lo tanto es el que requiere un volumen mayor en la dosificadora. Si reemplazamos en la ecuación anterior obtenemos:

$$0.2 \frac{Ton}{H} = 580 \frac{kg}{m^3} * V * n * 20 \frac{rev}{min} * \emptyset * \frac{60}{1000} \quad (9.4.2)$$

El factor de llenado para materiales densos como los cereales es bastante alto, especialmente a bajas velocidades de rotación, por lo que siendo conservativos optaremos por un valor de 0,8.

Para facilitar la entrada y salida de los granos en la válvula, la mayor cantidad de aspas recomendada es 8 pero optaremos por la cantidad mínima de paletas recomendada que es de 4, debido a que un número bajo de paletas amplía el tiempo del que dispone el material para entrar y salir de la dosificadora, además se facilita el proceso de fabricación.

Con las anteriores decisiones tenemos:

$$0.2 \frac{Ton}{H} = 580 \frac{kg}{m^3} * V * 4 * 20 \frac{rev}{min} * 0.8 * \frac{60}{1000} \quad (9.4.3)$$

Luego de las conversiones de unidades correspondientes, obtenemos que el volumen de la válvula dosificadora debe ser de $9 \times 10^{-5} m^3$, es decir el volumen del cilindro que contiene la válvula, despreciando el diámetro del eje y el espesor de las paredes de las aspas es de $3.6 \times 10^{-4} m^3$, si asumimos una

longitud de 7.5 centímetros de profundidad, como valor arbitrario para facilitar la instalación de las aspas, debido a que éstas deben adherirse con bronce y se requiere espacio para trabajar cómodamente, el diámetro de la carcasa sería de 7.81 centímetros; pero para facilitar la observación del proceso de transporte y los componentes internos de la válvula rotativa; por éstas razones decidimos que un diámetro adecuado sería de 9 centímetros.

El aumento en las dimensiones no influye en la cantidad de material inicialmente supuesto para transportar, simplemente permite valores mayores de transporte, incluyendo el requerido.

Las dimensiones escogidas fueron: Diámetro de 9 centímetros, profundidad de 7,5 centímetros y eje central de 1 centímetro con 4 aspas. Utilizando la ecuación general y realizando las conversiones adecuadas obtenemos que la capacidad de transporte de la válvula es de:

$$\dot{m}_s = 580 \frac{kg}{m^3} * \left(\frac{\pi}{4} x (0.09^2 m - 0.01^2 m) \right) * 20 \frac{rev}{min} * 0.8 * \frac{60}{1000}$$

$$\dot{m}_s = 0.262 \frac{Ton}{h} = 262 \frac{kg}{h}$$

Existen diversas configuraciones de aspas y rotores como se muestra en la figura 61.

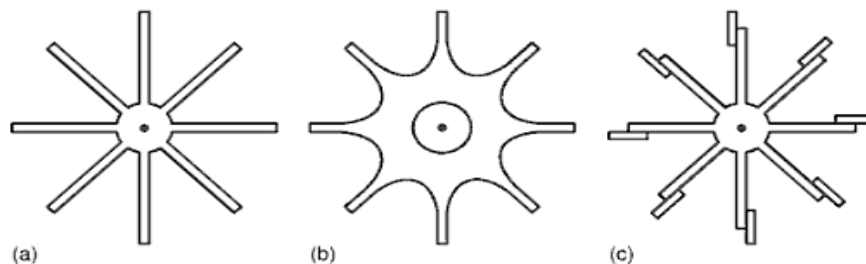


Figura 61. Tipos de rotor de válvula rotativa. a) Rotor de bolsillo profundo, b) Rotor de baja profundidad, c) Rotor con puntas

Para las aspas seleccionamos paletas simples por su fácil construcción, adheridas al eje mediante soldadura de bronce, el segundo modelo requería un proceso de fabricación más complejo igual que el tercero, además nuestras necesidades de sello con la carcasa, por ser un sistema de baja presión no eran tan estrictas.

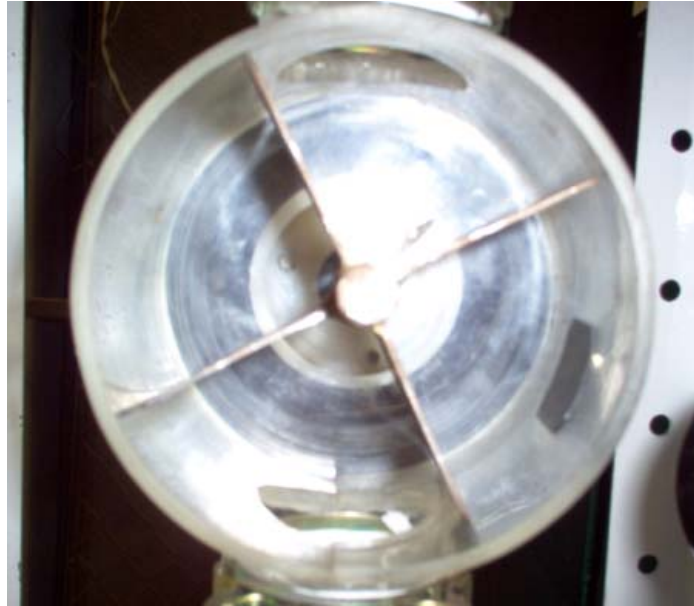


Figura 62. Aspas de válvula dosificadora

El eje de la válvula está soportado en 3 rodamientos con su respectivo asiento, torneado en polímero, 2 de ellos están adheridos a las paredes laterales de la carcasa, mediante tornillos ciegos. El tercero está puesto en el extremo del eje, en una estructura metálica auxiliar puesta exclusivamente para éste fin.



Figura 63. Rodamientos sobre la carcasa

Debido a la necesidad de bajas revoluciones, un motor eléctrico común, aún con un juego de reducción presentaría 2 dificultades principales, sería muy voluminoso y difícilmente podríamos llegar al valor de velocidad requerido sin incurrir en costos excesivos. Por éstos motivos decidimos utilizar un motoreductor pequeño, de 6 revoluciones y 2 W, aunque la potencia es bastante pequeña, su torque está multiplicado varias veces, por lo cual es adecuado para nuestro proceso.

Con la selección del motor realizada, decidimos que la forma de transmisión de potencia más versátil, para cambiar la rotación continuamente era una correa en V, para variar la distancia entre la polea motriz y las conducidas, realizamos perforaciones en la base que sostiene al motor, con el objetivo de permitir el desplazamiento vertical del mismo, dichas bases fueron provistas de soportes en su parte inferior, y que sostienen el motor y permiten la traslación horizontal, de ésta forma es posible alinear la polea motriz con cualquier polea del juego inferior.

El eje de la válvula fue equipado con un juego de poleas tipo caracol, que permiten variar la velocidad de rotación de la válvula desde 20 rpm hasta 60

rpm con variaciones de 10 rpm es decir 5 velocidades, eso nos permite trabajar en cualquier zona del rango recomendado, para analizar los efectos del incremento en la velocidad de rotación.

Los tamaños de las poleas se calcularon de la siguiente forma:

Para pasar de 6 rpm a 20, 30, 40, 50 y 60 revoluciones requiero relaciones de tamaño de poleas de la siguiente forma.

$$\frac{\textit{Velocidad de entrada}}{\textit{Velocidad de salida}} = 0.3; 0.2; 0.15; 0.12; 0.1 \quad (9.4.4)$$

Teniendo ésta relación y sabiendo que la velocidad de rotación depende del tamaño de la polea, se establece un tamaño base de la polea conductora de forma que el juego de poleas tenga dimensiones adecuadas para la fabricación y montaje.

Tomando como referencia una polea conductora de 20 cm se obtuvieron mediante la siguiente ecuación los tamaños de las poleas conducidas.

$$\textit{Polea conductora} * \textit{Relación de velocidades} = \textit{Polea conducida}$$

(9.4.5)

Se obtuvieron los siguientes datos de tamaños de poleas:

$$\textit{Polea conducida} = 6; 4; 3; 2.4; 2 \textit{ cm}$$

Como el eje mide 1 cm, incluso la polea más pequeña permite el mecanizado y deja espacio para torneear la guía de la correa, optamos por ésta configuración de tamaños.

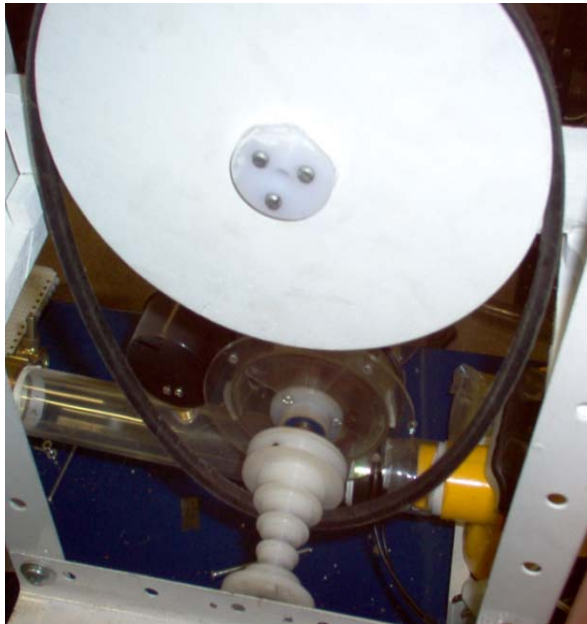


Figura 64. Juego de poleas

Finalmente, la válvula fue construida con puertos de entrada y salida de diámetro de 1,5 pulgadas, para que acoplaran mediante abrazaderas con la base del ciclón de la primera etapa (succión) y un tubo en T que es el inicio de la etapa de presión como se muestra en la figura.

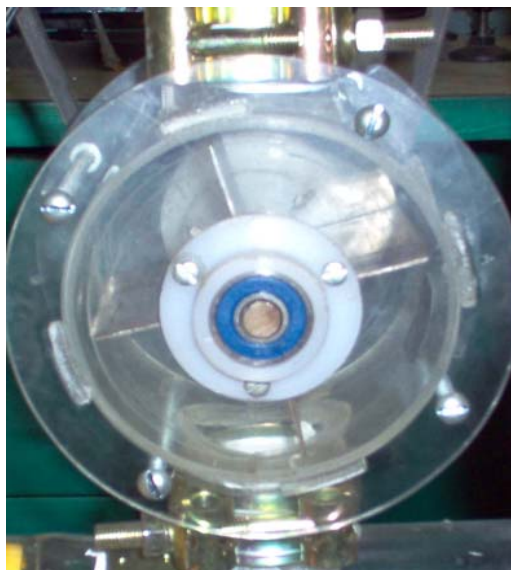


Figura 65. Válvula dosificadora.

9.6 VÁLVULAS DE DESVÍO

Para las válvulas de desvío, teniendo el diámetro de la tubería, se fabricaron de forma que ajustaran a tope con los tubos de acrílico y que entraran en los codos de PVC, se les suministró una manija que permite el giro para empalmar los caminos correspondientes.

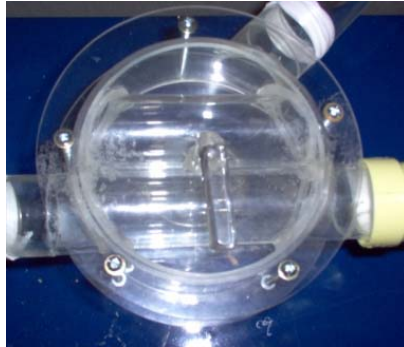


Figura 66. Válvula de desvío

9.7 SELECCIÓN DEL SOPLADOR

Con el dato de potencia calculado mediante el programa obtuvimos 0,72 HP es decir 536 W, con ése dato averiguamos el soplador más cercano y encontramos uno de 620 W con 6 velocidades, que fue el escogido y que cumplió con las expectativas.



Figura 67. Soplador

Finalmente obtuvimos el transportador neumático de la figura 68

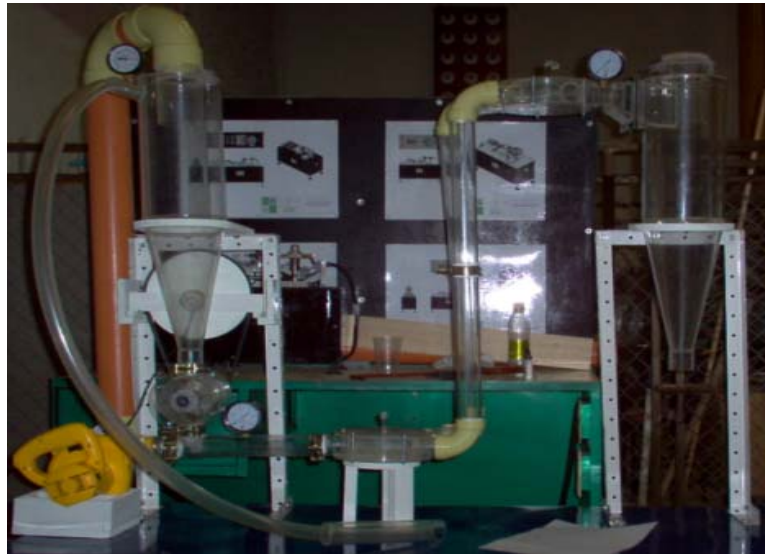


Figura 68. Transportador neumático

10. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSPORTADOR

NEUMÁTICO

Durante la etapa de ajuste de componentes previa al funcionamiento definitivo del equipo se encontraron varios inconvenientes que impedían el correcto desarrollo de las pruebas de transporte de material, las más importantes serán nombradas a continuación, junto con una descripción detallada del problema observado y la solución adoptada, con el objetivo de facilitar el desarrollo de equipos similares.

1) El material no entra a la válvula dosificadora

El material que salía del primer ciclón permanecía en flotación en la base del mismo y no se introducía adecuadamente en la válvula dosificadora para ser enviado por la línea de presión.

Luego de continuas observaciones, logramos establecer que la resuspensión del material podía deberse a dos factores; el primero era que el vórtice ascendente del gas arrastrara el material hacia la parte superior del ciclón, ésta hipótesis fue descartada debido a que realizamos pruebas bloqueando el orificio de salida en la base del ciclón y el material realizaba la trayectoria esperada y se depositaba en la base del mismo.

Luego de descartar la primera opción recurrimos a la segunda, donde asumimos que la flotación del material se debía a la corriente de aire que provenía del soplador y que se dirigía hacia arriba a través de la "T" de acrílico y la válvula dosificadora. Para eliminar éste inconveniente creamos una pieza plástica que se encarga de redirigir el flujo que sale del soplador, y alejándolo de la válvula dosificadora, el sistema funcionó correctamente y se eliminó el primer inconveniente.

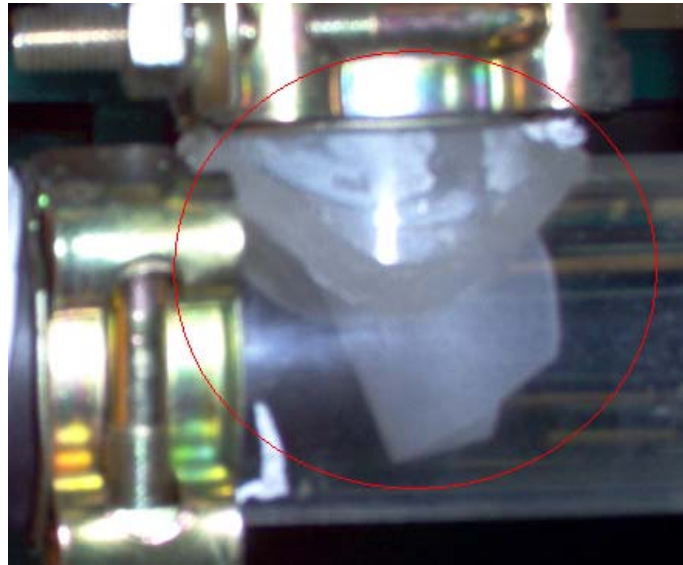


Figura 69. Direccionador de flujo

2) El material se bloquea al entrar a la manguera de succión

Al intentar aspirar el material, introduciendo la manguera dentro del recipiente contenedor los granos de cereal tendían a amontonarse y bloquear la entrada de aire y material a la boquilla; esto impedía el transporte por lo que éste no era continuo, repetidamente el equipo debía ser apagado para eliminar la succión y permitir que el material cayera por gravedad y desbloqueara el puerto de entrada.

Debido a la necesidad de introducir la boquilla dentro del material, sin provocar bloqueos recurrimos a una segunda boquilla (fabricada en acrílico) concéntrica con la manguera; a ésta boquilla la dotamos de perforaciones en la tapa superior, de forma que aún cuando existiera acumulación de material en la boquilla interna, pudiéramos disponer de una fuente de aire permanente, de ésta forma siempre es posible transportar el material.



Figura 70. Boquilla de succión doble

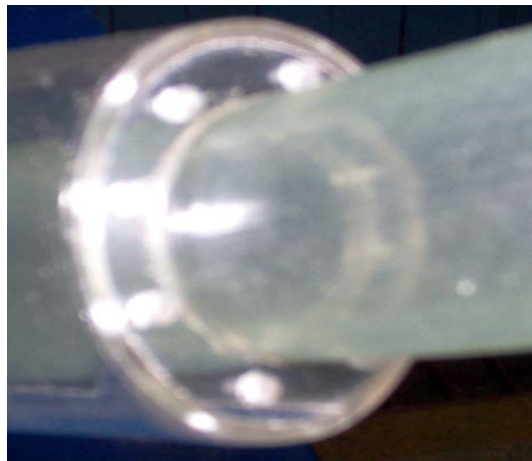


Figura 71. Detalle de las perforaciones en la boquilla exterior

3) El material se deposita en el adaptador del ciclón

El material en la etapa de presión, luego de realizar el recorrido completo por la tubería, entraba al ciclón, giraba una vez y algunos granos (muy pocos comparados con los transportados en total) se depositaban en la pared inferior del acople y en la zona horizontal de entrada del ciclón.

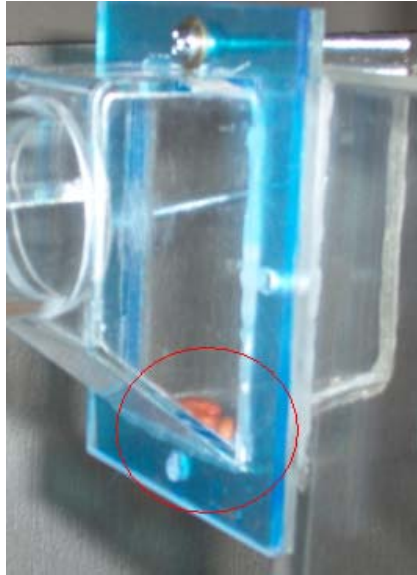


Figura 72. Material depositado en la base del acople al ciclón

Para solucionar el problema introdujimos una pieza de plástico con un ángulo de inclinación en el acople y la deslizamos hasta la parte recta inferior de la entrada del ciclón. Con ésta pared inclinada es imposible que el material se deposite, pues el ángulo de inclinación hace que caiga por gravedad.



Figura 73. Pared inclinada en el acople al ciclón

4) La válvula dosificadora se bloquea

La válvula dosificadora, especialmente cuándo funciona a alta velocidad y con alto flujo de material tiende a frenar el motor y detener el movimiento.

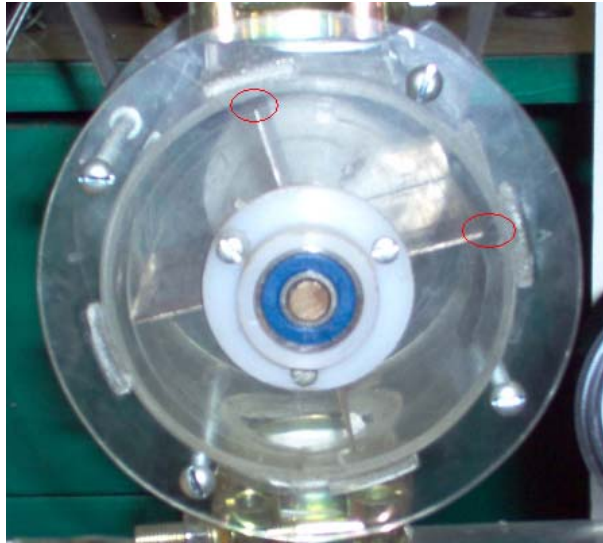


Figura 74. Válvula dosificadora con excesiva holgura entre aspas y carcasa

Luego de constantes observaciones logramos descubrir que el frenado era producido por partículas que quedaban atrapadas entre la pared de las paletas y la carcasa cilíndrica de la válvula (las paredes laterales no presentaban éste inconveniente). Decidimos que lo mejor era disminuir el espacio entre las aspas y la carcasa, de forma que el espacio para que las partículas se introdujeran se viera severamente restringido, esto funcionó muy bien para las partículas más grandes. Con partículas de tamaño muy pequeño y debido a los problemas de imperfecciones en la forma circular de la carcasa, propias del trabajo en acrílico, decidimos desmontar el eje de la dosificadora, y usarla sólo para materiales más densos y grandes.

Luego de solucionar los inconvenientes mencionados procedimos a realizar las pruebas de capacidad real de transporte del equipo. Para ellos tomamos 6 diferentes tipos de cereal como se muestra en la figura 75.



Figura 75. Cereales utilizados en las pruebas del transportador (Frijol, cebada, arroz, sorgo, maíz y arveja).

Tomamos una muestra de 1 kg de cada cereal, y determinamos el tiempo que tardaba en ingresar al transportador a través de la boquilla de succión, luego extrapolamos el resultado para determinar cuánto podríamos transportar en 1 hora, los datos de las pruebas están consignados en las siguientes tablas. Los valores de caída de presión se obtuvieron mediante el uso del programa computacional creado para el proyecto.

Las pruebas de laboratorio y los datos de entrada al programa se obtuvieron a partir de las tablas de propiedades de los materiales (Anexo A). La velocidad del gas en cada etapa del transportador fue medida con anemómetro, y el caudal se obtuvo conociendo el área de la tubería. Se usó la velocidad 6 del soplador que posee una velocidad de gas en succión de 7,5 m/s, y en presión de 33.8 m/s. Los diámetros de tubería son:

Succión: 0.0254 m

Presión: 0.0381m

Los resultados de las pruebas se presentan a continuación (Ver tablas 10 y 11)

ARROZ					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Másico Material (Kg/s)	Flujo Másico Material (Kg/h)	Relación Másica	Caída Presión Teórico (Pa)
1	17	0,058823529	211,7647059	1,241080726	2241,4
1	20	0,05	180	1,054918617	1699,46
1	19	0,052631579	189,4736842	1,110440649	1836,44
1	15	0,066666667	240	1,406558156	2764,5
1	17,75	0,056338028	202,8169014	1,188640695	2048,7
ARVEJA					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Másico Material (Kg/s)	Flujo Másico Material (Kg/h)	Relación Másica	Caída Presión Teórico (Pa)
1	28	0,035714286	128,5714286	0,753513298	846,84
1	26	0,038461538	138,4615385	0,811475859	941,22
1	22	0,045454545	163,6363636	0,959016924	1196,47
1	25	0,04	144	0,843934893	987,82
1	25,25	0,03960396	142,5742574	0,835579102	978,32
FRUJOL					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Másico Material (Kg/s)	Flujo Másico Material (Kg/h)	Relación Másica	Caída Presión Teórico (Pa)
1	35	0,028571429	102,8571429	0,602810638	940,64
1	32	0,03125	112,5	0,659324135	1029,68
1	37	0,027027027	97,2972973	0,570226279	913,95
1	30	0,033333333	120	0,703279078	1029,06
1	33,5	0,029850746	108,16361	0,629802159	994,06
SORGO					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Másico Material (Kg/s)	Flujo Másico Material (Kg/h)	Relación Másica	Caída Presión Teórico (Pa)
1	22	0,045454545	163,6363636	0,959016924	1559,89
1	20	0,05	180	1,054918617	1800,14
1	21	0,047619048	171,4285714	1,004684397	1668,96
1	25	0,04	144	0,843934893	1330,28
1	22	0,045454545	163,6363636	0,959016924	1559,89
MAIZ					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Másico Material (Kg/s)	Flujo Másico Material (Kg/h)	Relación Másica	Caída Presión Teórico (Pa)
1	30	0,033333333	120	0,703279078	1170,5
1	32	0,03125	112,5	0,659324135	1103,43
1	29	0,034482759	124,137931	0,727530081	1223,12
1	24	0,041666667	150	0,879098847	1539,67
1	28,75	0,034782609	125,2173913	0,733856429	1223,12
CEBADA					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Másico Material (Kg/s)	Flujo Másico Material (Kg/h)	Relación Másica	Caída Presión Teórico (Pa)
1	19	0,052631579	189,4736842	1,110440649	2115,12
1	20	0,05	180	1,054918617	1953,15
1	22	0,045454545	163,6363636	0,959016924	1688,98
1	18	0,055555556	200	1,172131796	2325,9
1	19,75	0,050632911	182,278481	1,068272017	1988,32

Tabla 10. Datos de pruebas del transportador en etapa de presión.

ARROZ					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Masico Material (Kg/s)	Flujo Masico Material (Kg/h)	Relacion Masica	Caida Presion Teorico (Pa)
1	17	0,058823529	211,7647059	12,58455856	4515,89
1	20	0,05	180	10,69687477	3850,32
1	19	0,052631579	189,4736842	11,25986818	4043,39
1	15	0,066666667	240	14,2624997	5139,97
1	17,75	0,056338028	202,8169014	12,05281665	4322,5
ARVEJA					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Masico Material (Kg/s)	Flujo Masico Material (Kg/h)	Relacion Masica	Caida Presion Teorico (Pa)
1	28	0,035714286	128,5714286	7,640624838	1980,94
1	26	0,038461538	138,4615385	8,228365211	2134
1	22	0,045454545	163,6363636	9,724431613	2517,17
1	25	0,04	144	8,557499819	2210,58
1	25,25	0,03960396	142,5742574	8,472772098	2208
FRIJOL					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Masico Material (Kg/s)	Flujo Masico Material (Kg/h)	Relacion Masica	Caida Presion Teorico (Pa)
1	35	0,028571429	102,8571429	6,112499871	2208,62
1	32	0,03125	112,5	6,685546734	2422,33
1	37	0,027027027	97,2972973	5,782094472	2101,82
1	30	0,033333333	120	7,131249849	2572,03
1	33,5	0,029850746	108,16361	6,386193895	2336,83
SORGO					
Masa material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Masico Material (Kg/s)	Flujo Masico Material (Kg/h)	Relacion Masica	Caida Presion Teorico (Pa)
1	22	0,045454545	163,6363636	9,724431613	3912,99
1	20	0,05	180	10,69687477	4295,74
1	21	0,047619048	171,4285714	10,18749978	4080,39
1	25	0,04	144	8,557499819	3435,23
1	22	0,045454545	163,6363636	9,724431613	3912,99
MAIZ					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Masico Material (Kg/s)	Flujo Masico Material (Kg/h)	Relacion Masica	Caida Presion Teorico (Pa)
1	30	0,033333333	120	7,131249849	3165,49
1	32	0,03125	112,5	6,685546734	2981,03
1	29	0,034482759	124,137931	7,377155016	3270,95
1	24	0,041666667	150	8,914062312	3957,18
1	28,75	0,034782609	125,2173913	7,441304191	3297,32
CEBADA					
Masa Material (Kg)	Tiempo de Transporte (s)	Flujo Masico Material (Kg/s)	Flujo Masico Material (Kg/h)	Relacion Masica	Caida Presion Teorico (Pa)
1	19	0,052631579	189,4736842	11,25986818	4771,14
1	20	0,05	180	10,69687477	4519,18
1	22	0,045454545	163,6363636	9,724431613	4116,45
1	18	0,055555556	200	11,88541642	5023,3
1	19,75	0,050632911	182,278481	10,83227825	4594,75

Tabla 11. Datos pruebas del transportador en etapa de succión.

10.1 OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS

REALIZADAS AL TRANSPORTADOR NEUMÁTICO

En la tabla de cantidad de material transportado notamos la versatilidad del transportador, ya que aún con materiales de diversas formas y propiedades presentó un comportamiento adecuado y nuevamente se tienen valores bastante aproximados a los requeridos, al igual que caídas de presión dentro de los rangos esperados.

Se recomienda realizar las pruebas de funcionamiento del equipo con granos de tamaño mediano o grande (maíz, frijol, arveja, garbanzo entre otros), para evitar atascamientos de la válvula dosificadora debido a las tolerancias entre aspas y carcasa. Para partículas más pequeñas se recomienda desmontar el eje de la válvula dosificadora y controlar la cantidad de material que entra mediante el uso de la válvula dosificadora.

Es importante que si el material a transportar posee un nivel alto de suciedad, éste sea previamente filtrado, mediante tamices u otro dispositivo, para evitar que el material obstruya la visión dentro de los componentes de acrílico transparente y se requiera un cambio frecuente de los filtros. Ver figura 76.



Figura 76. Filtro obstruido parcialmente.

Se observaron gran cantidad de fenómenos importantes en el transporte neumático, como son vórtices, fluidización, dosificación de material, transporte en fase densa y en fase diluida, filtrado entre otros, por lo que el equipo puede ser una importante herramienta de laboratorio para apreciar las características especiales de éste tipo de transporte.

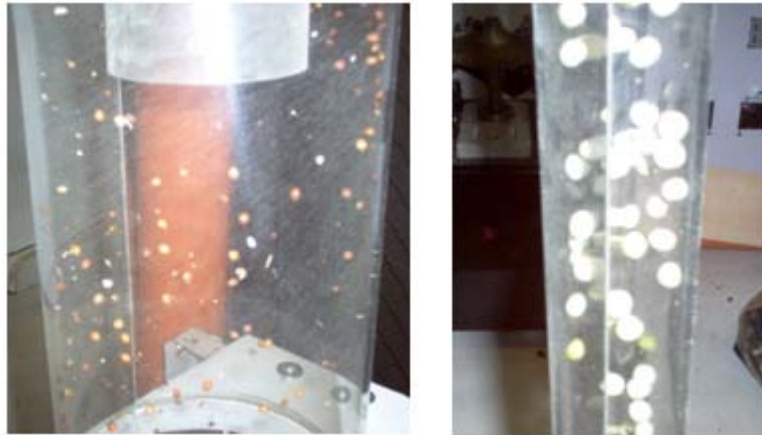


Figura 77. Fenómenos observados (Vórtice de material en el ciclón y transporte en fase diluida).

En conclusión, notamos que el desempeño del equipo fue bastante bueno, cumplió con las especificaciones de diseño en presión y succión. También notamos que la entrada de material depende en gran medida de la forma en que se ubica la boquilla de succión al igual que la habilidad del operario. Se puede apreciar que el transportador cumple bastante bien con los requisitos de diseño. En general se presentan caídas de presión bajas, que es lo que esperábamos para las pequeñas distancias del equipo, esto dificulta la visualización del valor exacto en los manómetros y vacuómetros análogos utilizados. Las cantidades de material transportado están bastante cercanas a las deseadas; especialmente el arroz que fue el material con mayor facilidad para transporte neumático.

11. PRESUPUESTO

A continuación presentaremos los costos de los diversos elementos que fueron requeridos para el desarrollo y la construcción del transportador neumático.

Dividiremos el total de los elementos en varias categorías para organizar la información y tener una idea más clara de su función y su impacto en la totalidad del proyecto.

Nota: Todos los elementos fabricados en acrílico poseen espesor de pared de 3 milímetros.

➤ Tubería en acrílico transparente

4 Secciones de tubería de 34cm y diámetro de 3,81 cm	100000
4 Codos de PVC de 3,81 cm de diámetro con ventana transparente	30000
1 Tubo en "T" de 28 cm y diámetro de 3,81 cm	20000
	<hr/>
	150000

➤ Elementos en acrílico transparente

2 Ciclón de 60 cm de alto y diámetro de 15 cm	250000
2 Válvulas de desvío de 2 caminos	50000
1 Carcasa de válvula dosificadora de diámetro 9 cm	40000
1 Adaptador de ciclón (circular a rectangular)	10000
1 Boquilla de 20 cm y diámetro de 3,81 cm con orificios para entrada de aire auxiliar	25000
1 Acople de 5 cm y diámetro de 3,81 cm con cambio de sección	15000

1 Acople de 7 cm y diámetro de 7 cm con cambio de sección	<u>15000</u>
	405000
➤ Elementos mecánicos	
1 Soplador de velocidad variable de 6 velocidades y 620 W	60000
1 Motorreductor de 6 rpm y 2 W	<u>25000</u>
	85000
➤ Elementos de medición	
2 Vacuómetros de 30 pulgadas de mercurio con carátula de 2,5 pulgadas, acople de ¼" y precisión de 0,5.	30000
2 Manómetros de 5 PSI, carátula de 2,5 pulgadas acople de ¼" y precisión de 0,1 PSI	<u>140000</u>
	170000
➤ Accesorios	
3 Rodamientos de 1 cm	9000
1 Correa en V para transmisión de movimiento	7000
6 Abrazaderas de 1,5 pulgadas	18000
1 Abrazadera de 3 pulgadas	<u>3500</u>
	37500

➤ **Estructura**

1 Mesa metálica de 1,5 m x 50 cm con rodachines	60000
2 Perfiles para estante de 2 metros	<u>20000</u>
	80000

➤ **Piezas torneadas**

1 Polea motriz de madera de 20 cm de diámetro con canal para correa en V	10000
1 Polea conducidas tipo caracol en polímero, con diámetro variable y con canal para correa en V	30000
3 Soportes para rodamiento en polímero	20000
1 Eje metálico de 1 cm con 4 aspas de 4 cm x 7,5 cm unidas con bronce	<u>20000</u>
	80000

➤ **Tubería y accesorios en PVC**

1 Tubo de 3 pulgadas x 1 metro	7000
4 Codos de 3 pulgadas	<u>16000</u>
	23000

➤ **Papelería**

Impresiones y empastes	70000
------------------------	-------

➤ **Varios**

1 Lámina de madera de 50 cm x 50 cm	7000
Tornillos varios	10000
1 lámina de balsa de 12 cm x 90 cm	3000
5 Rollos de cinta de teflón	5000
2 Tubos de pegamento instantáneo	4000
6 Kilos de cereal variado para pruebas del equipo	15000
Pintura blanca	2000
Pincel	1200
Papel contact 50 cm x 50 cm	1000
Tela para filtro	1000
2 Recipientes plásticos herméticos para almacenamiento	15000
1 Manguera transparente de 1 pulgada y 1,5 metros	<u>9000</u>
	<u>73200</u>

➤ **Total** **1173700**

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se observó un desempeño satisfactorio del equipo, de acuerdo a los parámetros para los que fue diseñado. El equipo mostró una gran versatilidad, pues fue apto para el transporte de todos los cereales puestos a prueba.
- Se logró la visualización de múltiples fenómenos físicos propios de la fluidización y el transporte neumático. El equipo es apto para determinar la velocidad de flotación de los materiales y esto lo hace muy valioso, debido a que no existen relaciones perfectamente precisas para hallar éste valor, y la forma más adecuada de obtenerlo es mediante la realización de pruebas con equipo similar.
- Mediante cambios en la velocidad del gas, a través de las velocidades variables del soplador es posible obtener diversos tipos de comportamiento del material, desde fluidización nula o escasa hasta transporte neumático altamente diluido, pasando por el transporte por paquetes y en fase densa, esto permite observar a través de las paredes transparentes los diversos patrones de flujo del material.
- Se logró tener un acercamiento con los diversos componentes de un sistema de transporte neumático, notando las debilidades y fortalezas de cada componente.
- El software de cálculo del sistema de transporte neumático significó un gran valor agregado al proyecto, pues simplificó la tarea de recalcular los parámetros al variar las condiciones de operación del equipo.
- Las prácticas de laboratorio, desarrolladas por los autores, y consignadas en los anexos son herramientas para que los estudiantes interactúen con un equipo de éste tipo

- El uso de acrílico transparente en la casi totalidad del equipo fue un elemento decisivo a la hora de determinar el tipo de flujo, los vórtices y fenómenos de resuspensión entre otros.
- Se recomienda un tamizado de los cereales previo al transporte (cuándo estos posean elementos extraños), debido a que las partículas de suciedad pueden bloquear la visión del interior de los componentes y bloquear los filtros.
- Si se desea tomar medidas precisas de los valores de presión y succión obtenidos se recomienda el uso de equipo digital y sistema de adquisición de datos, ya que los manómetros y vacuómetros analógicos suministrados a pesar de ser los más precisos del mercado, no permiten una lectura con el grado de precisión esperado, su función es ilustrativa del fenómeno y el movimiento de sus agujas permite tener una idea aproximada de las caídas de presión obtenidas.
- Se recomienda revisar la alineación de la válvula rotativa para evitar atascamientos de la misma.
- Se debe prestar especial cuidado a la posición de las válvulas de desvío previa al encendido del soplador, se debe garantizar que haya un camino libre para el aire para evitar la subida excesiva de presión y el posible daño de componentes.
- Si se desea un mayor rango de velocidades del gas es posible la utilización de un variador de frecuencia, pues el equipo seleccionado ésta limitada a 6 velocidades, aunque éstas se encuentran, según mediciones con anemómetro en el rango justo de velocidades de transporte de la mayor parte de los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

MILLS, David. Pneumatic Conveying Design Guide. Oxford, 2004, 637p.

WOODCOCK, C.R. MASON, J.S. Bulk solids handling, an introduction to the practice and technology. Londres, 1995. 520p.

KLINZING, G.E. RISK, F. Pneumatic Conveying of Solids. Londres, 1997. 464p.

MILLS, David. JONES, Mark. Handbook of Pneumatic Conveying Engineering. Nueva York, 2004. 684p.

TAMAYO, Enrique. Modelación Matemática del Transporte Neumático de Mineral Laterítico en Fase Densa. Cuba, 2007. 31p.

FUENTES, Oscar. MORENO, Oscar. Laboratorio didáctico de transporte neumático. Bucaramanga, 1999. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica.

SUAREZ, Pablo. Uribe, José. Determinación de propiedades para almacenamiento y transporte de productos agrícolas (Granos) y diseño de silos y transporte neumático. Bucaramanga, 1988. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Química.

KUNII, Daizo. Fluidization Engineering. Sydney, 1969.

MUNSON, YOUNG, OKISHI. Fundamentos de mecánica de fluidos. Cuarta edición, 2006.

ANEXO A

PROPIEDADES DE LOS CEREALES PARA EL TRANSPORTE NEUMATICO

Material	Densidad (gr/cm³)	Tamaño Partícula (cm)	Velocidad Recomendada de Transporte (cm/s)	Coefficiente de fricción	Cohesión	Concepto
Fríjol	0,76	1,003	2592,9	0,306	No	Bueno
Sorgo	0,76	0,156	1022,6	0,344	No	Bueno
Maíz	0,72	0,95	2456,2	0,384	No	Bueno
Cebada	0,71	0,55	1855,9	0,364	No	Excelente
Arroz	0,7	0,448	1663,1	0,306	No	Bueno
Arveja	0,58	0,715	1912,5	0,213	No	Bueno

ANEXO B
PRACTICA DE LABORATORIO
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PRACTICA DE LABORATORIO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

TEMA: FLUIDIZACIÓN

OBJETIVO GENERAL: Brindar al estudiante la posibilidad de visualizar los procesos físicos implícitos en la fluidización.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- *Conocer los diversos componentes de un transportador neumático.
- *Visualizar los vórtices formados en los separadores ciclónicos.
- *Determinar mediante observación la velocidad de flotación del material
- *Reconocer las etapas del proceso de fluidización.

Marco Teórico

Fluidización: Se puede definir como la operación por la cuál las partículas sólidas son transformadas en un estado “fluido” a través del contacto con un gas o líquido.

Es el proceso que hace posible el transporte neumático; dependiendo del grado de fluidización que se logre con el material podemos tener diversos tipos de transporte, ya sea denso o diluido, el consumo de potencia y desgaste de los elementos del transportador están fuertemente asociados a éste concepto.

Si se tiene una cama de partículas sólidas finas, un caudal pequeño de fluido pasa a través de los espacios vacíos, esto se conoce como lecho fijo. Con un incremento en el caudal, las partículas se separan y algunas vibran y se mueven en determinadas regiones; esto se conoce como lecho expandido.

A una velocidad aún más alta, se alcanza un punto en el cuál todas las partículas son suspendidas en el fluido ascendente, en éste momento la fuerza de fricción entre una partícula y el fluido contrarresta el peso de la partícula, la componente vertical de la fuerza de compresión entre partículas adyacentes desaparece. Se considera entonces que se ha alcanzado el estado de fluidización incipiente o mínima fluidización.

Un incremento en el caudal resulta en un estado de expansión progresiva del lecho, no se observa un burbujeo a gran escala, y toda la mezcla es aproximadamente homogénea, esto se conoce como fluidización particulada o uniforme.

Con flujos más altos la agitación de las partículas se torna violenta y el movimiento es más vigoroso, el lecho no se expande mucho más allá del nivel de mínima fluidización, se presenta entonces una fluidización agregativa o burbujeante. Dependiendo de la geometría del recipiente, las burbujas pueden presentar el fenómeno de empaquetamiento, en el cuál su tamaño es tal que puede alcanzar las paredes, después de eso la porción de lecho por encima de la burbuja es empujada hacia arriba como por un pistón. Las partículas luego caen y la burbuja se desintegra, formando un movimiento oscilatorio que se repite, éste empuje puede ser aprovechado para realizar transporte de material en fase densa.

Hasta éste punto todas las mezclas sólido-fluido se consideran fase densa porque existe un límite superior del lecho claramente definido. Si el flujo tiene una velocidad suficientemente alta, la velocidad de arrastre de las partículas será excedida y los sólidos serán transportados con la corriente, en éste punto se tiene una fluidización, en fase diluida y con transporte de material.

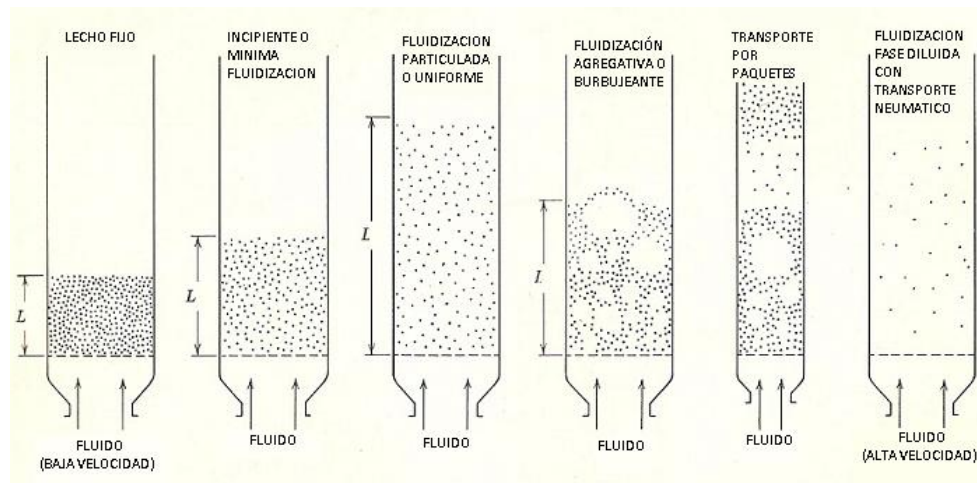


Figura 1. Proceso de fluidización.

Velocidad de flotación: Es la velocidad que debe tener una corriente de aire, para mantener completamente suspendida una partícula de material. Valores por encima de éste implican transporte neumático.

$$V_f = 1.1 * \sqrt{\rho_s}$$

Donde: V_f = Velocidad de flotación del material ($\frac{m}{s}$)

$$\rho_s = \text{Densidad del sólido} \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

Desarrollo de la práctica:

- 1) Cargue mediante la boquilla de succión la válvula rotativa sin que ésta esté en funcionamiento

- 2) Gire manualmente el eje de la válvula dosificadora, de forma que el material caiga en la tubería de transporte por presión
- 3) Encienda el soplador, iniciando en velocidad 1. (observe que pasa con el material)
- 4) Continúe aumentando la velocidad del soplador hasta llegar a 6. (anote el valor de velocidad para el cual las partículas quedan suspendidas de forma casi estática)
- 5) Observe el vórtice doble formado en el ciclón de presión.
- 6) Utilice una hoja de papel para observar el flujo de aire en las salidas superior e inferior del ciclón.
- 7) Repita las pruebas con diversos materiales.

Análisis de resultados

- 1) Cuáles de los procesos de fluidización descrito en el marco teórico pudo observar, describa con sus palabras lo observado
- 2) Cuál es la velocidad de flotación observada, compárelo con el valor teórico y halle el porcentaje de error, ¿A qué atribuye el error?
- 3) Describa los vórtices observados, ¿Qué puede concluir con la prueba de la hoja de papel?
- 4) Anote sus observaciones y conclusiones.

Temas de Consulta:

*Fluidización

*Velocidad de flotación

*Separadores ciclónicos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PRACTICA DE LABORATORIO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

TEMA: VORTICES AL INTERIOR DE CICLONES

OBJETIVO GENERAL: Brindar al estudiante la posibilidad de visualizar la trayectoria de la corriente de aire al interior de un ciclón.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

*Analizar el efecto de doble vórtice dentro de un ciclón.

*Visualizar los vórtices formados en los separadores ciclónicos.

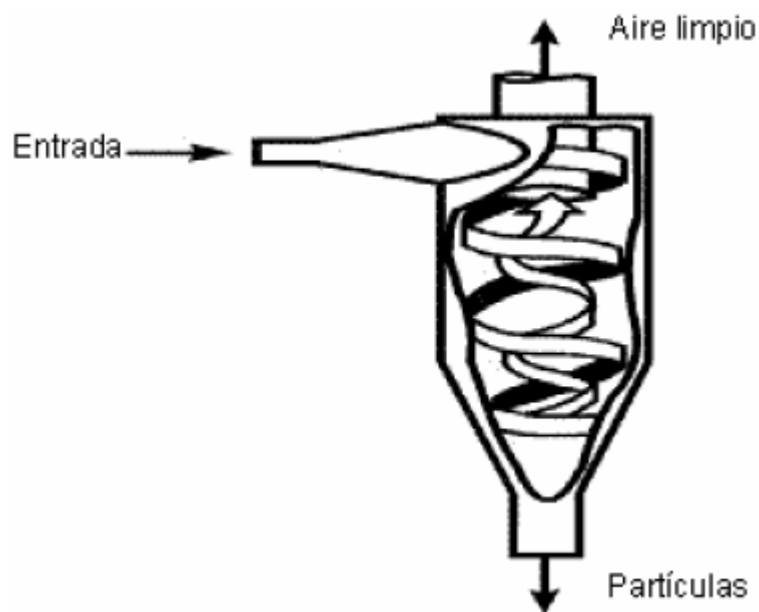
Marco Teórico

Los separadores ciclónicos (a menudo llamados simplemente ciclones) son equipos utilizados para realizar la separación de material sólido que se encuentra suspendido en una corriente de gas.

Un ciclón está formado básicamente por un cilindro vertical con fondo cónico, una entrada tangencial normalmente cuadrada, un ducto en la parte superior que se encarga de retirar el aire limpio y otro inferior que extrae el material sólido previamente separado.

Su principio de funcionamiento es el de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga; las partículas sólidas viajan en la corriente de gas y entran tangencialmente al ciclón, donde chocan con las paredes del mismo.

Luego de que la mezcla gas-sólido entra al ciclón se presenta un doble vórtice, uno exterior formado por la corriente de gas que entra al ciclón, las partículas sólidas, debido a su inercia tienden a moverse hacia la periferia del equipo alejándose de la entrada del gas y acumulándose en la base cónica. El segundo vórtice es creado por el gas luego de que alcanza la base del ciclón para luego ascender por la zona central describiendo una hélice.



Desarrollo de la práctica:

- 8) Utilice la boquilla de succión para introducir vapor o humo en el ciclón (se recomienda el uso de hielo químico)
- 9) Use el soplador en la mínima velocidad para maximizar la permanencia.

10) Use una tira de madera o de un material ligero para visualizar el movimiento de aire (sostenga la tira cerca de las salidas inferior y superior del ciclón).

11) Utilice diferentes velocidades para realizar el procedimiento

Análisis de resultados

5) Describa los vórtices observados, ¿Qué puede concluir con la prueba de la hoja de papel?

6) Anote sus observaciones y conclusiones.

Temas de Consulta:

*Ciclones

*Fuerza centrífuga

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PRACTICA DE LABORATORIO DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

TEMA: RELACIÓN MÁSCICA EN TRANSPORTE NEUMÁTICO

OBJETIVO GENERAL: Analizar el impacto de cambiar las relación másica de la mezcla sólido-gas

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

*Calcular la cantidad de material que puede transportar el equipo.

*Determinar la relación másica presente en cada velocidad de transporte.

Marco Teórico

Un transportador neumático requiere un flujo de gas que produzca el arrastre del material, si el volumen de aire es muy grande, comparado con el del sólido, se dice que la mezcla es altamente diluida, con éste tipo de transporte se requiere una cantidad mayor de aire que el necesario para transportar la misma cantidad de material pero en mayor concentración.

En fase diluida se requieren grandes volúmenes de aire; el arrastre producido mantiene el sólido en suspensión al interior de la corriente, el gasto energético es importante por la necesidad de un suministro continuo de gran cantidad de fluido.

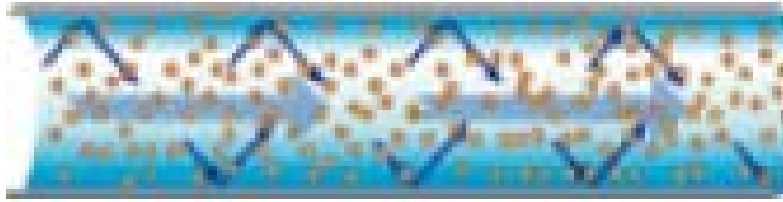


Figura 5. Transporte en fase diluida

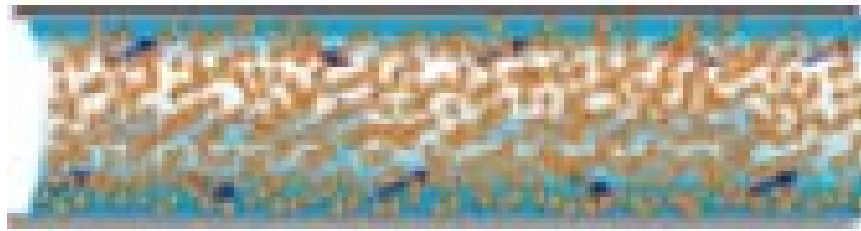


Figura 6. Transporte en fase densa

La relación másica $\mu = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_g}$

Donde: \dot{m}_s = Flujo másico de sólido

\dot{m}_g = Flujo másico de gas

Es uno de los parámetros utilizados para determinar el tipo de transporte, ya sea en fase densa o diluida, valores altos implican altas concentraciones de sólido y por lo tanto flujo denso, lo contrario ocurre cuándo la relación disminuye.

Desarrollo de la práctica:

- 12) Pese el material a transportar
- 13) Utilice la boquilla de succión para introducir el material en el ciclón de succión
- 14) Contabilice el tiempo requerido para el transporte
- 15) Repita el procedimiento para varias velocidades del soplador.
- 16) Utilice diferentes materiales y repita el proceso

Análisis de resultados

- 1) Halle la relación másica en cada caso (use los valores tabulados de caudal de aire del soplador en cada velocidad).
- 2) Determine la capacidad de transporte en una hora
- 3) Anote sus observaciones y conclusiones.

Temas de Consulta:

*Flujo en fase densa

*Flujo en fase diluida

ANEXO C

MANUAL DE SEGURIDAD Y USO DEL TRANSPORTADOR NEUMÁTICO MIXTO DE DOS ETAPAS PARA CEREALES

Para un correcto funcionamiento del equipo, con seguridad para los usuarios es importante que se lea previamente éste manual.

Preste atención a los mensajes de peligro y advertencia que están consignados en éste documento.

Instrucciones importantes de seguridad

Para prevenir accidentes y daños en el equipo consignamos las siguientes advertencias

ADVERTENCIAS

- 1) Realice una lectura completa de éste documento
- 2) Revise las conexiones eléctricas y los interruptores del equipo
- 3) Revise la estabilidad de la estructura
- 4) Bloquee las ruedas de la mesa base
- 5) No apoye elementos pesados sobre los distintos elementos del equipo
- 6) Revise que la válvula dosificadora se encuentre completamente ensamblada
- 7) No toque la banda de transmisión si ésta se encuentra en movimiento
- 8) No intente transportar productos húmedos, el equipo no fue diseñado con éste propósito
- 9) Revise las conexiones de la tubería y accesorios

Solución de problemas

Pasos a seguir si no se mueve adecuadamente la válvula dosificadora

- 1) Apague inmediatamente el moto-reductor
- 2) Revise que la banda de transmisión esté puesta de forma adecuada
- 3) Revise la alineación de las poleas
- 4) Cambie la tensión de la banda
- 5) Revise la alineación del eje de válvula
- 6) Busque elementos extraños que puedan estar obstruyendo el movimiento de las aspas dentro de la carcasa

PELIGRO: No introduzca sus manos en la carcasa de la válvula rotativa

Pasos a seguir si no existe una carga adecuada de material

- 1) Revise que la boquilla de succión esté ubicada adecuadamente
- 2) Revise fugas de aire
- 3) Revise los acoples del soplador
- 4) Analice las propiedades del material para comprobar que es apto para el transporte.

PELIGRO: No acerque la boquilla de succión a su cara, evite especialmente el área de los ojos.

Pasos a seguir si el motor o el soplador no funcionan

- 1) Revise que las conexiones eléctricas sean de 110 V
- 2) Revise la posición del interruptor
- 3) Revise las conexiones eléctricas de los interruptores.

El material no entra adecuadamente a la válvula dosificadora

- 1) Revise la ubicación de la boquilla de succión
- 2) Evite que el aire que sale del soplador sea reintroducido al equipo a través de la tubería en T.

- 3) Busque fugas en la etapa de succión
- 4) Analice el movimiento de la válvula dosificadora (éste debe ser fluido y continuo, no debe presentar ningún tipo de ruidos o roces)

USO DEL TRANSPORTADOR

- 1) Fije las ruedas de la mesa de soporte
- 2) Ubique la banda de transmisión adecuadamente
- 3) Revise la adecuada ubicación de las válvulas de desvío (asegúrese de que el camino del fluido no está obstruido)
- 4) Revise las conexiones eléctricas
- 5) Encienda el moto-reductor
- 6) Encienda el soplador (puede utilizar el botón de enganche si no desea permanecer sujetándolo).
- 7) Ubique la boquilla de succión en el recipiente donde se encuentra el material a cargar.
- 8) Mediante movimientos circulares cargue el material. No obstruya completamente la entrada de aire
- 9) Luego de realizar el transporte de material apague el soplador
- 10) Apague el moto-reductor
- 11) Si el equipo no va a ser utilizado inmediatamente desconéctelo de la fuente de energía.

PELIGRO: Si el camino de transporte no está libre de obstrucciones es probable que los puntos de unión de la tubería sufran daños, en ocasiones extremas es posible que se desconecten tramos de tubería.

CUIDADO DEL TRANSPORTADOR

- 1) No ponga en funcionamiento la válvula rotativa si existen obstrucciones en la misma

- 2) No permita que el agua o materiales extraños entren en contacto con el soplador o el moto-reductor
- 3) No se apoye sobre la estructura del equipo
- 4) No utilice el transportador si se encuentran obstruidas las tuberías de transporte
- 5) Utilice una tensión adecuada en la transmisión de movimiento
- 6) Revise que el giro de la válvula dosificadora sea suave y continuo
- 7) Revise que los caminos de las válvulas de desvío estén coordinados

Por favor lea cuidadosamente la información consignada anteriormente, siga las recomendaciones para alargar la vida del equipo y trabajar con seguridad.

Suministre éste documento al operario del equipo, la prevención de accidentes es posible si se usa adecuadamente el equipo.

Guarde adecuadamente éste manual y divulgue la información contenida.

ANEXO D

CODIGO MATLAB

CODIGO DE LA PRESENTACION DEL PROGRAMA

```
function presentacion

%Autores: Carlos Eduardo Araque Manrique

%           Juan Pablo Vega Triana

%Estudiantes de Ingenieria Mecanica

%*****

% presentación: función que presenta la pantalla de presentación

%*****

clear,clc,cla,close all

%Creamos figura

figdiag=figure('Units','Normalized','Position',[0.06 0.06 0.9
0.9],'Number','off','Name','Universidad Industrial de Santander /
Ingenieria Mecanica','Menubar','none','color',[0 0 0]);

axes('Units','Normalized','Position',[0 0 1 1]);

%Incluir imagen

[x,map]=imread('logouis1.bmp','bmp');

%Representamos imagen en figura, con su mapa de colores

image(x),colormap(map),axis off,hold on

%Títulos sobre imagen

%Título

text(50,20,'Presentación del
Programa','Fontname','Arial','FontSize',20,'Fontangle','Italic','Fontwe
ight','Bold','color',[0 0 0]);
```

```

text(130,42,'Diseño de Sistema de Transporte
Neumático','Fontname','Arial','FontSize',15,'Fontangle','Italic','Fontw
eight','Bold','color',[0 0 0]);

%Nombre del programador

text(50,315,'Por: Carlos Eduardo Araque
Manrique','Fontname','Arial','Fontangle','Italic','Fontweight','Bold','
FontSize',14,'color',[0 0 0]);

text(75,330,'Juan Pablo Vega
Triana','Fontname','Arial','Fontangle','Italic','Fontweight','Bold','Fo
ntsize',14,'color',[0 0 0]);

%Botón Continuar

botok=uicontrol('Style','pushbutton',
'Units','normalized','Position',[.84 .03 .12
.05],'String','CONTINUAR','Callback','clear all; close all;clc;
programageneral;');

CODIGO DEL MENU PRINCIPAL

% --- Executes just before programageneral is made visible.

function programageneral_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)

U=imread('imagenfondo.JPG');

image(U)

axis off

% --- Executes on button press in Ciclones.

function Ciclones_Callback(hObject, eventdata, handles)

CICLONES1

% --- Executes on button press in Tuberia.

function Tuberia_Callback(hObject, eventdata, handles)

Perdidas_tuberia

```

```

% --- Executes on button press in accesorios.
function accesorios_Callback(hObject, eventdata, handles)
Perdidas_acesorios

% --- Executes on button press in soloaire.
function soloaire_Callback(hObject, eventdata, handles)
Perdidas_solo_aire

% --- Executes on button press in perdidastotales.
function perdidastotales_Callback(hObject, eventdata, handles)

global PTTT DELTAP DELTAP1 DELTAP2 DELTAP3 PER Pat
PER=PTTT+DELTAP+DELTAP1+DELTAP2+DELTAP3+Pat;
set(handles.edit3, 'string', PER)

% --- Executes on button press in potencia.
function potencia_Callback(hObject, eventdata, handles)

global PTTT DELTAP DELTAP1 DELTAP2 DELTAP3 Vgp

Dtp=0.0381;
PER=PTTT+DELTAP+DELTAP1+DELTAP2+DELTAP3;
A=(pi*Dtp^2)/4;
Qg= Vgp*A;
Pot=(PER*Qg)/745.7;
set(handles.edit4, 'string', Pot)

CODIGO DEL SUBPROGRAMA DISEÑO DE CICLONES

% --- Executes just before CICLONES1 is made visible.
function CICLONES1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
a=imread('imagenfondouis.bmp');
image(a)
axis off

```

```

% Choose default command line output for CICLONES1
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

axes(handles.ciclon)

handles.imagen=imread('ciclon.bmp');

imagesc(handles.imagen)

axis off

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Ms R dg Vge Ds DELTAP

%PROGRAMA DE DISEÑO DE CICLONES O SEPARADORES

%IDENTIFICACION DE VARIABLES

Ms = str2double(get(handles.edit18, 'String'));
R = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
Vge = str2double(get(handles.salida, 'String'));
dg = str2double(get(handles.edit23, 'String'));
Deq = str2double(get(handles.edit26, 'String'));

%CALCULO DE CAUDALES DE GAS

Ms1 = Ms/3600;

Mg = Ms1/R;

Qg = Mg/dg;

%CALCULO DE GEOMETRIA DEL CICLÓN

Ae=Qg/Vge;

Dt=sqrt((4*Ae)/pi);

Dc=sqrt(Ae/0.125);

```

```

h = 2*Dc;

z = 2*Dc;

Ds = Dc/2;

B = Dc/4;

b = Dc/4;

a = Dc/2;

S = Dc/1.33;

%CÁLCULO DE LA RESUSPENSION

Al=1440*Deq+1.96;

Be=1100*Deq+2.5;

Vs=((4*Ms1*(10^Al)*(9.81^(Be/2))*(Dt^((Be/2)-2)))/(pi*dg))^(1/(Be+1));

Re=Vge/Vs; %Resuspension

%CALCULO DE LAS PERDIDAS EN EL CICLÓN

Nh=(16*a*b)/(Ds^2);

DELTAP = 0.5*dg*(Vge^2)*Nh;

set(handles.edit9, 'string', Dc)

set(handles.edit10, 'string', h)

set(handles.edit11, 'string', z)

set(handles.edit12, 'string', Ds)

set(handles.edit13, 'string', B)

set(handles.edit14, 'string', b)

set(handles.edit15, 'string', a)

set(handles.edit17, 'string', S)

set(handles.edit16, 'string', DELTAP)

% --- Executes when selected object is changed in uipanel9.

function uipanel9_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)

if hObject == handles.u

```

```

        set(handles.salida, 'String', '15.2');
elseif hObject == handles.d
        set(handles.salida, 'String', '17');
elseif hObject == handles.t
        set(handles.salida, 'String', '19');
elseif hObject == handles.c
        set(handles.salida, 'String', '22');
elseif hObject == handles.ci
        set(handles.salida, 'String', '25');
elseif hObject == handles.s
        set(handles.salida, 'String', '27.4');
end

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

    Ms = str2double(get(handles.edit18, 'String'));
    R = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
    Vge = str2double(get(handles.salida, 'String'));
    dg = str2double(get(handles.edit23, 'String'));
    Deq = str2double(get(handles.edit26, 'String'));

    %CALCULO DE CAUDALES DE GAS

    Ms1 = Ms/3600;
    Mg = Ms1/R;
    Qg = Mg/dg;

    %CALCULO DE GEOMETRIA DEL CICLÓN

    Ae=Qg/Vge;
    Dt=sqrt((4*Ae)/pi);
    Al=1440*Deq+1.96;

```

```

Be=1100*Deq+2.5;
Vs=((4*Ms1*(10^A1)*(9.81^(Be/2))*(Dt^((Be/2)-2)))/(pi*dg))^(1/(Be+1));

%CALCULO DE RESUSPENSION

Re=Vge/Vs;

set(handles.edit24, 'string', Re)

% --- Executes when selected object is changed in uipanel10.
function uipanel10_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
if hObject == handles.frijol
    set(handles.edit26, 'String', '0.01003');
elseif hObject == handles.maiz
    set(handles.edit26, 'String', '0.0095');
elseif hObject == handles.arroz
    set(handles.edit26, 'String', '0.00448');
elseif hObject == handles.sorgo
    set(handles.edit26, 'String', '0.00156');
elseif hObject == handles.cebada
    set(handles.edit26, 'String', '0.0055');
elseif hObject == handles.arveja
    set(handles.edit26, 'String', '0.00715');
end

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
programageneral

SUBMENU DE DISEÑO DE TUBERIA

% --- Executes just before Perdidas_tuberia is made visible.

```

```

function Perdidas_tuberia_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)

    a=imread('imagenfondo.JPG');

    image(a)

    axis off

    % Choose default command line output for Perdidas_tuberia
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Perdidas_tuberia wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
Seleccion_diametro_succion

% --- Executes on button press in pushbutton10.
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
Seleccion_diametro_presion

% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
Perdidas_tuberia_succion

% --- Executes on button press in pushbutton12.
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)
Perdidas_tuberia_presion

% --- Executes on button press in pushbutton13.
function pushbutton13_Callback(hObject, eventdata, handles)

global DPTTS DPTTP PTTT

```

```

PTTT=DPTTS+DPTTP;

set(handles.edit12, 'string', PTTT)

% --- Executes on button press in pushbutton14.

function pushbutton14_Callback(hObject, eventdata, handles)

Programageneral

SUBPROGRAMA DE SELECCION DIAMETRO SUCCION

% --- Executes just before Seleccion_diametro_succion is made visible.

function Seleccion_diametro_succion_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)

    a=imread('imagenfondouis.bmp');

image(a)

axis off

% Choose default command line output for Seleccion_diametro_succion

handles.output = hObject;

% Update handles structure

guidata(hObject, handles);

% --- Executes when selected object is changed in uipanel2.

function uipanel2_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)

if hObject == handles.uno

    set(handles.edit1, 'String', '760');

elseif hObject == handles.dos

    set(handles.edit1, 'String', '760');

elseif hObject == handles.tres

    set(handles.edit1, 'String', '720');

elseif hObject == handles.cuatro

    set(handles.edit1, 'String', '710');

```

```

elseif hObject == handles.cinco
    set(handles.edit1,'String','700');
elseif hObject == handles.seis
    set(handles.edit1,'String','580');
elseif hObject == handles.siete
    set(handles.edit1,'String','436');
end

if hObject == handles.uno
    set(handles.edit2,'String','25.92');
elseif hObject == handles.dos
    set(handles.edit2,'String','10.22');
elseif hObject == handles.tres
    set(handles.edit2,'String','24.56');
elseif hObject == handles.cuatro
    set(handles.edit2,'String','18.55');
elseif hObject == handles.cinco
    set(handles.edit2,'String','16.63');
elseif hObject == handles.seis
    set(handles.edit2,'String','19.12');
elseif hObject == handles.siete
    set(handles.edit2,'String','19.61');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    global Dts Mss
    Vgr = str2double(get(handles.edit2, 'String'));

```

```

dg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
Mss = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
Rs = str2double(get(handles.edit11, 'String'));

Mss1=Mss/3600;

Mg=Mss1/Rs;

Qg=Mg/dg;

Ats=Qg/Vgr;

Dts= sqrt((4*Ats)/pi);

Dtsin=Dts*39.37;

set(handles.edit3, 'string', Dts)
set(handles.edit10, 'string', Dtsin)
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rs

Vgr = str2double(get(handles.edit2, 'String'));
dg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
Mss = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
Dts = str2double(get(handles.edit3, 'String'));
p = str2double(get(handles.edit12, 'String'));

Mss1=Mss/3600;

A=(pi*Dts^2)/4;

Qg=Vgr*p*A;

Mgs=Qg*dg;

Rs=Mss1/Mgs;

set(handles.edit11, 'string', Rs)

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

    dg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));

p=(ds)/(ds+(dg/ds));

set(handles.edit12, 'string', p)

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

Perdidas_tuberia_succion

SUBPROGRAMA SELECCION DIAMETRO PRESION

% --- Executes just before Seleccion_diametro_presion is made visible.
function Seleccion_diametro_presion_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)

a=imread('imagenfondouis.bmp');

image(a)

axis off

% Choose default command line output for Seleccion_diametro_presion
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Dtp

Vgr = str2double(get(handles.edit2, 'String'));

dg = str2double(get(handles.edit3, 'String'));

Msp = str2double(get(handles.edit4, 'String'));

Rp = str2double(get(handles.edit8, 'String'));

```

```

Msp1=Msp/3600;
Mg=Msp1/Rp;
Qg=Mg/dg;
Atp=Qg/Vgr;
Dtp= sqrt((4*Atp)/pi);
Dtpin=Dtp*39.37;

set(handles.edit5, 'string', Dtp)
set(handles.edit6, 'string', Dtpin)

% --- Executes when selected object is changed in uipanel1.
function uipanel1_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
if hObject == handles.uno
    set(handles.edit1, 'String', '760');
elseif hObject == handles.dos
    set(handles.edit1, 'String', '760');
elseif hObject == handles.tres
    set(handles.edit1, 'String', '720');
elseif hObject == handles.cuatro
    set(handles.edit1, 'String', '710');
elseif hObject == handles.cinco
    set(handles.edit1, 'String', '700');
elseif hObject == handles.seis
    set(handles.edit1, 'String', '580');
elseif hObject == handles.siete
    set(handles.edit1, 'String', '436');
end

```

```

if hObject == handles.uno
    set(handles.edit2, 'String', '25.92');
elseif hObject == handles.dos
    set(handles.edit2, 'String', '10.22');
elseif hObject == handles.tres
    set(handles.edit2, 'String', '24.56');
elseif hObject == handles.cuatro
    set(handles.edit2, 'String', '18.55');
elseif hObject == handles.cinco
    set(handles.edit2, 'String', '16.63');
elseif hObject == handles.seis
    set(handles.edit2, 'String', '19.12');
elseif hObject == handles.siete
    set(handles.edit2, 'String', '19.61');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
dg = str2double(get(handles.edit3, 'String'));
ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
p=(ds)/(ds+(dg/ds));
set(handles.edit7, 'string', p)

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rp
Vgr = str2double(get(handles.edit2, 'String'));    %Velocidad de
transporte recomendada

```

```

dg = str2double(get(handles.edit3, 'String'));
Msp = str2double(get(handles.edit4, 'String'));
Dtp = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
p = str2double(get(handles.edit7, 'String'));
Msp1=Msp/3600;
A=(pi*Dtp^2)/4;
Qg=Vgr*p*A;
Mgp=Qg*dg;
Rp=Msp1/Mgp;
set(handles.edit8, 'string', Rp)
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
Perdidas_tuberia_presion
SUBPROGRAMA PÉRDIDAS ETAPA SUCCION
% --- Executes when selected object is changed in uipanel1.
function uipanel1_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
if hObject == handles.uno
    set(handles.edit1, 'String', '760');
elseif hObject == handles.dos
    set(handles.edit1, 'String', '760');
elseif hObject == handles.tres
    set(handles.edit1, 'String', '720');
elseif hObject == handles.cuatro
    set(handles.edit1, 'String', '710');
elseif hObject == handles.cinco
    set(handles.edit1, 'String', '700');
elseif hObject == handles.seis

```

```

        set(handles.edit1, 'String', '580');
elseif hObject == handles.siete
        set(handles.edit1, 'String', '436');
end

if hObject == handles.uno
        set(handles.edit2, 'String', '0.01003');
elseif hObject == handles.dos
        set(handles.edit2, 'String', '0.00156');
elseif hObject == handles.tres
        set(handles.edit2, 'String', '0.0095');
elseif hObject == handles.cuatro
        set(handles.edit2, 'String', '0.0055');
elseif hObject == handles.cinco
        set(handles.edit2, 'String', '0.00448');
elseif hObject == handles.seis
        set(handles.edit2, 'String', '0.00715');
elseif hObject == handles.siete
        set(handles.edit2, 'String', '0.01');
end

if hObject == handles.uno
        set(handles.edit4, 'String', '0.306');
elseif hObject == handles.dos
        set(handles.edit4, 'String', '0.344');
elseif hObject == handles.tres
        set(handles.edit4, 'String', '0.384');

```

```

elseif hObject == handles.cuatro
    set(handles.edit4, 'String', '0.364');
elseif hObject == handles.cinco
    set(handles.edit4, 'String', '0.306');
elseif hObject == handles.seis
    set(handles.edit4, 'String', '0.213');
elseif hObject == handles.siete
    set(handles.edit4, 'String', '0.24');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Vgs = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
Vss=0.8*Vgs;
set(handles.edit5, 'string', Vss)

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

Vgs = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
v = str2double(get(handles.edit7, 'String'));
Dts = str2double(get(handles.edit11, 'String'));
Re=(Vgs*Dts)/v;
f=64/Re
set(handles.edit8, 'string', f)

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Rs
Mss = str2double(get(handles.edit10, 'String')); %Capacidad

```

```

dg = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
Dts = str2double(get(handles.edit11, 'String'));
p = str2double(get(handles.edit20, 'String'));

Mss1=Mss/3600;

Mg=Mss1/Rs;

Ats= (pi*Dts^2)/4;

Vgs = Mg/(dg*p*Ats);

set(handles.edit9, 'string', Vgs
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Dts
set(handles.edit11, 'string', Dts)
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
Vfs=1.1*sqrt(ds);
set(handles.edit12, 'string', Vfs)
% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
global p
dg = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));

p=(ds)/(ds+(dg/ds));

set(handles.edit13, 'string', p)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton7.

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pe Rs

dg = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
cfs = str2double(get(handles.edit4, 'String'));
Vss = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
cfg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
Vgs = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
Dts = str2double(get(handles.edit11, 'String'));
Vfs = str2double(get(handles.edit12, 'String'));
p = str2double(get(handles.edit20, 'String'));
Lh = str2double(get(handles.edit17, 'String'));

n=50;

a=0;

h=(Lh-a)/n;

P=100000;

x=0;

T(1,1)=P;

T(2,1)=x;

for i=1:n;

k1=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(9.8*(Vfs/Vss)+(cfs
*Vss^2)/(2*Dts)))]/[-
1+((p*dg*Vgs^2)/P)+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/P)];

k2=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(9.8*(Vfs/Vss)+(cfs

```

```

*Vss^2)/(2*Dts)))]/[-
1+((p*dg*Vgs^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/(P+h/2))];

k3=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(9.8*(Vfs/Vss)+(cfs
*Vss^2)/(2*Dts)))]/[-
1+((p*dg*Vgs^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/(P+h/2))];

k4=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(9.8*(Vfs/Vss)+(cfs
*Vss^2)/(2*Dts)))]/[-
1+((p*dg*Vgs^2)/(P+h))+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/(P+h))];

    P=P+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;

    x=a+i*h;

    T(1,i+1)=P;

    T(2,i+1)=x;

end

Pe=(T(1,1))-(T(1,n));

set(handles.edit14, 'string', Pe)

% --- Executes on button press in pushbutton8.

function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pv Rs

dg = str2double(get(handles.edit6, 'String'));

cfs = str2double(get(handles.edit4, 'String'));

Vss = str2double(get(handles.edit5, 'String'));

cfg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));

Vgs = str2double(get(handles.edit9, 'String'));

Dts = str2double(get(handles.edit11, 'String'));

p = str2double(get(handles.edit20, 'String'));

```

```

Lv = str2double(get(handles.edit18, 'String'));

n=50;

a=0;

h=(Lv-a)/n;

P=100000;

x=0;

T(1,1)=P;

T(2,1)=x;

for i=1:n;

k1=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(p*dg*9.8*(1+Rs*Vgs/Vss))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(cfs/(2*Dts))*Vss^2)]/[-1+((p*dg*Vgs^2)/P)+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/P)];

k2=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(p*dg*9.8*(1+Rs*Vgs/Vss))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(cfs/(2*Dts))*Vss^2)]/[-1+((p*dg*Vgs^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/(P+h/2))];

k3=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(p*dg*9.8*(1+Rs*Vgs/Vss))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(cfs/(2*Dts))*Vss^2)]/[-1+((p*dg*Vgs^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/(P+h/2))];

k4=h*[((cfg*p*dg*Vgs^2)/(2*Dts))+(p*dg*9.8*(1+Rs*Vgs/Vss))+(Rs*p*dg*(Vgs/Vss)*(cfs/(2*Dts))*Vss^2)]/[-1+((p*dg*Vgs^2)/(P+h))+((0.5*p*dg*Rs*Vgs*(Vgs+Vss))/(P+h))];

P=P+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;

x=a+i*h;

T(1,i+1)=P;

T(2,i+1)=x;

end

Pv=(T(1,1))-(T(1,n));

```

```

set(handles.edit15, 'string', Pv)

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pe Pv DPTTS

DPTTS = Pe+Pv;

set(handles.edit16, 'string', DPTTS)

% --- Executes on button press in pushbutton10.
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)

global p

dg = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
Vgs = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
Vss = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));

Rs= (Vss*(1-p)*ds)/(Vgs*p*dg);

set(handles.edit19, 'string', Rs)

global p

Vgs = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
dg = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
Rs = str2double(get(handles.edit19, 'String'));

Mss1=Rs*Vgs*p*dg;

Mss=Mss1*3600;

set(handles.edit10, 'string', Mss)

% --- Executes on button press in pushbutton12.
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)

dg = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));

p=(ds)/(ds+(dg/ds));

```

```

set(handles.edit20, 'string', p)

% --- Executes on button press in pushbutton13.
function pushbutton13_Callback(hObject, eventdata, handles)
Seleccion_diametro_succion

% --- Executes on button press in pushbutton14.
function pushbutton14_Callback(hObject, eventdata, handles)
Perdidas_tuberia

```

CODIGO SUBPROGRAMA PERDIDAS ETAPA PRESION

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rp

Vgp = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
p = str2double(get(handles.edit12, 'String'));
dg = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
Vsp = (Rp*Vgp*p*dg)/((1-p)*ds);
set(handles.edit4, 'string', Vsp)

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

Dtp = str2double(get(handles.edit10, 'String'));
v = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
Vgp = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
Re=(Vgp*Dtp)/v;
f=64/Re;
set(handles.edit7, 'string', f)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rp Vgp

Msp = str2double(get(handles.edit9, 'String')); %Capacidad
dg = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
Dtp = str2double(get(handles.edit10, 'String'));
p = str2double(get(handles.edit12, 'String'));

Msp1=Msp/3600;

Mg = Msp1/Rp;

Qg = Mg/dg;

At=(pi*Dtp^2)/4;

Vgp = Qg/(At*p);

set(handles.edit8, 'string', Vgp)

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Dtp

set(handles.edit10, 'string', Dtp)

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));

Vfp = 1.1*sqrt(ds);

set(handles.edit11, 'string', Vfp)

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)

dg = str2double(get(handles.edit5, 'String'));

ds = str2double(get(handles.edit1, 'String'));

```

```

p=(ds)/(ds+(dg/ds));

set(handles.edit12, 'string', p)

% --- Executes when selected object is changed in uipanel1.

function uipanel1_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)

if hObject == handles.uno

    set(handles.edit1, 'String', '760');

elseif hObject == handles.dos

    set(handles.edit1, 'String', '760');

elseif hObject == handles.tres

    set(handles.edit1, 'String', '720');

elseif hObject == handles.cuatro

    set(handles.edit1, 'String', '710');

elseif hObject == handles.cinco

    set(handles.edit1, 'String', '700');

elseif hObject == handles.seis

    set(handles.edit1, 'String', '580');

elseif hObject == handles.siete

    set(handles.edit1, 'String', '436');

end

if hObject == handles.uno

    set(handles.edit2, 'String', '0.01003');

elseif hObject == handles.dos

    set(handles.edit2, 'String', '0.00156');

elseif hObject == handles.tres

    set(handles.edit2, 'String', '0.0095');

elseif hObject == handles.cuatro

```

```

        set(handles.edit2, 'String', '0.0055');
elseif hObject == handles.cinco
        set(handles.edit2, 'String', '0.00448');
elseif hObject == handles.seis
        set(handles.edit2, 'String', '0.00715');
elseif hObject == handles.siete
        set(handles.edit2, 'String', '0.01');
end

if hObject == handles.uno
        set(handles.edit3, 'String', '0.306');
elseif hObject == handles.dos
        set(handles.edit3, 'String', '0.344');
elseif hObject == handles.tres
        set(handles.edit3, 'String', '0.384');
elseif hObject == handles.cuatro
        set(handles.edit3, 'String', '0.364');
elseif hObject == handles.cinco
        set(handles.edit3, 'String', '0.306');
elseif hObject == handles.seis
        set(handles.edit3, 'String', '0.213');
elseif hObject == handles.siete
        set(handles.edit3, 'String', '0.24');
end

% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rp Pep

```

```

dg = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
cfs = str2double(get(handles.edit3, 'String'));
Vsp = str2double(get(handles.edit4, 'String'));
cfg = str2double(get(handles.edit7, 'String'));
Vgp = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
Dtp = str2double(get(handles.edit10, 'String'));
Vfp = str2double(get(handles.edit11, 'String'));
p = str2double(get(handles.edit12, 'String'));
Lh = str2double(get(handles.edit13, 'String'));

n=50;

a=0;

h=(Lh-a)/n;

P=100000;

x=0;

T(1,1)=P;

T(2,1)=x;

for i=1:n;

k1=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+(Rp*p*dg*(Vgp/Vsp)*(9.8*(Vfp/Vsp)+(cfs
*Vsp^2)/(2*Dtp)))]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/P)+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/P)];

k2=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+(Rp*p*dg*(Vgp/Vsp)*(9.8*(Vfp/Vsp)+(cfs
*Vsp^2)/(2*Dtp)))]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/(P+h/2))];

k3=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+(Rp*p*dg*(Vgp/Vsp)*(9.8*(Vfp/Vsp)+(cfs

```

```

*Vsp^2)/(2*Dtp)))]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/(P+h/2))];

k4=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+((Rp*p*dg*(Vgp/Vsp)*(9.8*(Vfp/Vsp))+((cfs
*Vsp^2)/(2*Dtp)))]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/(P+h))+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/(P+h))];

    P=P+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;

    x=a+i*h;

    T(1,i+1)=P;

    T(2,i+1)=x;

end

Pep=(T(1,1))-(T(1,n));

set(handles.edit15, 'string', Pep)

% --- Executes on button press in pushbutton8.

function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rp Pvp

dg = str2double(get(handles.edit5, 'String'));

cfs = str2double(get(handles.edit3, 'String'));

Vsp = str2double(get(handles.edit4, 'String'));

cfg = str2double(get(handles.edit7, 'String'));

Vgp = str2double(get(handles.edit8, 'String'));

Dtp = str2double(get(handles.edit10, 'String'));

p = str2double(get(handles.edit12, 'String'));

Lv = str2double(get(handles.edit14, 'String'));

n=50;

a=0;

```

```

h=(Lv-a)/n;

P=100000;

x=0;

T(1,1)=P;

T(2,1)=x;

for i=1:n;

k1=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+(p*dg*9.8*(1+Rp*Vgp/Vsp))+(Rp*p*dg*(Vg
p/Vsp)*(cfs/(2*Dtp))*Vsp^2)]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/P)+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/P)];

k2=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+(p*dg*9.8*(1+Rp*Vgp/Vsp))+(Rp*p*dg*(Vg
p/Vsp)*(cfs/(2*Dtp))*Vsp^2)]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/(P+h/2))];

k3=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+(p*dg*9.8*(1+Rp*Vgp/Vsp))+(Rp*p*dg*(Vg
p/Vsp)*(cfs/(2*Dtp))*Vsp^2)]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/(P+h/2))+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/(P+h/2))];

k4=h*[((cfg*p*dg*Vgp^2)/(2*Dtp))+(p*dg*9.8*(1+Rp*Vgp/Vsp))+(Rp*p*dg*(Vg
p/Vsp)*(cfs/(2*Dtp))*Vsp^2)]/[-
1+((p*dg*Vgp^2)/(P+h))+((0.5*p*dg*Rp*Vgp*(Vgp+Vsp))/(P+h))];

P=P+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;

x=a+i*h;

T(1,i+1)=P;

T(2,i+1)=x;

end

Pvp=(T(1,1))-(T(1,n));

set(handles.edit16, 'string', Pvp)

% --- Executes on button press in pushbutton9.

```

```

function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pep Pvp DPTTP

DPTTP = Pep+Pvp;

set(handles.edit17, 'string', DPTTP)

% --- Executes on button press in pushbutton10.

function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)

Seleccion_diametro_presion

% --- Executes on button press in pushbutton11.

function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)

Perdidas_tuberia

CODIGO SUBPROGRAMA PERDIDAS EN ACCESORIOS

% --- Executes just before Perdidas_accesorios is made visible.

function Perdidas_accesorios_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)

a=imread('imagenfondouis.bmp');

image(a)

axis off

% Choose default command line output for Perdidas_accesorios

handles.output = hObject;

% Update handles structure

guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in pushbutton1.

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Vgp

set(handles.edit7, 'string', Vgp)

```

```

% --- Executes when selected object is changed in uipanel2.
function uipanel2_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)

if hObject == handles.uno
    set(handles.edit10, 'String', '760');
elseif hObject == handles.dos
    set(handles.edit10, 'String', '760');
elseif hObject == handles.tres
    set(handles.edit10, 'String', '720');
elseif hObject == handles.cuatro
    set(handles.edit10, 'String', '710');
elseif hObject == handles.cuatro
    set(handles.edit10, 'String', '700');
elseif hObject == handles.seis
    set(handles.edit10, 'String', '580');
elseif hObject == handles.siete
    set(handles.edit10, 'String', '436');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pac

dm = str2double(get(handles.edit18, 'String'));
Vgp = str2double(get(handles.edit7, 'String'));
N = str2double(get(handles.edit1, 'String'));
K = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
Pac = K*N*0.5*dm*(Vgp^2);
set(handles.edit12, 'string', Pac)

% --- Executes on button press in pushbutton6.

```

```

function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pav

dm = str2double(get(handles.edit18, 'String'));

Vgp = str2double(get(handles.edit7, 'String'));

N1 = str2double(get(handles.edit9, 'String'));

K1 = str2double(get(handles.edit15, 'String'));

Pav = K1*N1*0.5*dm*(Vgp^2);

set(handles.edit16, 'string', Pav)

% --- Executes on button press in pushbutton7.

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Pav Pac Pat

Pat = Pav+Pac;

set(handles.edit17, 'string', Pat)

% --- Executes on button press in pushbutton8.

function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)

dg = str2double(get(handles.edit4, 'String'));

ds = str2double(get(handles.edit10, 'String'));

dm=(ds*0.0005)+(dg*0.9995);

set(handles.edit18, 'string', dm)

% --- Executes on button press in pushbutton11.

function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)

Programageneral

CODIGO SUBPROGRAMA PERDIDAS EN SECCION DE SOLO AIRE

% --- Executes just before Perdidas_solo_aire is made visible.

```

```

function Perdidas_solo_aire_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)

a=imread('imagenfondouis.bmp');

image(a)

axis off

% Choose default command line output for Perdidas_solo_aire

handles.output = hObject;

% Update handles structure

guidata(hObject, handles)

% --- Executes on button press in pushbutton5.

function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rs Vg Ds

dg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));

Mss = str2double(get(handles.edit14, 'String'));

Mss1 = Mss/3600;           %Flujo masico de material en [Kg/s]

Mg = Mss1/Rs;

Qg = Mg/dg;

A=(pi*Ds^2)/4;

Vg=Qg/A;

set(handles.edit11, 'string', Vg)

% --- Executes on button press in pushbutton6.

function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Ds

set(handles.edit12, 'string', Ds)

% --- Executes on button press in pushbutton1.

```

```

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global DELTAP1 DELTAP2 DELTAP3 DELTAPT

DELTAPT= DELTAP1+DELTAP2+DELTAP3;

set(handles.edit4, 'string', DELTAPT

% --- Executes on button press in pushbutton2.

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

global DELTAP1

dg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
v = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
Lh = str2double(get(handles.edit6, 'String'));
Vga = str2double(get(handles.edit11, 'String'));
Dta = str2double(get(handles.edit12, 'String'));

Re=(dg*Vga*Dta)/v;

f=64/Re;

DELTAP1 = (f*Lh*dg*(Vga^2))/(2*Dta);

set(handles.edit1, 'string', DELTAP1)

% --- Executes on button press in pushbutton3.

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Vg Ds DELTAP2

dg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
v = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
Lv = str2double(get(handles.edit7, 'String'));

Re=(dg*Vg*Ds)/v;

f=64/Re;

DELTAP2 = (f*Lv*dg*(Vg^2))/(2*Ds);

set(handles.edit2, 'string', DELTAP2)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton4.

function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Vg DELTAP3

dg = str2double(get(handles.edit8, 'String'));
v = str2double(get(handles.edit9, 'String'));
N = str2double(get(handles.edit5, 'String'));
K = str2double(get(handles.edit10, 'String'));

DELTAP3 = K*N*0.5*dg*(Vg^2);

set(handles.edit3, 'string', DELTAP3)

% --- Executes on button press in pushbutton7.

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

Programageneral

```