

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAISO – CHILE



DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE
TRANSPORTE EN CAÑERIAS VERTICALES PARA
UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

DIEGO ALEJANDRO COQUI DÍAZ

TRABAJO DE TÍTULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA:

Ph.D. FRANCISCO CABREJOS M.

PROFESOR CORREFERENTE:

Mg.- Ing. GUILLERMO GONZÁLEZ B.

NOVIEMBRE 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco ante todo a mis abuelos por su incondicional amor y entrega, haciendo posible pavimentar el camino de mi vida. Muchas gracias, los amaré siempre.

A mis grandiosos hermanos, por el constante apoyo y aprecio, fortaleciendo cada día la gran amistad que tenemos.

A mi hermosa madre, por su compañía, amor, garra y esfuerzo por sacar a su familia adelante. Eres la mamá más linda del mundo.

A mi gran compañera de vida, la más cordial, tierna, inteligente y aguerrida persona que he tenido la posibilidad de conocer, gracias por aguantar tanta rabieta y locuras de mi parte, gracias Babita, Te amo.

A cada persona que de uno u otro modo hizo posible que pudiera llegar hasta estas instancias, a mis primos, tíos, sobrinos, suegros, amigos, cuñados y familia en general.

Finalmente, a cada uno de los profesores con los cuales tuve la oportunidad de aprender en el trance de la vida, a cada docente y personal del Departamento de Mecánica de la USM, a la señora Jaqueline por su buena disposición para ayudar en los laboratorios; y en especial a mi profesor guía Francisco Cabrejos, por la constante motivación, enseñanza y muy buena voluntad en cada etapa de este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de lograr determinar la velocidad mínima de transporte en cañerías verticales para diseñar un sistema de transporte neumático. Con este fin, se construyó e implementó un sistema de transporte neumático constituido principalmente de cañerías orientadas verticalmente, de aproximadamente 4,5 metros de altura, un sistema de alimentación de sólidos, un separador de partículas, y un turbosoplador para proporcionar energía al sistema. El montaje de esta configuración se realizó en el Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (CITRAM) dependiente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Para el proceso de experimentación se utilizaron materiales sólidos de uso común, como es el pellet de plástico, griz de maíz, arroz, azúcar y arena, los cuales fueron debidamente caracterizados según su densidad de partícula, tamaño de partícula y contenido de humedad.

La mayoría de las zonas pertenecientes al sistema de transporte neumático son de acrílico transparente, lo cual permitió observar el comportamiento que los sólidos desarrollan dentro de la cañería, y se obtuvieron los diagramas de estado que describen el funcionamiento del sistema neumático para cada material.

Además, se midió de forma experimental la velocidad de purga o vaciado de una cañería tapada, con el fin de relacionarla empíricamente con la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual.

Con todo esto, se presentan relaciones empíricas que modelan el comportamiento de la velocidad mínima de transporte y la velocidad de purga en un sistema neumático vertical, bajo determinadas condiciones de operación.

ABSTRACT

The present work was carried out with the objective of determining the minimum transport velocity in vertical pipes, to design a pneumatic transport system. A pneumatic conveying system consists primarily of vertically oriented pipes, approximately 4.5 meters high, a solids feed system, a particle separator, and a turbo-blower implemented to provide the power to the system. The assembly of this configuration was done in the Research Center for the Transport of Materials (CITRAM) of the Department of Mechanical Engineering of the Universidad Técnica Federico Santa María.

For the experimentation process, bulk materials of common use, such as Plastic Pellets, Corn Grits, Rice, Sugar and Sand were used, which were properly characterized according to their particle density, particle size and moisture content.

Most of the areas belonging to the pneumatic transport system are transparent made of acrylic, which gives the possibility of observing the behavior that the solid develop within the pipes, also the state diagrams describing the operation of the pneumatic system were obtained.

In addition, the velocity of purging or emptying of a plugged pipe was measured experimentally, in order to relate it empirically to the terminal settling velocity of a single particle.

With all of this, empirical relations that model the behavior of the minimum transport velocity and the purge velocity in a vertical pneumatic system, under certain operating conditions, are presented.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT.....	iii
TABLA DE CONTENIDOS	iv
LISTADO DE FIGURAS	vii
NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA	ix
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos.....	4
CAPITULO 2: CONCEPTOS Y FUNDAMENTACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE NEUMÁTICO.....	5
2.1 Definición	5
2.2 Características principales.....	5
2.3 Ventajas y limitaciones	6
2.4 Aplicaciones comunes.....	7
2.5 Clasificación de sistemas de transporte neumático	8
2.5.1 Según presión del gas de transporte	8
2.5.2 Según reutilización del gas de transporte.....	11
2.5.3 Según concentración de sólidos	12
2.5.4 Según velocidad de partículas y modo de operación	13
2.6 Materiales sólidos a granel.....	13

2.6.1	Características físicas de un material sólido a granel.....	14
2.6.2	Propiedades de fluidez de un material sólido a granel.....	15
2.7	Componentes principales de un sistema de transporte neumático	17
2.8	Tipos de flujo y diagrama de estado	18
2.9	Fundamentación teórica	22
2.9.1	Velocidad de transporte	22
2.9.2	Caída de presión.....	26
CAPITULO 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO.....		28
3.1	Sistema motriz	28
3.2	Zona de alimentación.....	29
3.3	Zona de transporte.....	32
3.4	Zona de separación y descarga de sólidos.....	33
CAPITULO 4: EXPERIMENTACIÓN.....		35
4.1	Características del sistema de transporte neumático implementado	35
4.2	Instrumentación utilizada.....	36
4.3	Parámetros a medir	37
4.3.1	Velocidad del gas de transporte	37
4.3.2	Caída de presión total del sistema.....	38
4.3.3	Flujo de sólidos	39
4.4	Materiales ensayados	40
4.5	Metodología de trabajo	42
4.6	Curva característica del sistema.....	44

CAPÍTULO 5: RESULTADOS	45
5.1 Resultados obtenidos	45
5.2 Análisis de resultados	51
5.2.1 Velocidad mínima y crítica de transporte	51
5.2.2 Velocidad de purga	57
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
6.1 Conclusiones	61
6.2 Recomendaciones	62
REFERENCIAS.....	63
ANEXOS	65
A. Planos.....	65
B Equipo motriz.....	75
C Instrumentación.....	79
D. Características físicas de los materiales a granel utilizados	86
E. Calibración de placa orificio	91
F. Curva característica del sistema (aire solo).....	93
G. Tablas de valores medidos	94

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de sistema de transporte neumático de presión positiva [7].....	9
Figura 2: Esquema de sistema de transporte neumático de presión negativa [7].....	9
Figura 3: Esquema de sistema combinado de transporte neumático [7].	10
Figura 4: Esquema de sistema cerrado de presión positiva de transporte neumático de sólidos [7].....	11
Figura 5: Tipos de flujos desarrollados en una cañería vertical [2].	18
Figura 6: Esquema de un diagrama de estado [2].	19
Figura 7: Diagrama de estado para un sistema de transporte neumático con cañerías en orientación vertical [2].....	20
Figura 8: Determinación del punto de operación de un sistema de transporte neumático en fase diluida [2].....	21
Figura 9: Soplador, tubo de succión y manguera corrugada de salida de aire disponibles.	29
Figura 10: Representación y vista actual del silo alimentador y la tolva de descarga.	30
Figura 11: Tolva de alimentación y sistema control de flujo, más empalme de alimentación considerados en el diseño.....	31
Figura 12: Cañerías montadas a la estructura de madera del sistema de transporte neumático construido.....	32
Figura 13: Representación y vista actual del separador de partículas diseñado y construido.	33
Figura 14: Representación del sistema de transporte neumático vertical diseñado.	34
Figura 15: Instrumentos utilizados en el proceso de calibración de la placa orificio.	38
Figura 16: Silo lleno con griz de maíz y marcas de altura del material.	39
Figura 17: Burbujeo de material al inicio del ensayo de purga.....	43
Figura 18: Curva característica del sistema de transporte neumático.	44
Figura 19: Diagrama de estado del pellet de plástico para tres flujos de sólidos.....	46
Figura 20: Diagrama de estado del griz de maíz para tres flujos de sólidos.	47
Figura 21: Diagrama de estado del arroz para tres flujos de sólidos.....	47
Figura 22: Diagrama de estado del azúcar para tres flujos de sólidos.	48
Figura 23: Diagrama de estado de la arena para tres flujos de sólidos.	48

Figura 24: Velocidad de purga (U_{pu}) en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual (U_t) para todos los materiales ensayados.....	50
Figura 25: Relación de la velocidad mínima (U_{min}/U_t) en función de la relación de carga (μ) en el sistema.....	52
Figura 26: Relación de la velocidad crítica (U_{crit}/U_t) en función de la relación de carga (μ) en el sistema.....	52
Figura 27: Tendencia lineal de los factores de velocidad mínima y crítica en función de la relación de carga en el sistema.....	53
Figura 28: Dispersión y desviación de velocidades mínimas de transporte calculadas con respecto a velocidades medidas.	54
Figura 29: Dispersión y desviación de velocidades críticas de transporte calculadas con respecto a velocidades medidas.	55
Figura 30: Velocidad de purga (U_{pu}) en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual (U_t).....	57
Figura 31: Variador de frecuencia conectado al motor soplador.	78
Figura 32: Manómetro 1 para la medición de caída de presión en la placa orificio (ΔP_{placa}).	79
Figura 33: Manómetro 2 para la medición de caída de presión total del sistema (ΔP_t).	80
Figura 34: Manómetro 3 para la medición de caída de presión total del sistema (ΔP_t).	80
Figura 35: Tubo pitot y micromanómetro utilizados para la calibración de la placa orificio.	81
Figura 36: Juego de mallas granulométricas disponibles en el CITRAM.....	82
Figura 37: Cronómetro digital utilizado para medir el tiempo de descenso del material en el silo alimentador.....	82
Figura 38: Balanza digital utilizada para pesar los materiales sólidos a ensayar.....	83
Figura 39: Distribución granulométrica de la arena.....	89
Figura 40: Distribución granulométrica del griz de maíz, arroz y arena.	89
Figura 41: Caída de presión en la placa orificio (ΔP_{placa}) en función de la velocidad del gas (U_g), para la obtención de la constante de calibración de la placa (K_{placa}).	92

NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA

C_d	: Coeficiente de arrastre	$[-]$
D	: Diámetro interior de la cañería	$[m]$
D_{acri}	: Diámetro interior de la cañería de acrílico transparente	$[mm]$
D_{pvc}	: Diámetro interior de la cañería de PVC	$[mm]$
d_p	: Diámetro de partícula	$[mm]$
f_g	: Factor de fricción del gas	$[-]$
g	: Aceleración de gravedad	$[m/s^2]$
K_{placa}	: Constante de calibración de la placa orificio	$[-]$
L	: Largo de la cañería	$[m]$
$Q_{máx}$	: Caudal volumétrico máximo entregado por el soplador	$[m^3/min]$
Re	: Número de Reynolds	$[-]$
Re_p	: Número de Reynolds de partícula	$[-]$
U_g	: Velocidad del gas de transporte	$[m/s]$
$U_{g \text{ mín}}$	: Velocidad mínima de transporte	$[m/s]$
$U_{g \text{ crít}}$	: Velocidad crítica de transporte	$[m/s]$
U_t	: Velocidad terminal de caída libre de una partícula individual	$[m/s]$
U_p	: Velocidad de transporte de partículas sólidas	$[m/s]$
U_{pu}	: Velocidad de purga de la cañería	$[m/s]$
U_{ch}	: Velocidad de atascamiento de la cañería	$[m/s]$
W_g	: Flujo másico de gas	$[kg/min]$
W_s	: Flujo másico de sólidos	$[kg/min]$
ΔP_{gas}	: Caída de presión debido al gas de transporte	$[Pa]$
ΔP_t	: Caída de presión total del sistema	$[Pa]$
ΔP_{placa}	: Caída de presión en la placa orificio	$[Pa]$
ρ_g	: Densidad del gas de transporte	$[kg/m^3]$
ρ_s	: Densidad de partícula del material	$[kg/m^3]$
λ_s	: Coeficiente de fricción de sólidos	$[-]$
α_s	: Caída de presión específica	$[-]$
K_s	: Coeficiente de pérdida de carga	$[-]$

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Con el paso de los años, los sistemas de transporte neumático tienen una presencia cada vez mayor en aplicaciones de una amplia gama de industrias a nivel nacional e internacional, como es la minería, industria alimenticia, farmacéutica, entre otras, donde se destina principalmente para el transporte de materiales sólidos a granel.

Las grandes ventajas de implementar un sistema de transporte neumático van enfocadas en un bajo requerimiento de espacio físico para su instalación, además de ser un sistema cerrado, limpio, seguro y no contaminante, dotándole una protección al producto del medio ambiente, y viceversa. Sin embargo, existen ciertas desventajas y limitaciones principalmente referidas al alto consumo energético, en comparación a otras alternativas de transporte de sólidos, y la particularidad de que no todos los materiales pueden ser transportados mediante un sistema neumático.

Para un correcto diseño de un sistema de transporte neumático, es necesario conocer parámetros relevantes como son las velocidades características del material (velocidad mínima de transporte, velocidad terminal de caída libre de una partícula individual, entre otras), la caída de presión ejercida en la configuración, los tipos de flujo que se puedan presentar en el transporte de sólidos, y principalmente las características y propiedades de fluidez de los materiales que se deseen transportar. Cabe mencionar que no existe una norma ni procedimiento universal para el diseño de un sistema de transporte neumático, ya que depende fuertemente de las características del material, y las condiciones de operación en las cuales se trabaja.

Muchos estudios se han realizado a lo largo del tiempo sobre este tipo de sistemas, ya sea en su modo de operación y diseño, como el tipo de materiales y el gas apropiado para transportarlos.

Particularmente para el caso de sistemas de transporte neumático en orientación vertical, existen diversas investigaciones sobre el comportamiento de la mezcla bifásica sólido-gas, y los parámetros que la gobiernan.

Konno H. y Saito S. [1] propusieron una expresión lineal para la velocidad de transporte de partículas sólidas en cañerías verticales bajo condiciones de flujo diluido, basada en la velocidad terminal de caída libre de partícula individual. Cabe destacar que esta relación es ampliamente utilizada en el cálculo de sistemas de transporte neumático en fase diluida. Para este mismo parámetro Yang W. [2] propuso ecuaciones implícitas para la velocidad de transporte de partículas en cañerías horizontales y verticales, basadas en el coeficiente de fricción de sólidos y la velocidad terminal de caída de partícula individual.

Para el caso del fenómeno de “choking” o velocidad de atascamiento en cañerías verticales, Zenz F. [2] fue uno de los primeros investigadores en estudiarlo, observando el movimiento de las partículas sólidas, y el comportamiento del flujo dentro de la cañería a medida que se disminuía paulatinamente la velocidad del gas de transporte, manteniendo constante el flujo de sólidos en la alimentación, hasta que se excede la capacidad de transporte del sistema y colapsa. Por otro lado, Morikawa Y. y Sugita N. [2] propusieron un criterio para determinar la velocidad de “choking” basado en el número de Froude, la relación de carga, y la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual. Según ellos, dicha velocidad puede llegar a ser dos veces la velocidad terminal de partícula, dependiendo del material a transportar.

Leung L., Matsumoto S., y Morikawa Y. y Sugita N. [2] estudiaron los tipos de flujo presentes en cañerías verticales realizando ensayos con diferentes materiales y analizando las fluctuaciones de las señales de presión.

Para la determinación de la caída de presión por fricción en la cañería existen varias correlaciones disponibles en la literatura; una de ellas es el modelo propuesto por Barth W. [3], el cual es independiente de la velocidad de partículas y del espacio vacío en la cañería, pero considera para el caso de la pérdida de energía por fricción de sólidos, un nuevo coeficiente de

fricción (λ_s). Por otro lado, Gasterstädt D. [2] propone un método que define la caída de presión específica (α_s) como el cociente entre la caída de presión total en la cañería sobre la caída de presión por fricción del gas, considerando un nuevo coeficiente de pérdida de carga (K_s).

Rojas D. [4], estudió experimentalmente el efecto del tamaño de partículas de sólidos a granel (particularmente azúcar y sal común) sobre la velocidad mínima de transporte, velocidad óptima, y caída de presión en un sistema de transporte neumático con cañerías verticales. López F. [5] estudió y analizó el efecto de la densidad de partícula sobre los parámetros antes mencionados, sólo que con una gama más amplia de materiales.

Weippert V. [6] desarrolló un programa computacional para el diseño y diagnóstico de sistemas de transporte neumático en fase diluida, para cañerías con orientación horizontal y vertical.

El presente trabajo de titulación pretende aportar con nuevos modelos empíricos y explicaciones sobre la influencia que tiene la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual sobre la velocidad mínima de transporte, y sobre la velocidad necesaria para desatollar una cañería que se encuentra bloqueada por material.

Con el propósito de caracterizar y conocer las velocidades relevantes en el transporte de sólidos a granel en una cañería con disposición vertical, se diseña, construye e implementa un sistema de transporte neumático vertical en el laboratorio CITRAM (Centro de Investigación para el Transporte de Materiales), dependiente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, donde se experimentará y determinará empíricamente la velocidad mínima de transporte y la velocidad de purga para distintos materiales.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de título es determinar una relación empírica para estimar la velocidad mínima de transporte en sistemas de transporte neumático con cañerías verticales, en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual.

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

1. Diseñar e implementar un sistema de transporte neumático para realizar ensayos que conste al menos de cuatro componentes principales: Alimentador, Soplador/Extractor, Cañerías y Separador de partículas.
2. Analizar el comportamiento de parámetros relevantes de distintos materiales sólidos a granel en el sistema de transporte neumático vertical construido.
3. Definir y determinar la velocidad mínima de transporte en sistema de transporte neumático vertical, en función de los parámetros estudiados.

CAPITULO 2: CONCEPTOS Y FUNDAMENTACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

2.1 Definición

Un sistema de transporte neumático tiene como objetivo principal transportar materiales sólidos a granel por medio de un flujo de gas a presión a través de una red de cañerías desde un punto de alimentación hacia uno o varios puntos de descarga. El flujo de gas, que suele ser aire, es el encargado de entregar la energía necesaria al material para ser transportado [7].

2.2 Características principales

Los sistemas de transporte neumático son destinados principalmente en la industria para el transporte de materiales a granel, relativamente finos y secos, con la particularidad que son sistemas cerrados, seguros, sumamente versátiles y adecuados para muchos procesos.

La mayoría de los sistemas de transporte neumático utilizan aire como medio de transporte, aunque existen variadas excepciones que pueden ser empleadas según sea la aplicación y material que se desee transportar, como es el dióxido de carbono, nitrógeno, gases inertes, entre otros.

Este modo de transporte de sólidos a granel se ha ido extendiendo a nivel industrial, por lo que posee una gran significancia en el campo del manejo de materiales, teniendo una amplia gama de aplicaciones que abarcan desde una simple aspiradora doméstica hasta el transporte de sólidos a kilómetros de distancia.

Para el correcto diseño de un sistema de transporte neumático es necesario considerar ciertos factores que permitirán un adecuado funcionamiento, tanto de los materiales que se desee transportar como de las condiciones ambientales y configuración donde se aplique el

sistema. Los materiales preferentes a transportar mediante este sistema corresponden a aquellos materiales secos, no abrasivos, no fibrosos, no cohesivos, relativamente finos, con tamaño de partícula desde algunos micrones hasta rocas de 20 mm como máximo, y que fluyan libremente por gravedad [2].

2.3 Ventajas y limitaciones

Los sistemas de transporte neumático implementados en la industria justifican su uso dada las ventajas que presentan respecto a otros medios de transporte de materiales; sin embargo, también poseen limitaciones que pueden significar la elección de otras alternativas de transporte.

A continuación, se mencionan las principales ventajas y limitaciones presentes en sistemas de transporte neumático:

Ventajas

- Sistemas cerrados, no contaminantes y limpios que aíslan el material y gas de transporte del ambiente.
- Los materiales transportados no quedan expuestos a contaminación ambiental, y viceversa (ambiente no expuesto a materiales peligrosos y/o explosivos).
- Permite gran versatilidad de uso, pudiendo adecuarse a una gran variedad de configuraciones y procesos.
- Su gran flexibilidad permite acceder a lugares remotos de una planta.
- Bajo costo económico para transportar grandes cantidades de material.
- Fácil de automatizar, mantener y operar.

Limitaciones

- Sólo pueden ser transportados materiales relativamente finos, secos y no cohesivos.
- No es recomendable transportar materiales frágiles en fase diluida, ya que pueden sufrir atrición.
- Desgaste prematuro de cañerías, codos, curvas y equipos al transportar materiales duros y abrasivos.
- El tamaño de partículas a transportar es limitado, así como la extensión de la configuración.
- Puede significar un mayor consumo de energía que otras alternativas al operar a grandes velocidades.

2.4 Aplicaciones comunes

Una amplia gama de industrias utiliza sistemas de transporte neumático para el traslado y manejo de materiales sólidos a granel, como es la industria alimenticia, química, minera, del plástico, farmacéutica, entre otras. Dentro de las aplicaciones más comunes es posible encontrar:

- Carga y descarga de camiones, contenedores, barcos, ferrocarriles y silos de almacenamiento.
- Transporte de sólidos desde uno o varios puntos de una planta, hacia otro u otros de difícil acceso.
- Recolección de polvos domésticos mediante aspiradoras convencionales (por succión).
- Captación de polvos metalúrgicos en minería con sistemas de succión.
- Transporte e inyección neumática de concentrado de cobre seco en fundiciones mineras.

2.5 Clasificación de sistemas de transporte neumático

Los sistemas de transporte neumáticos pueden ser clasificados de varias maneras, según su disposición y forma de operar, por lo cual es muy importante seleccionar el tipo de sistema más apropiado para una aplicación en particular.

2.5.1 Según presión del gas de transporte

2.5.1.1 Sistema de presión positiva

Este tipo de sistema consiste en impulsar el material mediante el gas de transporte, siendo la presión del gas dentro de la cañería mayor que la presión atmosférica en toda su extensión, por lo cual el soplador se sitúa antes del punto de alimentación (ver Figura 1).

Este tipo de sistemas de presión positiva se puede subdividir en [2]:

- Sistema de baja presión : < 1 [bar g]
- Sistema de media presión : $1 - 3$ [bar g]
- Sistemas de alta presión : $3 - 10$ [bar g]

Los sistemas de presión positiva son los más utilizados en la industria debido a que permiten transportar desde un punto de alimentación hacia varios puntos de descarga, además de que permite el transporte de materiales a grandes distancias y con capacidades relativamente altas.

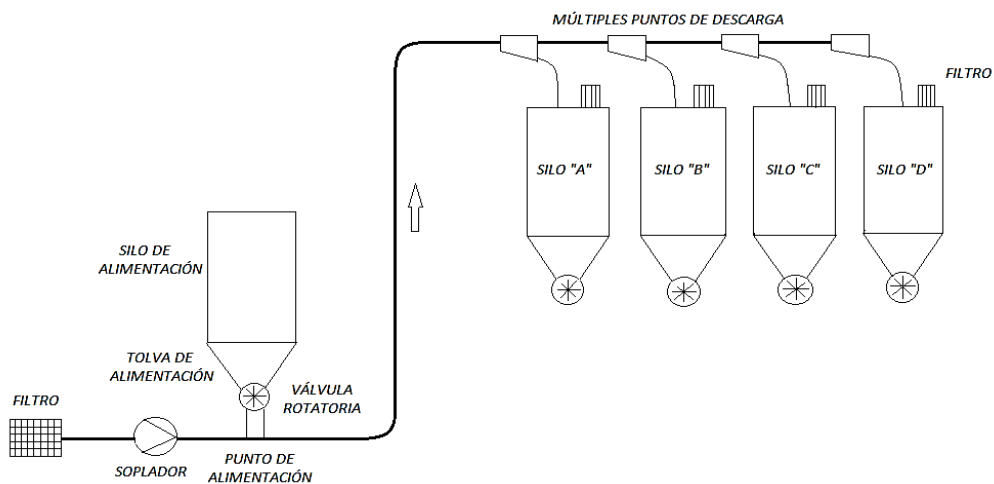


Figura 1: Esquema de sistema de transporte neumático de presión positiva [7].

2.5.1.2 Sistema de presión negativa

En este tipo de sistemas la presión del gas de transporte dentro de la cañería es menor que la presión atmosférica, por lo cual el elemento motriz actúa en modo de succión, localizándose al final de la configuración, justo después del elemento separador de partículas, como se muestran esquemáticamente en la Figura 2.

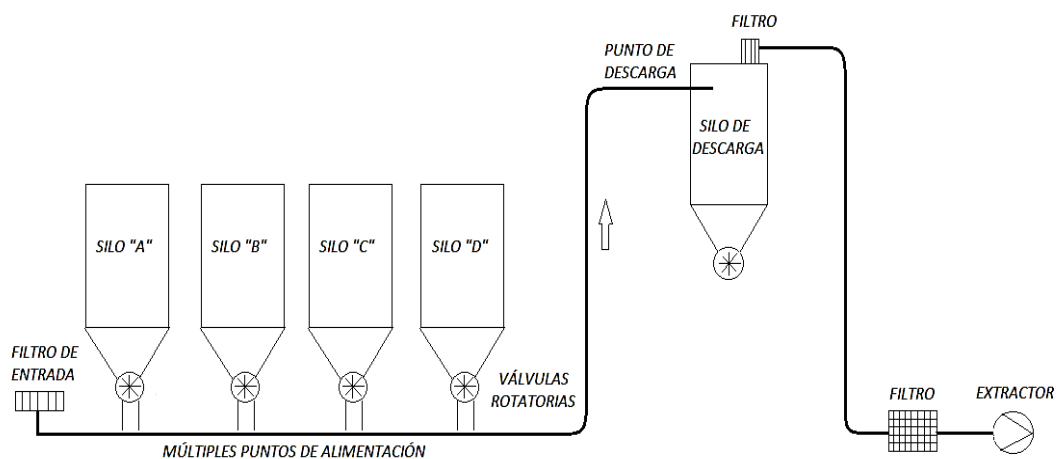


Figura 2: Esquema de sistema de transporte neumático de presión negativa [7].

Una de las grandes ventajas de este tipo de sistemas por vacío, es que permiten transportar materiales sólidos desde varios puntos de alimentación a un punto de descarga (ver Figura 2). Además, el hecho de que las partículas sean succionadas y transportadas en su mayoría en el centro de la cañería, resulta en una menor interacción de partículas con la pared y entre ellas mismas, habiendo así menor pérdida de carga. Es adecuado implementar un sistema de presión negativa cuando se requiere transportar materiales tóxicos y peligrosos, como también en operaciones de limpieza por succión.

2.5.1.3 Sistemas de presión combinados

Es una combinación de un sistema de presión positiva con uno de presión negativa, aprovechando las ventajas de cada uno, permitiendo así el transporte de materiales sólidos a granel desde varios puntos de alimentación a varios puntos de descarga, como se muestra en la Figura 3.

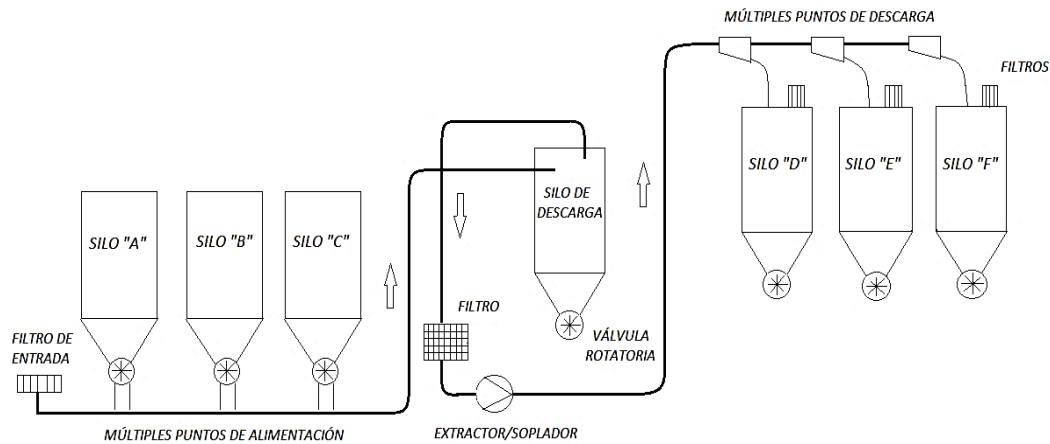


Figura 3: Esquema de sistema combinado de transporte neumático [7].

La implementación de este tipo de sistemas es efectiva para la descarga de grandes cantidades de material para luego almacenarlo en silos a cientos de metros del lugar de origen.

2.5.2 Según reutilización del gas de transporte

2.5.2.1 Sistema abierto

En sistemas abiertos, el gas que ingresa a la línea antes del punto de alimentación de sólidos es liberado al ambiente inmediatamente después de la separación del gas con las partículas en la descarga, como se muestra en Figura 1, 2 y 3.

2.5.2.2 Sistema cerrado

En sistemas cerrados, luego de la separación de partículas, el gas de transporte es recuperado y recirculado hacia el punto de alimentación sin descargarlo al ambiente, mediante una línea de retorno (ver Figura 4). Es adecuado este tipo de sistemas cuando se transporta materiales tóxicos y radiactivos.

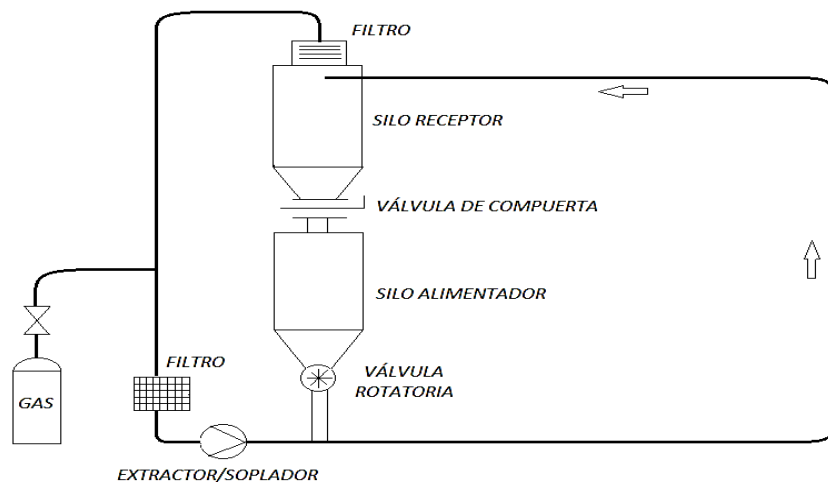


Figura 4: Esquema de sistema cerrado de presión positiva de transporte neumático de sólidos [7].

2.5.3 Según concentración de sólidos

2.5.3.1 Fase diluida

En sistemas de fase diluida, el material es transportado en suspensión dentro de la cañería, donde las partículas se distribuyen uniformemente en toda la sección transversal (flujo homogéneo), y la velocidad de la mezcla bifásica es relativamente alta. Estos sistemas de transporte son generalmente de baja presión positiva y baja presión negativa.

Los parámetros a tener en cuenta para sistemas de fase diluida son [2]:

- Relación de carga : < 10 [kg_s/kg_g]
- Presión de operación : < 1 [bar_g]
- Velocidad de transporte : $10 - 40$ [m/s]

Al transportar sólidos a granel frágiles y/o abrasivos, puede producir degradación del material y un desgaste excesivo de cañerías y codos, esto debido a la velocidad transporte relativamente alta del sistema.

2.5.3.2 Fase densa

Para este tipo de sistemas en fase densa, el material es transportado en forma de aglomeraciones tipo dunas, donde el flujo se estratifica y las partículas se distribuyen preferentemente en la parte baja de la cañería horizontal, siendo la velocidad de transporte relativamente baja y la concentración de sólidos medianamente alta. Estos sistemas de transporte son generalmente de alta presión positiva.

Los parámetros a tener en cuenta para sistemas de fase densa son [2]:

- Relación de carga : > 50 $[kg_s/kg_g]$
- Presión de operación : > 3 $[bar_g]$
- Velocidad de transporte : $5 - 10$ $[m/s]$

Es importante mencionar que el tipo de flujo desarrollado para estos sistemas es muy sensible a variaciones en las características de los materiales, pudiendo presentar flujo pulsante y en ocasiones errático e inestable. Sin embargo, este tipo de flujo disminuye la degradación de partículas (para materiales frágiles) y el desgaste excesivo de cañerías y codos.

2.5.4 Según velocidad de partículas y modo de operación

Además de los sistemas ya descritos anteriormente, se pueden clasificar sistemas de transporte neumático de acuerdo a la velocidad de transporte en sistemas de “alta velocidad” o “baja velocidad”.

En un sistema de transporte neumático, cuando la alimentación ocurre de manera continua y sin interrupciones, se denomina “sistema continuo”, y cuando la alimentación es cíclica y discontinua se habla de “sistema discontinuo o batch”.

2.6 Materiales sólidos a granel

Los materiales sólidos granel corresponden a un conglomerado de partículas de una gran variedad de tamaños y formas, pero de una misma naturaleza. Si bien los materiales sólidos no fluyen como un fluido, si pueden moverse, rodar, deslizarse, y caer debido a las diferentes fuerzas que actúan sobre las partículas. Además, a diferencia de los fluidos, estos materiales son capaces soportar esfuerzos de corte estando en reposo.

Es importante tener en cuenta que, para una aplicación particular de un tipo de material sólido a granel, la interpretación y determinación de las características físicas y propiedades de fluidez son parámetros de vital importancia para una adecuada selección, diseño y dimensionamiento de un sistema de transporte neumático y almacenamiento de materiales.

2.6.1 Características físicas de un material sólido a granel

Las características más importantes que afectan a la hora de diseñar y dimensionar correctamente un sistema de transporte neumático son:

a- Tamaño de partículas y distribución granulométrica

El tamaño de partícula es sin duda la característica más importante de un material sólido a granel que, de acuerdo a su distribución granulométrica, definen gran parte de las dimensiones básicas de los equipos y sistemas que lo manejan.

La manera más común de determinar experimentalmente esta característica del material, es mediante el método de tamizado con mallas granulométricas, que consiste en hacer pasar una cantidad de masa definida del sólido a granel por mallas de distinta abertura. Luego se tabula el porcentaje de material retenido en cada malla y se grafica su distribución granulométrica. Este procedimiento sigue lo descrito en la norma NCh. 435.Of55 [8].

b- Densidad de partícula

La densidad es otra de las características importantes que describe al material sólido a granel, que influye directamente a la velocidad mínima de transporte, y la caída de presión que experimentan las partículas en un sistema neumático. El método adoptado para determinar la densidad absoluta y aparente de un material consiste en llenar una probeta, para luego agregar una cantidad determinada de etanol (fluido no soluble con materiales), y por último medir la diferencia en masa y volumen que experimenta la muestra [8].

c- Forma de la partícula

La mayoría de los sólidos a granel se componen de partículas que no son esféricas, y no existe un método normado para medir éste parámetro. Es común clasificarlas visualmente según su forma angular, granulares, fibrosas, entre otras. Klinzing [9] define un método usando un coeficiente de esfericidad (ψ), que es el cociente entre el área superficial de una esfera equivalente al volumen que tenga la partícula, sobre el área propia de la partícula.

d- Contenido de humedad

Corresponde a la cantidad de agua que contiene el material en forma libre, en relación al peso original de la muestra sin considerar el agua, y se expresa en porcentaje. Éste parámetro afecta principalmente en la cohesión del material, pudiendo llegar a ocasionar problemas en el silo alimentador, como es la formación de arcos y flujo errático en la descarga.

El método apropiado para determinar el contenido de humedad de un material a granel, se describe en la norma NCh. 1515.Of79, y consiste en secar una muestra de sólidos en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que no pierda más peso [8].

2.6.2 Propiedades de fluidez de un material sólido a granel

Un segundo grupo de parámetros propios de un material sólido a granel es el que se denomina propiedades de fluidez [10]. Éstas deben ser consideradas a la hora de diseñar y dimensionar un sistema de transporte neumático con el fin de evitar problemas de flujo.

a- Resistencia cohesiva

Es la principal propiedad de fluidez de un material desde el punto de vista del manejo, almacenamiento y transporte de sólidos a granel. Este parámetro indica la capacidad de “fluir” que tiene el material bajo la acción de gravedad.

b- Fricción de pared

Fricción de pared es otra propiedad de gran importancia de un material a granel, ya que permite determinar tanto el tipo de flujo que desarrollan los sólidos al ser almacenados y descargados en un silo, como también el ángulo máximo de las paredes de una tolva para garantizar un flujo másico de descarga.

c- Permeabilidad y retención de aire

La permeabilidad representa la tendencia de un material sólido a granel a fluidizarse y/o airearse. Este parámetro varía con las características físicas del sólido, y depende del grado de compactación del material. Por otro lado, la retención de aire corresponde a la tendencia del material de retener el aire entre sus partículas y permanecer fluidizado.

d- Compresibilidad

La compresibilidad de un material determina la variación de su densidad aparente (γ) en función de la presión de consolidación (σ), cuya relación se refleja en una línea recta en un gráfico log-log, donde el coeficiente β representa el grado de compresibilidad del material (norma ASTM D 6683-01) [11].

$$\gamma = \gamma_0 * \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^\beta ; \text{ donde } \gamma_0 \text{ y } \sigma_0 \text{ son constantes empíricas} \quad (1)$$

La densidad aparente de un material varía con sus características físicas, y es muy útil cuando se requiere obtener la capacidad másica de almacenamiento de un silo.

2.7 Componentes principales de un sistema de transporte neumático

Un sistema de transporte neumático, independientemente de su clasificación, fase o modo de operación, requiere de cuatro zonas o componentes denominados básicos:

a. Suministro de gas de transporte o elemento motriz

Corresponde al componente encargado de entregar la energía necesaria al gas de transporte, como lo es un soplador, diferentes tipos de compresores, ventiladores o bombas de vacío.

b. Alimentación de sólidos

En esta zona es donde se produce la alimentación y aceleración de sólidos en conjunto con el gas de transporte como una mezcla bifásica. Los componentes para ejercer esta tarea pueden ser válvulas rotatorias, alimentador de tornillo, vaso presurizado, entre otras.

c. Línea de transporte

Consiste en todas las cañerías de tramo horizontal y/o vertical, junto con las correspondientes curvas, codos, válvulas, y elementos auxiliares por donde viaja el material sólido a granel.

d. Separación de partículas

Es aquí donde las partículas se desaceleran y separan del gas de transporte para su posterior recuperación, y liberación o recirculación de gas según sea la configuración del sistema. Para esto se utilizan comúnmente equipos como cajas de impacto, cámaras de expansión, ciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de mangas, entre otros.

2.8 Tipos de flujo y diagrama de estado

Dentro de la cañería de un sistema de transporte neumático pueden formarse diferentes tipos de flujo que se basan generalmente en observaciones visuales, donde el flujo puede comportarse de forma estable bajo determinados parámetros, mientras que en otros se torne inestable. Estos diferentes regímenes de flujo observados dependen tanto del tipo de sistema, como de la orientación de las cañerías (vertical u horizontal), de las características del material transportado, de la velocidad de transporte y de la concentración de sólidos.

La Figura 5 muestran esquemáticamente el comportamiento del flujo al interior de una cañería vertical al disminuir la velocidad del gas de transporte y/o aumentar la concentración de sólidos en la cañería.

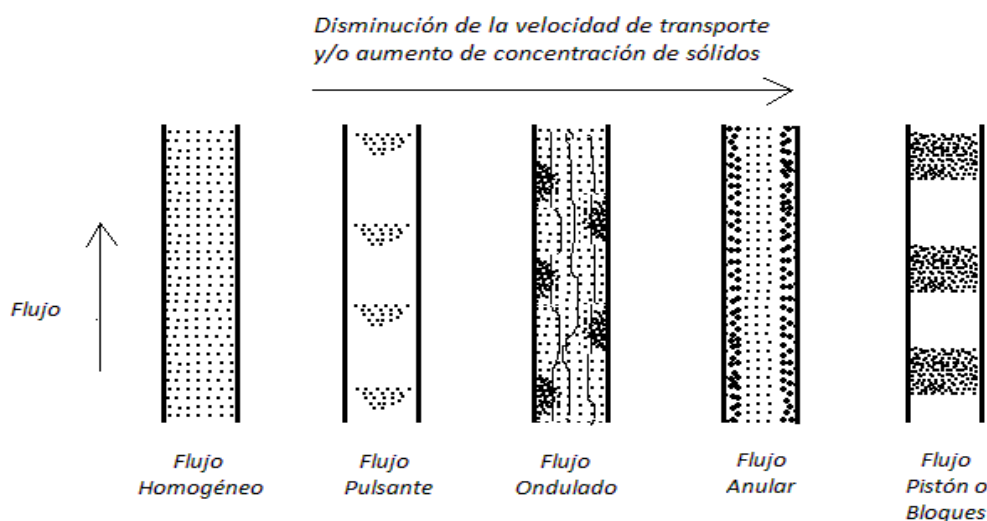


Figura 5: Tipos de flujos desarrollados en una cañería vertical [2].

Una de las maneras más sencillas y prácticas para describir el funcionamiento de un sistema de transporte neumático es mediante el “diagrama de estado”, propuesto por Zenz y Othmer [2]. En esta representación gráfica se ilustra la interacción bifásica de gas y sólidos

experimentada al interior de la cañería, en función de la velocidad del gas de transporte (U_g) y la caída de presión ($\Delta P/L$), para un flujo de sólidos constante.

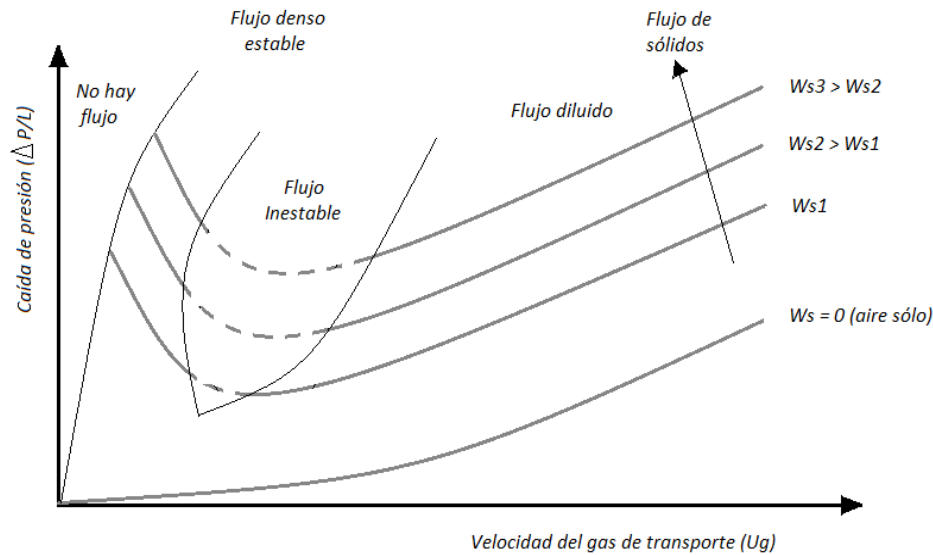


Figura 6: Esquema de un diagrama de estado [2].

Como se puede observar en la Figura 6, para sistemas que operen en fase densa, la caída de presión aumenta al disminuir la velocidad del gas de transporte, debido a la mayor interacción entre las partículas y con la pared de la cañería. En cambio, para sistemas que operan en fase diluida, la caída de presión aumenta al incrementar la velocidad del gas de transporte. Además, existe una zona inestable entre los dos tipos de fase, y una zona límite donde ya no es posible transportar materiales.

Las características propias del material, como la densidad, el tamaño de partículas y su permeabilidad, influyen en gran medida en las características del transporte y los patrones de flujo que se desarrollan en la cañería.

El diagrama de estado esquematizado en la Figura 7, para un sistema de transporte neumático vertical, muestra la curva para aire sólo ($W_s = 0$), las curvas para distintos flujos de

sólidos, y los tipos de flujos descritos con anterioridad. Además, es posible identificar el punto de presión mínima dentro del diagrama.

Se puede apreciar de forma clara que, para condiciones de flujo homogéneo las curvas resultan prácticamente paralelas a la curva de aire solo, mientras que a medida que se disminuye la velocidad del gas de transporte, aparecen fenómenos y regímenes de flujo distintos, como flujo pulsante y ondulado, y una zona de presión mínima, gobernados principalmente por el efecto de la gravedad.

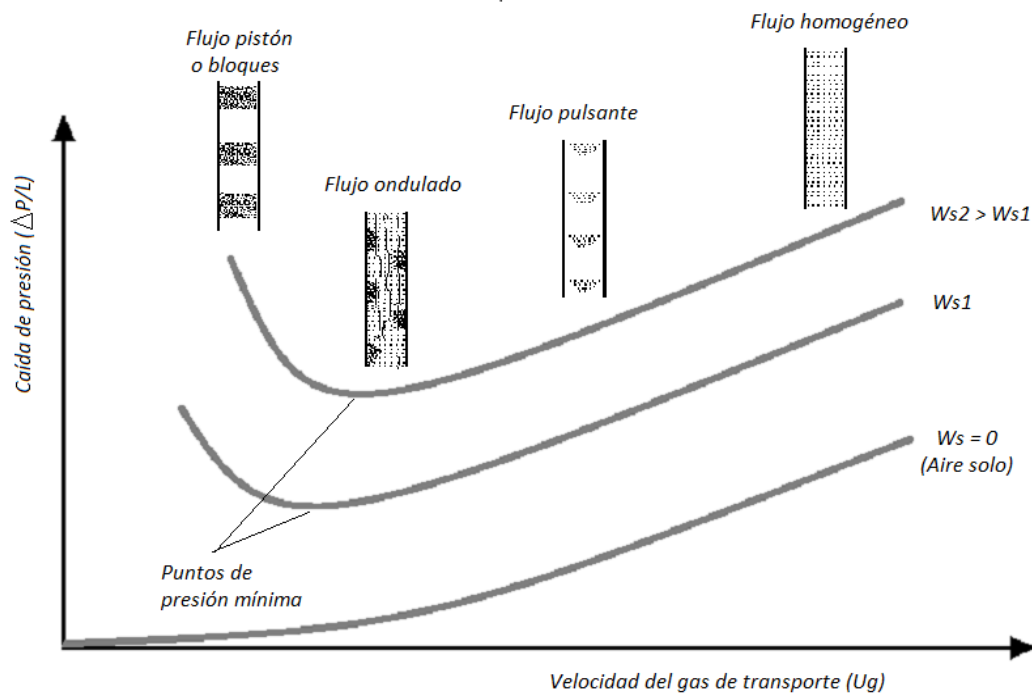


Figura 7: Diagrama de estado para un sistema de transporte neumático con cañerías en orientación vertical [2].

Los patrones de pulsación y ondulación delimitan la zona donde el flujo comienza a tornarse inestable, y por tanto reflejan el inicio de las condiciones óptimas de diseño, como la velocidad mínima de transporte bajo condiciones de presión, y el menor consumo de energía

del sistema. Es importante destacar que el punto de mínima presión no siempre, o más bien en muy pocas ocasiones suele coincidir con la velocidad mínima de transporte.

Luego, al disminuir aún más la velocidad del gas de transporte, se pierde la capacidad de arrastre de partículas, por lo que el transporte no es efectivo y los sólidos caen en la línea vertical, fenómeno conocido como “choking” [4].

En general el diagrama de estado es una muy buena herramienta, que además de describir el funcionamiento de un sistema de transporte neumático, puede utilizarse para el diseño de sistemas nuevos, como para la determinación del punto óptimo de operación de un sistema existente. Este punto de operación de un sistema siempre se encontrará en la intersección de la curva característica del soplador con la curva para un flujo de sólidos determinado (ver Figura 8).

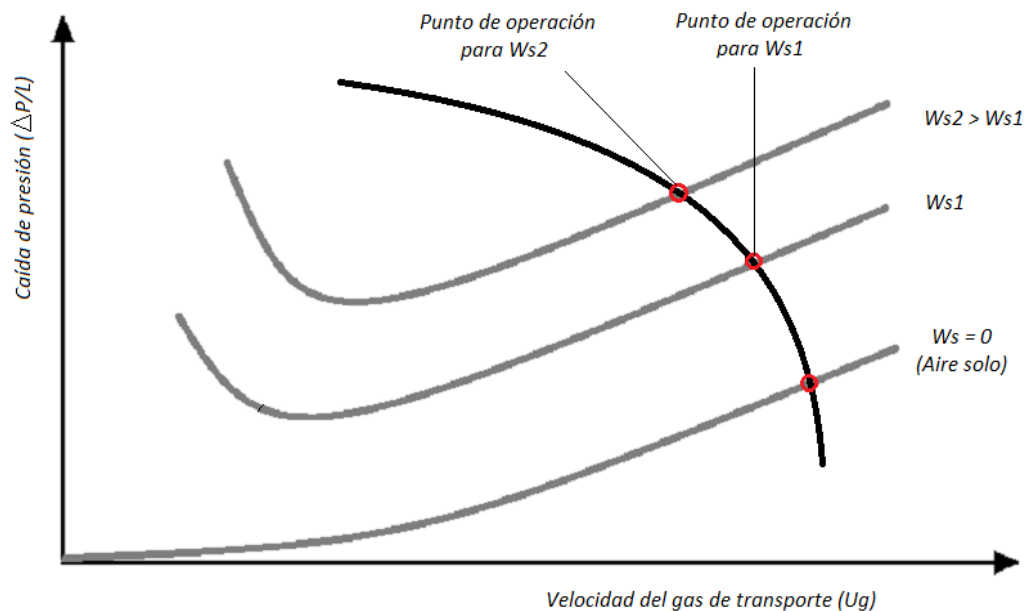


Figura 8: Determinación del punto de operación de un sistema de transporte neumático en fase diluida [2].

2.9 Fundamentación teórica

Para el correcto diseño y operación de un sistema de transporte neumático, se deben conocer ciertos parámetros relevantes que influyen en el dimensionamiento de equipos y accesorios, por lo cual, a continuación, se describirán los conceptos teóricos y modelos matemáticos que fueron considerados en el presente trabajo.

2.9.1 Velocidad de transporte

La velocidad de transporte en cañerías es una de las variables más importantes para la operación de un sistema de transporte neumático. De acuerdo a experimentaciones encontradas en la literatura [4,5,12], la velocidad mínima de transporte depende de otros parámetros como es el flujo de sólidos a transportar, el tamaño de partículas, la densidad del material, la relación de carga y hasta el diámetro de la cañería de la configuración.

Es relevante mencionar que, si bien es posible encontrar correlaciones y modelos matemáticos para la obtención de velocidades asociadas a los fenómenos que ocurren con el flujo de sólidos en un sistema de transporte neumático, para esto no existe un procedimiento ni norma universal para todo material, por lo que la experimentación es fundamental para entender y conocer los efectos de ciertas variables que afectan sobre dichas velocidades.

A continuación, se describen las velocidades que se consideran relevantes para un sistema de transporte neumático, y los fenómenos ligados a ellas.

- **Velocidad del gas de transporte**

La velocidad media del gas de transporte en el interior de la cañería sin considerar sólidos, viene dada con la siguiente ecuación [13]:

$$U_g = \frac{W_g}{\pi \frac{D^2}{4} \rho_g} \quad (2)$$

donde:

U_g	: Velocidad del gas de transporte	[m/s]
W_g	: Flujo de gas	[kg/s]
ρ_g	: Densidad del gas	[kg/m ³]
D	: Diámetro interior de cañería	[m]

Para condiciones atmosféricas estándar, aproximadamente a nivel del mar, se considera una densidad del gas de 1,204 [kg/m³], para una temperatura de 20 [°C] y 1 [bar] de presión.

- **Velocidad crítica de transporte**

Corresponde a la mínima velocidad del gas de transporte que asegure la existencia de un flujo homogéneo en fase diluida al interior de la cañería del sistema neumático.

- **Velocidad mínima de transporte**

Se define como la mínima velocidad del gas a la cual aún existe transporte de sólidos, pudiendo existir comportamientos de flujo inestable, como ondulaciones y/o pulsaciones.

- **Velocidad óptima de transporte**

Es la velocidad del gas correspondiente a la mínima caída de presión en la cañería al transportar materiales sólidos a granel. Este punto puede obtenerse analizando directamente el

correspondiente diagrama de estado del material, y representa la energía mínima necesaria para mover los sólidos, pero no asegura necesariamente que el flujo sea estable ni homogéneo.

- **Velocidad de atascamiento o de “choking”**

Se llama velocidad de “choking” a la velocidad del gas en la cual todas las partículas están en suspensión, evitando que caigan en una línea vertical. Es el punto exacto donde la suspensión de sólidos colapsa y el transporte se realiza de forma pulsante.

- **Velocidad terminal de caída libre de una partícula individual**

Corresponde a la velocidad constante que alcanza una partícula en caída libre luego de acelerar por efecto de la gravedad, que se encuentra inmersa en un medio estático y donde solo actúa la gravedad.

La velocidad terminal de caída libre de una partícula individual depende fuertemente del tamaño y densidad de la partícula. Existen tres casos particulares al exponer una partícula individual a un flujo de gas verticalmente hacia arriba [2]:

- i. Si la velocidad del gas (U_g) es mayor que la velocidad terminal (U_t), la partícula subirá por el efecto de fuerza de arrastre mayor al peso de ésta.
- ii. Si la velocidad del gas (U_g) es menor que la velocidad terminal (U_t), la partícula descenderá, debido a que el peso propio es mayor que la fuerza de arrastre.
- iii. Si la velocidad del gas (U_g) es igual a la velocidad terminal (U_t), la partícula permanecerá en suspensión en dicha posición, ya que la fuerza de arrastre equilibra exactamente el peso de la partícula.

Con la aplicación de la ley de Newton para una partícula esférica de diámetro d_p , se tiene la siguiente relación para la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual:

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

donde C_d es el coeficiente de arrastre.

Existen varias correlaciones disponibles en la literatura para la determinación del coeficiente de arrastre, el cual depende del número de Reynolds de partícula (Re_p) para el tipo de flujo desarrollado en una cañería. Estas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1: Correlaciones para el coeficiente de arrastre [2].

<i>Condición de flujo</i>	<i>Número de Reynolds</i>	<i>Coeficiente de arrastre (C_d)</i>
<i>Stokes</i>	$Re_p < 1$	$C_d = \frac{24}{Re_p}$
<i>Intermedio</i>	$1 < Re_p < 10^3$	$C_d = \frac{18,5}{Re_p^{0,6}}$
<i>Newton</i>	$10^3 < Re_p < 10^5$	$C_d = 0,44$
<i>Kaskas</i>	$Re_p < 10^5$	$C_d = \frac{24}{Re_p} + \frac{4}{Re_p^{0,5}} + 0,4$

- **Velocidad de transporte de partículas**

Corresponde a la velocidad que adquieren las partículas luego de ser aceleradas en la zona de alimentación y mezcla. Cuando se requiere transportar sólidos finos y livianos, la velocidad de transporte de partículas (U_p) puede llegar a ser aproximadamente igual a la velocidad del gas, cuando el flujo es homogéneo. Sin embargo, para sólidos más grandes y pesados, la velocidad de transporte se ve afectada por la mayor inercia de las partículas, siendo menor a la velocidad del gas (U_g).

Para sistemas de transporte neumático en fase diluida y con cañerías en orientación vertical, Konno y Saito [1] propusieron la siguiente expresión para la velocidad de transporte de partículas basada en la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual:

$$U_p = U_g - U_t \quad (4)$$

- **Velocidad de purga**

Se define como la velocidad requerida del gas de transporte para desatollar o vaciar una cañería vertical tapada con material.

2.9.2 Caída de presión

Representa la energía necesaria y requerida para poder transportar materiales desde un punto a otro, a un determinado flujo de sólidos. La caída de presión es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora del diseño de un sistema de transporte neumático, además de ser una variable clave para la selección del soplador/extractor apropiado.

Las principales variables que afectan la caída de presión de un sistema neumático corresponden a:

- ✓ Tamaño y densidad de partícula del material a granel.
- ✓ Flujo de sólidos a transportar.
- ✓ Densidad y temperatura del gas de transporte.
- ✓ Flujo y velocidad del gas de transporte.
- ✓ Largo y altura de elevación de la línea de transporte.
- ✓ Relación de carga.
- ✓ Diámetro de la cañería y el número de codos y curvas.

La caída de presión total de un sistema de transporte neumático se define como la suma individual de cada una de las partes y componentes, que contribuyen por medio de distintos mecanismos [7]:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{gas} + \Delta P_{cañeria} + \Delta P_{aceler} + \Delta P_{otros} \quad [Pa] \quad (5)$$

donde:

- ΔP_{total} : Caída de presión total del sistema [Pa]
- ΔP_{gas} : Caída de presión debido al gas de transporte [Pa]
- $\Delta P_{cañeria}$: Caída de presión debido a la mezcla bifásica de gas más sólidos, incluyendo la pérdida por fricción y la altura estática de sólidos y gas [Pa]
- ΔP_{aceler} : Caída de presión debido a la aceleración de los sólidos [Pa]
- ΔP_{otros} : Caída de presión debido a los accesorios como curvas, codos y el ciclón separador [Pa]

CAPITULO 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

De acuerdo a los objetivos planteados anteriormente, el fin de éste trabajo es implementar un sistema de transporte neumático vertical que opere en fase diluida, para realizar ensayos y analizar los parámetros más relevantes de distintos sólidos a granel que influyan en el comportamiento del flujo desarrollado, y a partir de ello, poder determinar de forma empírica una relación para la velocidad mínima de transporte de los materiales.

Para estos efectos, se diseñó y construyó un sistema de transporte neumático de aproximadamente cinco metros de alto en el CITRAM (Centro de Investigación y Desarrollo para el Transporte de Materiales), aprovechando tanto el espacio físico, como la disponibilidad de equipos y herramientas presentes en el laboratorio.

De acuerdo a los objetivos planteados, el sistema de transporte neumático que se requiere construir consta de cuatro componentes o zonas principales:

- ✓ Sistema motriz.
- ✓ Zona de alimentación.
- ✓ Zona de transporte.
- ✓ Zona de separación y descarga de sólidos.

3.1 Sistema motriz

El elemento motriz corresponde al equipo que suministra el gas de transporte, que en este caso será un soplador Gardner Denver BORA G-SAP 150, perteneciente al CITRAM, el cual tiene la tarea de entregar un caudal de aire con la energía necesaria para efectuar el transporte de materiales a granel. Este soplador cuenta además con un variador de frecuencia, que permite regular el giro del motor y así variar el caudal de aire y presión que entrega al sistema (los detalles técnicos se entregan en el Anexo B.1 y B.2).

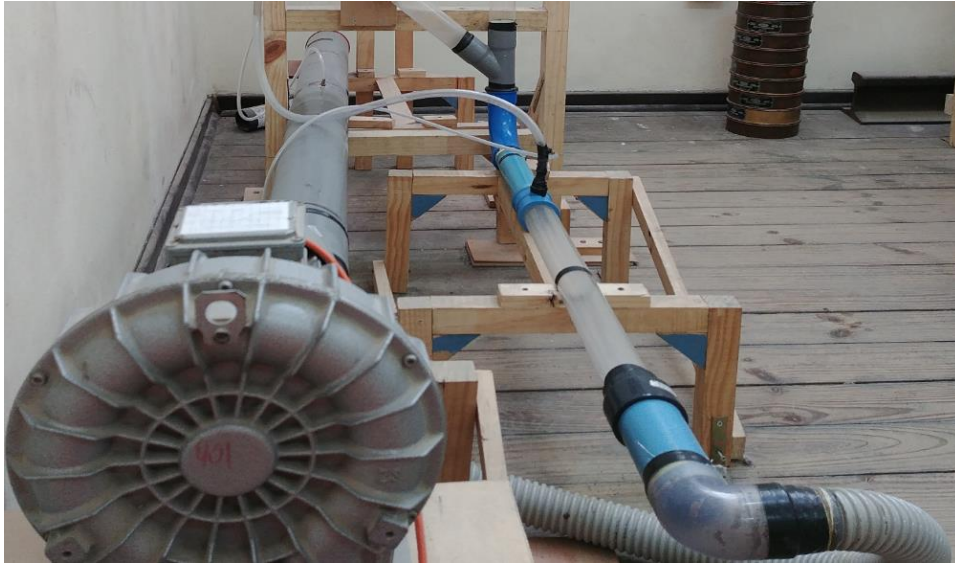


Figura 9: Soplador, tubo de succión y manguera corrugada de salida de aire disponibles.

El soplador requiere un espacio óptimo para la succión del aire de transporte, con una cañería de PVC de 106 [mm] I.D. y 1700 [mm] de largo, mediante una reducción concéntrica de 110x50 [mm]. Esta cañería lleva en un extremo una placa orificio de 65 [mm] de diámetro interno que se utiliza para realizar la medición de la velocidad del aire que entrega el soplador. En tanto, la salida del soplador va conectada con una manguera corrugada flexible que permite unir las tuberías de PCV de 51 [mm] O.D. hacia la zona de alimentación.

3.2 Zona de alimentación

Esta zona necesita de elementos clave para el flujo de sólidos, como es el silo contenedor del material unida a una tolva de descarga con una inclinación mínima para que el material descienda con flujo másico, y así los sólidos estén en constante movimiento.

El silo alimentador considerado para el almacenamiento de material a granel es de acrílico transparente, el cual permite visualizar los sólidos en su interior y con ello realizar la medición de flujo mediante diferencias de altura. Este posee un diámetro de 88 [mm] I.D., y

un largo de 1300 [mm]. En la parte superior de éste, se monta una tapa de technil que permite evitar fugas de aire en esa zona. Inmediatamente debajo del silo se monta una tolva con inclinación de aproximadamente 10°, y consta de una reducción concéntrica de PVC de 110x50 [mm].

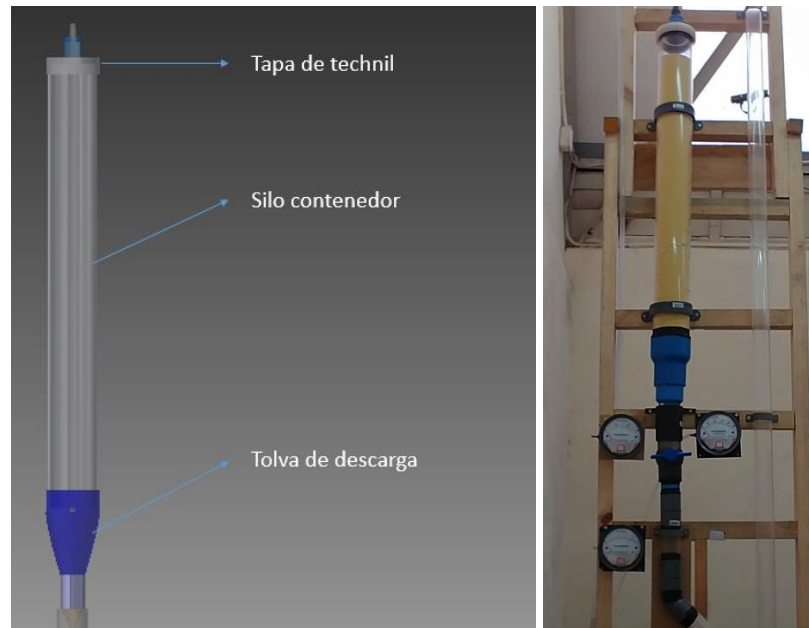


Figura 10: Representación y vista actual del silo alimentador y la tolva de descarga.

La capacidad máxima de almacenamiento del silo está dada por el volumen tanto del cilindro del silo, más el volumen de la tolva de descarga.

- Volumen silo	: 0,00912	[m ³]
- Volumen tolva	: 0,00067	[m ³]
- Volumen total máximo	: 0,00979	[m ³]

Para la descarga de sólidos se considera una válvula de globo inmediatamente bajo la tolva de descarga del silo alimentador (ver Figura 10), y que actúa de forma on-off. Además, para el control del flujo de sólidos se monta un juego de placas de orificio de diámetros

16 [mm], 20 [mm] y 23 [mm] en la parte inferior de la válvula, y que conectan hacia la cañería con destino al punto de alimentación de sólidos.

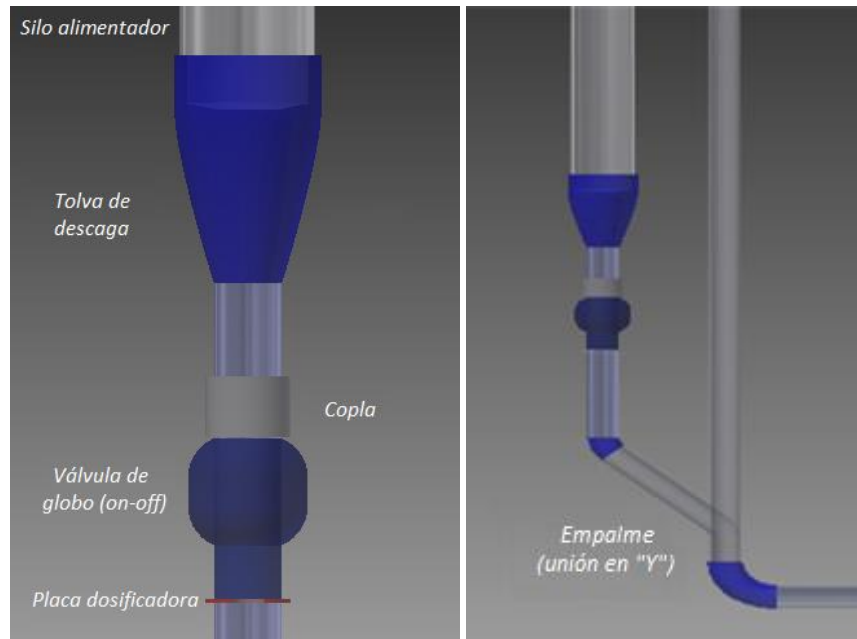


Figura 11: Tolva de alimentación y sistema control de flujo, más empalme de alimentación considerados en el diseño.

El punto de alimentación donde se realiza la mezcla bifásica de sólidos más el gas de transporte, consta de una unión en “Y” de material PVC, y con una inclinación de 45° (ver Figura 11). Este empalme delimita la zona de alimentación, con la zona de aceleración y la zona de suministro de gas de transporte.

Para lograr que el silo realice la descarga del material por gravedad, se conecta una manguera flexible de 0,5 [pulg] desde la línea de suministro de aire, justo antes de la alimentación de sólidos, hasta la parte superior del silo (ver Figura 14). Esto equilibra la presión interna del silo a la presión en el punto de alimentación, por lo que el material no se devuelve hacia la zona de alimentación.

3.3 Zona de transporte

Para la zona de transporte de material se consideró la extensión inmediatamente después del empalme de alimentación, por lo tanto, incluye la zona de aceleración y transporte. Esta zona tiene una altura de elevación de 4,3 [m] aproximadamente, y está compuesta de cañerías de acrílico transparente de 45 [mm] I.D., lo cual permite observar el comportamiento del flujo de material bajo las condiciones de operación. La unión de cañerías contempla el uso de codos y coplas de PVC de 51 [mm] I.D.

Es relevante mencionar que, para el caso de la zona de suministro de gas, se utiliza principalmente cañerías de PVC de 45 [mm] I.D. por el menor costo este material.



Figura 12: Cañerías montadas a la estructura de madera del sistema de transporte neumático construido.

3.4 Zona de separación y descarga de sólidos

Corresponde a la zona donde se deposita finalmente el material sólido transportado, separándolo del gas de transporte, ubicándose al final del recorrido del sistema de transporte neumático. Esta zona consta de un separador de partículas, cuyo cuerpo alberga el material (silo y tolva de descarga), y expulsa el aire de transporte a la atmósfera mediante un tubo de salida de acrílico de 45 [mm] I.D. El aire antes de salir debe atravesar un filtro de mangas, que tiene el fin de separar y capturar polvos finos para así evitar la contaminación del ambiente circundante del laboratorio.

Este separador de partículas consta de paredes laterales de madera en toda su estructura, una parte frontal de acrílico transparente para poder visualizar la descarga del material, y una parte posterior de cholduan liso de 3 [mm] de espesor. La parte inferior del separador corresponde a la tolva de descarga del material recibido, cuya inclinación de las paredes laterales es de 45° para lograr un flujo másico de descarga. Todo el cuerpo se encuentra reforzado con marcos de madera para robustecer el separador de partículas (ver Figura 13). Las medidas de este componente se muestran en Anexo A.7.

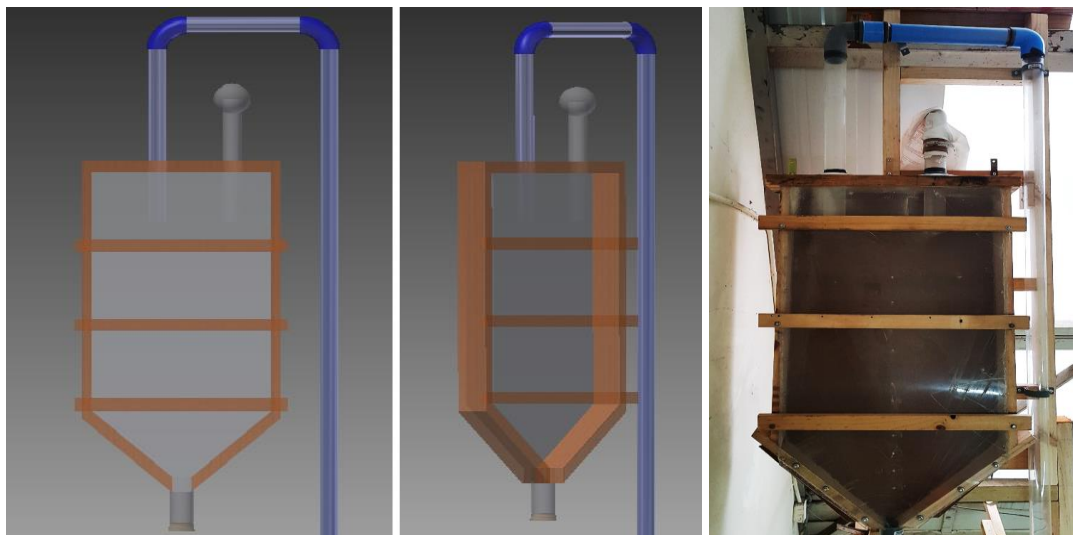


Figura 13: Representación y vista actual del separador de partículas diseñado y construido.

Es importante destacar que el sistema de transporte neumático se monta sobre una estructura de madera (ver Figura 14), que además de cumplir la función de dar soporte y fijación al sistema, permite acceder para realizar distintas tareas, como es el rellenado del silo de alimentación desde el separador de partículas, la limpieza del filtro de salida del aire, y solucionar algún tipo de problema de sello que pueda presentar la configuración diseñada. La caracterización de cada componente de este sistema de transporte neumático puede verse en mayor detalle en el Anexo A.

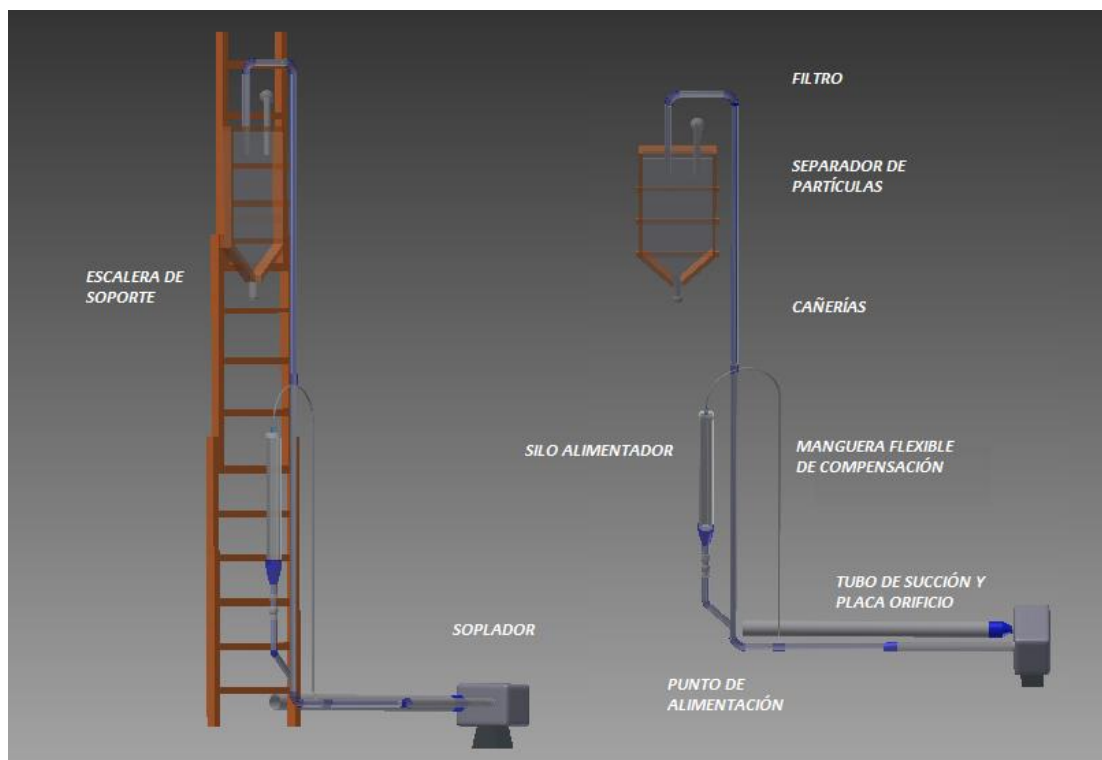


Figura 14: Representación del sistema de transporte neumático vertical diseñado.

CAPITULO 4: EXPERIMENTACIÓN

4.1 Características del sistema de transporte neumático implementado

Una vez montada la configuración diseñada, se procede a caracterizar el sistema de transporte neumático vertical con el cual se realizan los ensayos. La Tabla 2 resume las principales características de operación del sistema:

Tabla 2: Características del sistema de transporte neumático vertical construido.

<i>Parámetro</i>	<i>Característica</i>
<i>Tipo de fase</i>	<i>Diluida</i>
<i>Presión</i>	<i>Baja presión positiva</i>
<i>Material cañerías</i>	<i>Acrílico transparente / PVC</i>
<i>Largo de transporte</i>	<i>4,30 [m] de altura estática</i>
<i>Diámetro cañería de transporte</i>	<i>0,045 [m] I. D.</i>
<i>Tipo de materiales</i>	<i>Granulares, secos y de fácil escurrimiento</i>
<i>Control de flujo</i>	<i>Placas dosificadoras (placa orificio)</i>
<i>Tipo de silo</i>	<i>Flujo másico</i>
<i>Capacidad del silo</i>	<i>9,79 [lt]</i>
<i>Alimentación</i>	<i>Válvula de globo (on – off)</i>
<i>Tipo de separación de partículas</i>	<i>Ciclón separador + filtro + tolva de descarga</i>

4.2 Instrumentación utilizada

Los instrumentos de medición, y la utilización de cada uno de ellos en los ensayos de laboratorio, se describen a continuación (para más detalles ver Anexo C.1).

- Manómetro 1: Corresponde al manómetro de mayor resolución y menor rango, se conecta al tubo de succión en el largo medio su extensión, y mide la caída de presión en la zona de succión del soplador producto de la placa orificio (ΔP_{placa}).
- Manómetro 2: Es el manómetro de menor resolución y mayor rango, utilizado para medir la caída de presión total del sistema, cuya conexión es justo antes del punto de alimentación de sólidos.
- Manómetro 3: Manómetro de mayor resolución menor rango que Manómetro 2, pero menor resolución y mayor rango que Manómetro 1. Este manómetro cumple la misma función que el Manómetro 2, pero en condiciones de operación y carga distintos.
- Tubo pitot: Se utiliza para medir la caída de presión en la zona de succión provocada por la placa orificio. Esto permite calibrar dicha placa y obtener una constante de calibración de la placa. Luego, mediante la aplicación de conceptos de Continuidad y Bernoulli se obtiene la velocidad del flujo en la zona de transporte, despreciando la variación de la densidad del aire.
- Cronómetro: Utilizado para medir el tiempo de descarga del material desde el silo correspondiente para cada placa dosificadora instalada.
- Balanza electrónica: Para medir la cantidad de masa almacenada en el silo antes de cada medición.

Es importante mencionar que a la balanza electrónica y a los manómetros 1, 2 y 3 se les realizó la verificación de calibración en el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM (ver Anexo C.2).

4.3 Parámetros a medir

Para una correcta obtención de datos experimentales mediante procesos de medición, es necesario contar con los instrumentos adecuados. Parámetros como caída de presión total del sistema, el flujo de sólidos, y velocidad del gas de transporte son de gran relevancia para llevar a cabo los objetivos de este trabajo. A continuación, se describen los procesos de medición y los instrumentos utilizados para la medición de cada una de las variables involucradas en el sistema de transporte neumático implementado.

4.3.1 Velocidad del gas de transporte

Para determinar el caudal de aire dentro de una cañería se pueden aplicar distintos métodos, como es un venturímetro, una placa orificio, o un tubo pitot. Particularmente para este trabajo se consideró la aplicación de una placa orificio de 65 [mm] de diámetro interno montada en el extremo de una cañería de PVC de 106 [mm] I.D. En el largo medio de ésta cañería se conecta un manómetro mediante una manguera flexible y con ayuda de un tubo pitot (ver Figura 15) es posible registrar la lectura de la velocidad del aire dentro de dicha cañería.

El proceso de calibración de la placa consistió en registrar tanto la velocidad del aire dentro de la cañería de PVC, como la lectura del manómetro, con el fin de obtener gráficamente una constante de calibración (K_{placa}) que relacione estas dos variables (ver Anexo E). Luego, aplicando la ecuación de Bernoulli y de Continuidad [13] se puede obtener la velocidad del gas de transporte mediante la siguiente relación:

$$U_g = \left(\frac{D_{PVC}}{D_{acrílico}} \right)^2 * K_{placa} \sqrt{\frac{2 * \Delta P_{placa}}{\rho_g}} \quad (6)$$

donde:

K_{placa}	: Coeficiente de calibración de la placa orificio ($K_{placa} = 0,30$) $[-]$	
ΔP_{placa}	: Diferencia de presión en la placa orificio	$[Pa]$
$D_{acrilico}$	: Diámetro de la cañería de acrílico para el transporte de sólidos $[mm]$	
D_{PVC}	: Diámetro de la cañería de PVC en la succión del soplador	$[mm]$

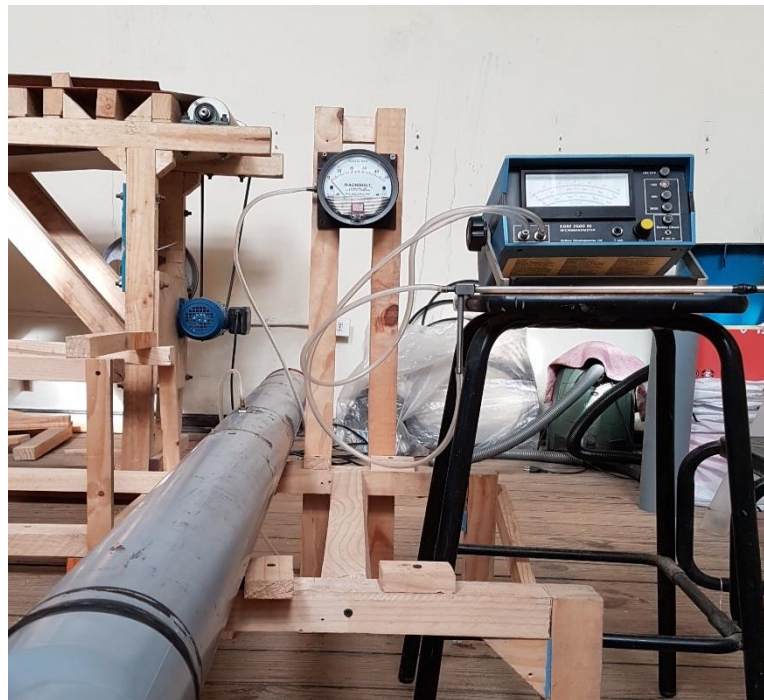


Figura 15: Instrumentos utilizados en el proceso de calibración de la placa orificio.

4.3.2 Caída de presión total del sistema

Para determinar la caída de presión total del sistema se dispone de dos manómetros de pulgadas de agua, cada uno con distinto rango y resolución según la carga en la que opere el sistema. Estos manómetros se conectan justo antes en el punto de alimentación de sólidos, midiendo el máximo diferencial de presión alcanzado por el sistema respecto a la presión atmosférica una vez alimentados los sólidos.

4.3.3 Flujo de sólidos

El método para medir el flujo de sólidos que ingresa al sistema de transporte se realiza mediante la utilización de una balanza digital, un cronómetro y la transparencia del silo alimentador. Primeramente, se debe pesar una determinada cantidad de material (generalmente entre 10 y 12 [kg]) en la balanza, para luego llenar el silo, al cual se le realiza una marca de altura aproximadamente en un tercio de la parte más baja, que identifique claramente un kilogramo de material. Luego, se tomará el tiempo que demore el material en descender dicha altura. Con todo esto, se puede tener una buena medición del flujo de sólidos que ingresa al sistema para ser transportado verticalmente.

Es importante mencionar que el tiempo de descenso y de descarga del silo depende tanto de la placa de orificio instalada para ajustar el flujo, como de las características del material y el flujo de aire inyectado al sistema.

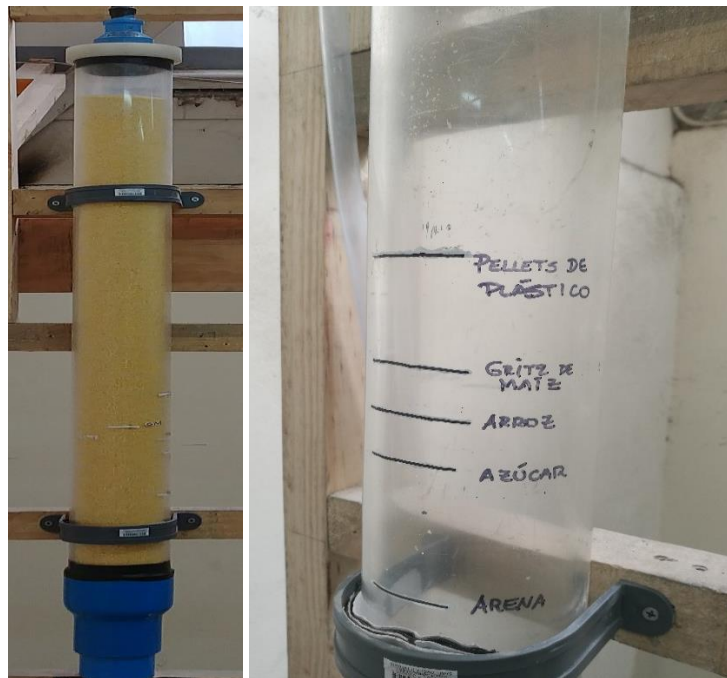


Figura 16: Silo lleno con gritz de maíz y marcas de altura del material.

4.4 Materiales ensayados

Uno de los requerimientos necesarios para poder operar un sistema de transporte neumático en fase diluida, es que los materiales deben ser relativamente finos, secos y que posean buenas propiedades de fluidez. Es por esto que se eligen materiales sólidos a granel con dichas características para facilitar el desarrollo de los ensayos de laboratorio. Los materiales seleccionados y sus características se muestran en la Tabla 3 (más detalles en el Anexo D).

Tabla 3: Materiales seleccionados para ensayar en el sistema de transporte neumático.

<i>Material</i>	<i>Densidad de partícula (ρ_s) [kg/m³]</i>	<i>Malla</i>	<i>Tamaño de partícula (d_p) [mm]</i>	<i>Forma de partícula</i>
<i>Pellet de plástico</i>	940	#5 x #10	2,43	<i>Romboidea u ovalada</i>
<i>Gritz de maíz</i>	1370	#10 x #30	1,30	<i>Semicubica granular</i>
<i>Arroz</i>	1430	#10 x #18	1,50	<i>Granular alargado</i>
<i>Azúcar</i>	1520	#10 x #100	1,00	<i>Granular molido</i>
<i>Arena</i>	2480	#5 x #100	1,60	<i>Porosa y granular</i>

Además de estos materiales, se realizaron ensayos de desarrollo de cañería para obtener la velocidad de purga (U_{pu}) de otros dos sólidos a granel distribuidos en distintos rangos de tamaño. Estos materiales corresponden a mineral chancado de cobre y piedra molida, y sus características se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Materiales adicionales para ensayos de velocidad de purga.

<i>Material</i>	<i>Densidad de partícula (ρ_s) [kg/m³]</i>	<i>Malla</i>	<i>Tamaño de partícula (d_p) [mm]</i>	<i>Forma de partícula</i>
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	1/4" x #5	5,18	<i>Granular irregular</i>
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	#5 x #10	3,00	<i>Granular irregular</i>
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	#10 x #18	1,50	<i>Granular irregular</i>
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	#18 x #30	0,80	<i>Granular fino</i>
<i>Piedra molida</i>	2630	1/4" x #5	5,18	<i>Granular irregular</i>
<i>Piedra molida</i>	2630	#5 x #10	3,00	<i>Granular irregular</i>

Para obtener el tamaño de partículas de los materiales es necesario tamizarlos mediante un conjunto de mallas granulométricas, como se explica en apartado 2.6.1. Sin embargo, este procedimiento no entrega un tamaño de partícula único para cada material, sino que para cada malla existe una distribución de tamaños, determinados por las aberturas de las mallas. Para efectos de cálculos, en este trabajo se considerará un tamaño medio de partículas según la gráfica granulométrica, pudiendo así determinar la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual correspondiente a cada material.

Es importante mencionar que se adopta una excepción en el tamaño de partículas para el caso del pellet de plástico y el azúcar, los cuales se obtienen mediante los siguientes métodos:

- Pellet de plástico: Se toma una muestra de 40 partículas y se mide directamente con un pie de metro tanto el ancho como el largo de cada una. Luego, asumiendo que la geometría de partículas es un cilindro, se calcula el volumen y se considera equivalente al volumen de una esfera. Con esto, es posible obtener un tamaño de partícula equivalente al diámetro de una esfera.
- Azúcar: Mediante el escalamiento fotográfico, y comparación con una medida conocida (moneda de $D = 32,5 \text{ mm}$), se registra la medida de 30 partículas de azúcar al azar en un plano 2D, y asumiendo que cada una de ellas tiene una geometría cúbica, se calcula el volumen y se considera equivalente al volumen de una esfera. Con esto, es posible obtener un tamaño de partícula equivalente al diámetro de una esfera.

En el caso de los materiales adicionales considerados para los ensayos de velocidad de purga, se asume un tamaño de partículas igual al valor medio entre mallas consecutivas, como se muestra en la Tabla 4.

4.5 Metodología de trabajo

En esta sección se describen los pasos y procedimientos a seguir para una correcta realización de ensayos en el sistema de transporte neumático construido en el CITRAM. El procedimiento de medición se realiza de igual forma para todos los materiales. Algo importante a tener en cuenta es la consideración de condiciones ambientales estándares, con temperatura ambiente de 20°C y una presión atmosférica de 1 [bar].

1- Proceso de medición para obtener diagramas de estado:

- i. **Montar y verificar elementos de control de flujo:**
 - Instalar placa dosificadora correspondiente a un flujo másico.
 - Verificar cierre de la válvula de globo (on-off).
 - Verificar fugas y limpieza de las cañerías según se requiera.
- ii. **Selección de material y llenado del silo alimentador:**
 - Con ayuda de la balanza digital, pesar los sólidos a ensayar, verter al silo alimentador, y marcar la altura que alcanza 1 kg de material.
 - Tapar silo y tolva de descarga del separador de partículas.
- iii. **Verificar instrumentación:**
 - Verificar que los manómetros estén conectados a las tomas de presión.
 - Ajustar a cero el cronómetro.
- iv. **Energizar el sistema:**
 - Verificar que el soplador esté conectado a la corriente alterna.
 - Manipular el variador de frecuencias según requerimiento de velocidad que se desee.
 - Verificar que no existan fugas en el sistema.
- v. **Puesta en marcha y registro de mediciones:**
 - Abrir válvula de alimentación y esperar que el flujo de “gas + sólidos” se estabilice.
 - Observar y registrar el comportamiento del flujo de sólidos en toda la configuración.

- Registrar las mediciones de los manómetros para ΔP_{placa} y ΔP_t .
- Medir el tiempo de descarga del material en la altura marcada.
- vi. **Desenergizar el sistema:**
 - Esperar vaciado completo del silo alimentador.
 - Apagar el soplador.
- vii. **Repetir el procedimiento según los requerimientos de operación.**

2- Mediciones para obtener la velocidad de purga:

- i. Pesar 0,5 [kg] del material seleccionado para ensayar.
- ii. Llenar la parte inferior de la cañería de transporte con el material.
- iii. Verificar que no existan fugas.
- iv. Verificar que la tolva de descarga del separador de partículas esté tapada.
- v. Energizar el sistema y ajustar el variador de frecuencia en la mínima velocidad posible.
- vi. Aumentar paulatinamente la velocidad del aire, observando y registrando los fenómenos de flujo que se desarrollan al interior de la cañería.
- vii. Registrar la medida del manómetro de placa orificio (ΔP_{placa}), y con ello la velocidad de purga, una vez que todo el material alojado en la parte baja de la cañería se haya transportado al separador de partículas.
- viii. Apagar el soplador y repetir el procedimiento.



Figura 17: Burbujeo de material al inicio del ensayo de purga.

4.6 Curva característica del sistema

La curva característica del sistema representa la caída de presión en función de la velocidad del gas cuando el sistema de transporte neumático trabaja solamente con aire. Para obtener esta curva, se debe medir en los manómetros la caída de presión total del sistema, y la caída de presión de la placa orificio, obteniendo la velocidad del gas indirectamente mediante la ecuación (6). Los valores medidos y calculados se muestran en el Anexo F.

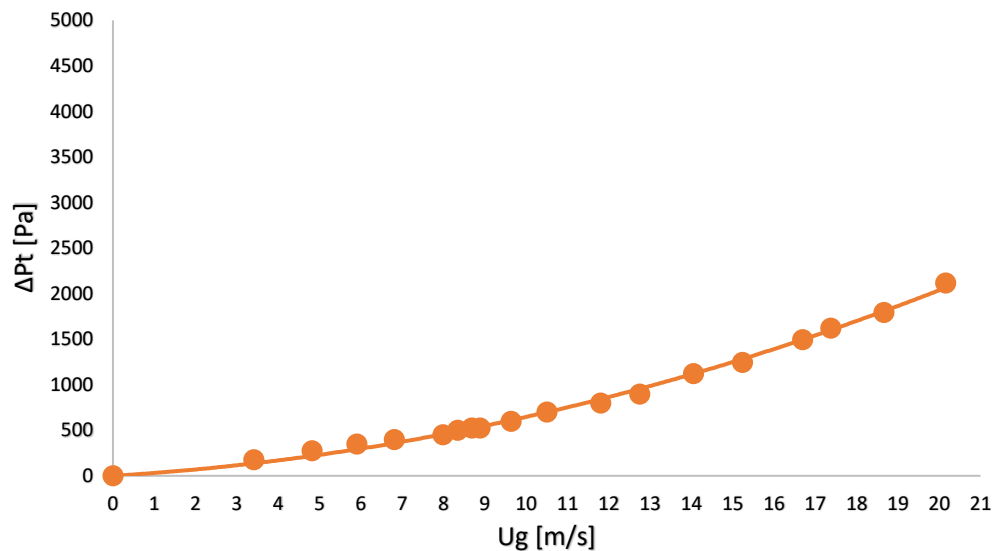


Figura 18: Curva característica del sistema de transporte neumático.

Con la obtención de la curva característica del sistema, es posible determinar y visualizar en el diagrama de estado el aporte que representa el flujo de aire a la caída de presión total del sistema cuando se transportan los sólidos en mezcla bifásica con el gas.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

Una vez realizados los ensayos de laboratorio, con las mediciones obtenidas y los cálculos necesarios, se lograron construir los diagramas de estado para cada uno de los materiales y los distintos flujos en los que se operaron. En cada gráfica se muestra la curva cuando solo se opera con aire en el sistema ($W_s = 0$), y los tres flujos de sólidos correspondientes a las tres placas dosificadoras utilizadas. Además, se puede identificar zonas en los diagramas de estado que ilustran el comportamiento desarrollado por los sólidos a medida que se transportan por el sistema neumático, delimitadas por líneas punteadas que indican tanto la velocidad mínima de transporte ($U_{g\ min}$), como la velocidad crítica de transporte ($U_{g\ crit}$).

Luego de realizados los ensayos de transporte descritos, se procedió con la segunda parte de la experimentación, que consistió en determinar la velocidad de purga de cada uno de los materiales con el fin de relacionarlos con la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual, incluyendo otros materiales como el mineral chancado y piedra molida, con distintas granulometrías, para así tener un mayor número de datos.

5.1 Resultados obtenidos

La experimentación llevada a cabo mediante el sistema de transporte neumático construido resultó de forma correcta. Para todos los materiales ensayados, fue posible visualizar comportamientos de flujo homogéneo al inicio de cada ensayo, luego pulsaciones y ondulaciones a medida que se disminuía la velocidad del gas de transporte, hasta que el material simplemente cae y el sistema colapsa.

Es importante destacar que se intentó realizar ensayos con flujos de sólidos mayores, con diámetros de placas dosificadoras de 28 y 30 [cm], pero no fue posible registrar medidas exactas, ya que los instrumentos de medición no lograban estabilizarse dado el rápido paso del

material por los puntos de medición. Además, el silo se vaciaba rápidamente, dificultando la medición de tiempo en descender un kilogramo de material.

Se pudo observar que, para los materiales menos densos, los rangos de velocidades donde se presentan fenómenos de flujo inestable resultan ser menores que para los materiales más pesados.

A continuación, se muestran los diagramas de estado de los diferentes materiales ensayados en laboratorio CITRAM, y la velocidad de purga (U_{pu}) en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual (U_t). Los detalles de las observaciones y valores obtenidos de cada medición se encuentran en el Anexo G.

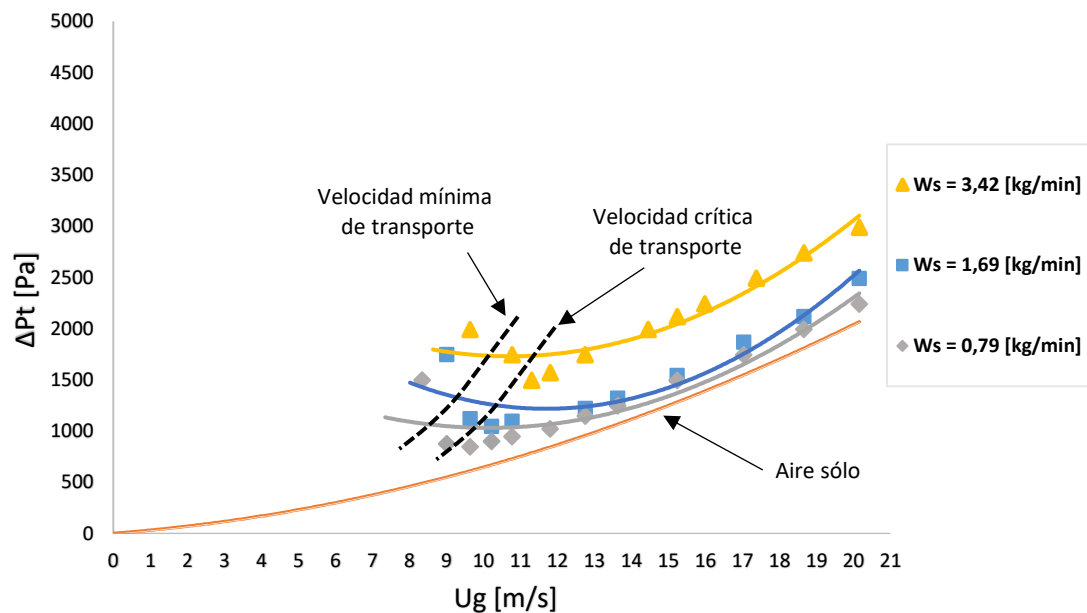


Figura 19: Diagrama de estado del pellet de plástico para tres flujos de sólidos.

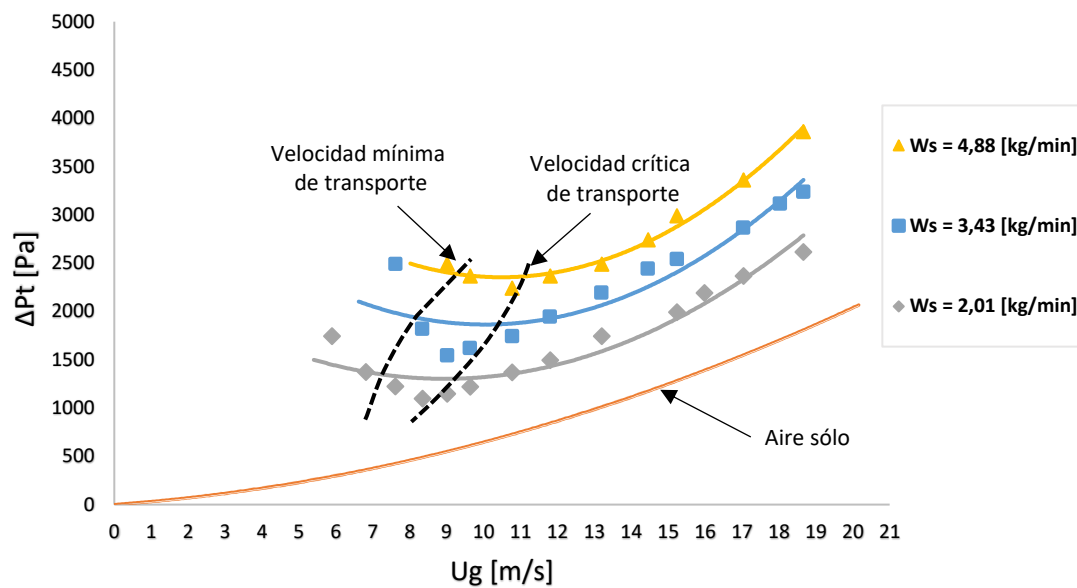


Figura 20: Diagrama de estado del griz de maíz para tres flujos de sólidos.

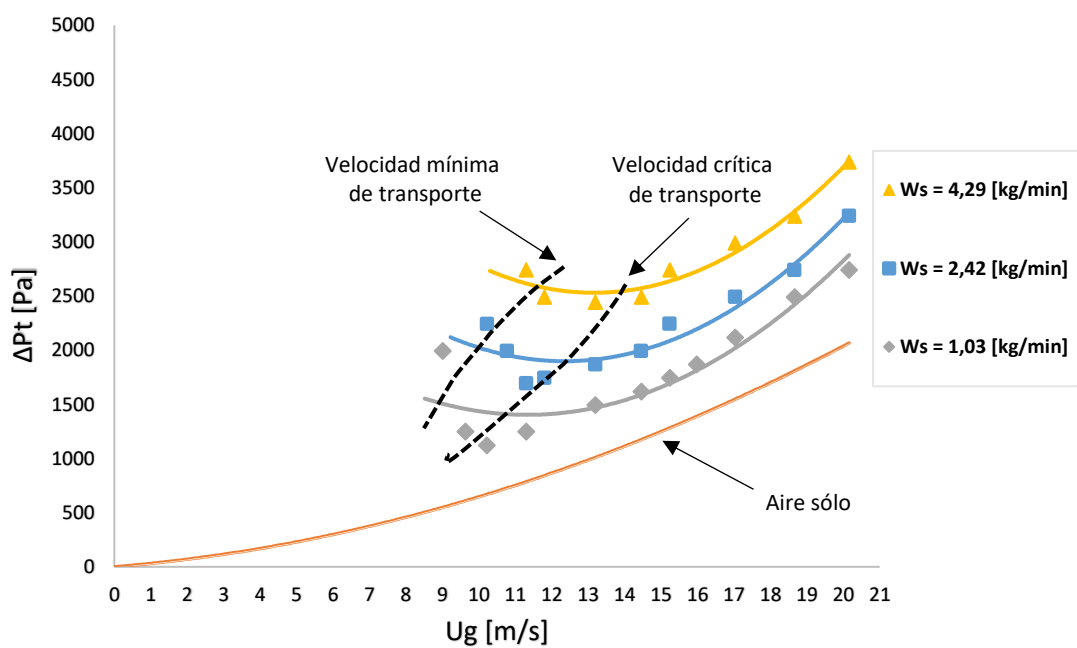


Figura 21: Diagrama de estado del arroz para tres flujos de sólidos.

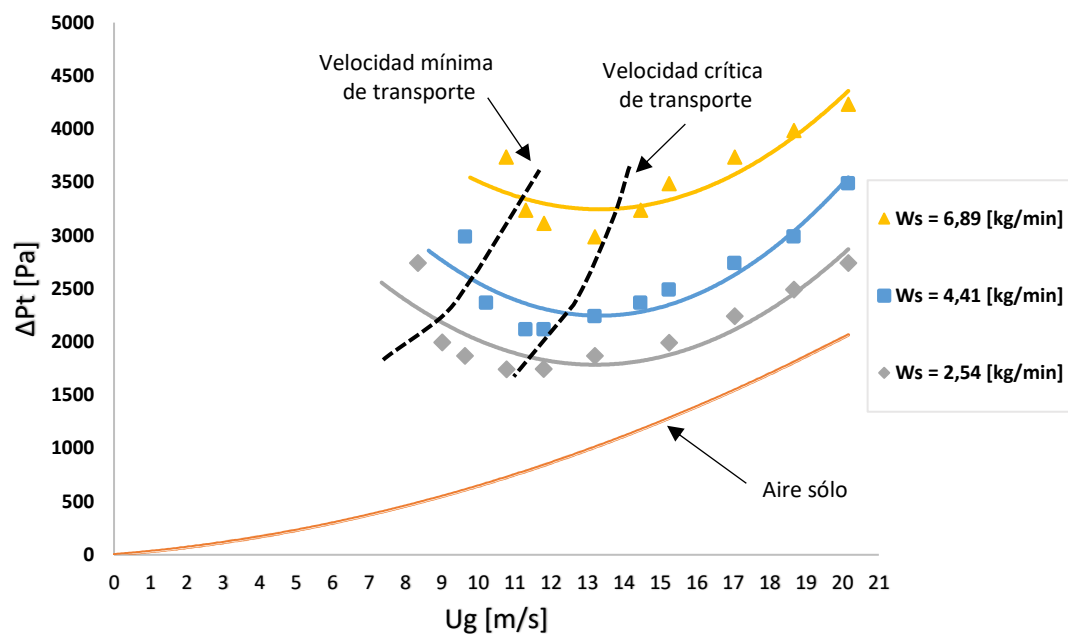


Figura 22: Diagrama de estado del azúcar para tres flujos de sólidos.

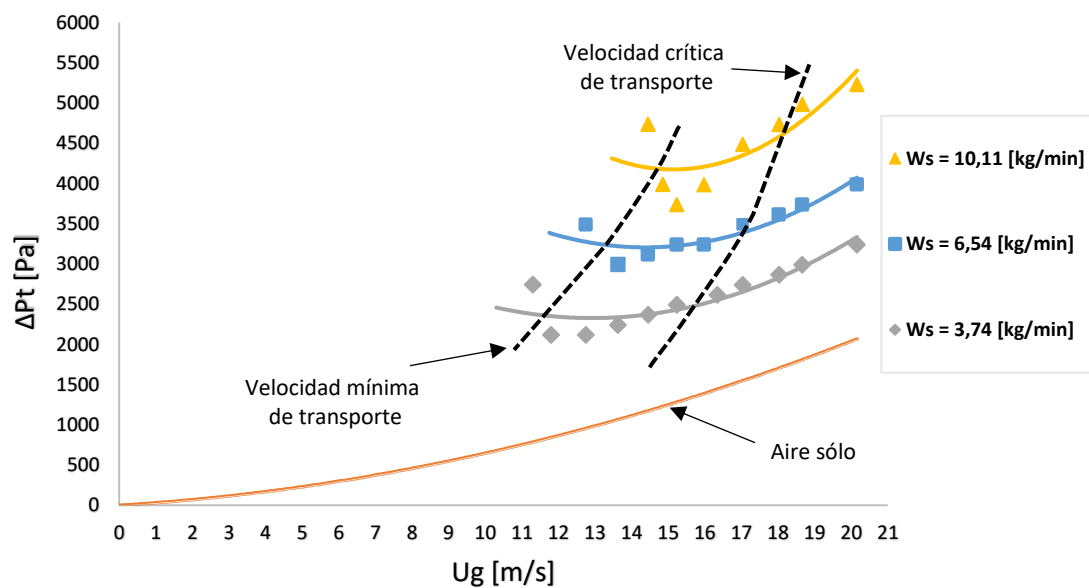


Figura 23: Diagrama de estado de la arena para tres flujos de sólidos.

Se puede apreciar en cada uno de los diagramas de estado que, para velocidades del gas superiores a la velocidad crítica de transporte las mediciones obtenidas resultan tener una tendencia relativamente lineal y paralela entre los distintos flujos de sólidos ensayados. Sin embargo, para velocidades inferiores a la velocidad crítica, aparecen los fenómenos de flujo que condicionan la tendencia de la curva, y reflejan la inestabilidad en el transporte de sólidos.

Además, la caída de presión para cada uno de los flujos de sólidos ensayados resulta ser mayor para los materiales más densos, como es el caso de la arena, dejando en evidencia un mayor consumo de energía al transportar este tipo de material ya sea en condiciones de flujo homogéneo y desarrollado, como para flujo inestable.

Una vez obtenidos los diagramas de estado, se presenta una tabla resumen con los principales parámetros y variables a determinar para el desarrollo de este trabajo y su posterior análisis.

Tabla 5: Resumen de valores obtenidos para la velocidad mínima y crítica de transporte.

Material	ρ_s [kg/m³]	W_s [kg/min]	$U_{g\text{ mín}}$ [m/s]	$\mu_{\text{mín}}$ [—]	$U_{g\text{ crít}}$ [m/s]	$\mu_{\text{crít}}$ [—]
Pellet de plástico	940	0,79	8,80	0,78	10,00	0,69
		1,69	9,60	1,55	10,60	1,40
		3,42	10,50	2,86	11,50	2,61
Gritz de maíz	1370	2,01	7,30	2,45	8,60	2,05
		3,43	8,20	3,68	10,40	2,90
		4,88	9,40	4,56	11,50	3,73
Arroz	1430	1,03	9,50	0,95	11,00	0,82
		2,42	10,40	2,04	12,60	1,69
		4,29	11,60	3,25	14,00	2,69
Azúcar	1520	2,54	8,80	2,53	11,40	1,95
		4,41	10,00	3,87	12,60	3,07
		6,89	11,20	5,40	14,00	4,32
Arena	2480	3,74	11,80	2,83	15,00	2,19
		6,54	13,40	4,35	16,40	3,50
		10,11	14,60	6,08	17,70	5,02

La Tabla 6 y Figura 24 muestran los resultados obtenidos para la velocidad de purga y la velocidad terminal de caída de una partícula individual de todos los materiales ensayados.

Tabla 6: Resumen de los valores obtenidos para la velocidad terminal de caída de una partícula individual y la velocidad de purga.

<i>Material</i>	ρ_s [kg/m ³]	d_p [mm]	<i>Malla</i>	U_{pu} [m/s]	U_t [m/s]
<i>Pellet de plástico</i>	940	2,43	#5 x #10	8,35	6,76
<i>Gritz de Maíz</i>	1370	1,30	#10 x #30	7,23	5,53
<i>Arroz</i>	1430	1,50	#10 x #18	9,02	6,23
<i>Azúcar</i>	1520	1,00	#10 x #50	6,82	4,87
<i>Arena</i>	2480	1,60	#10 x #50	11,81	8,80
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	5,18	1/4" x #5	15,62	17,27
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	3,00	#5 x #10	12,75	12,70
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	1,50	#10 x #18	9,64	8,33
<i>Mineral chancado Cu</i>	2420	0,80	#18 x #30	7,62	5,41
<i>Piedra molida</i>	2630	5,18	1/4" x #5	16,70	18,03
<i>Piedra molida</i>	2630	3,00	#5 x #10	14,86	13,27

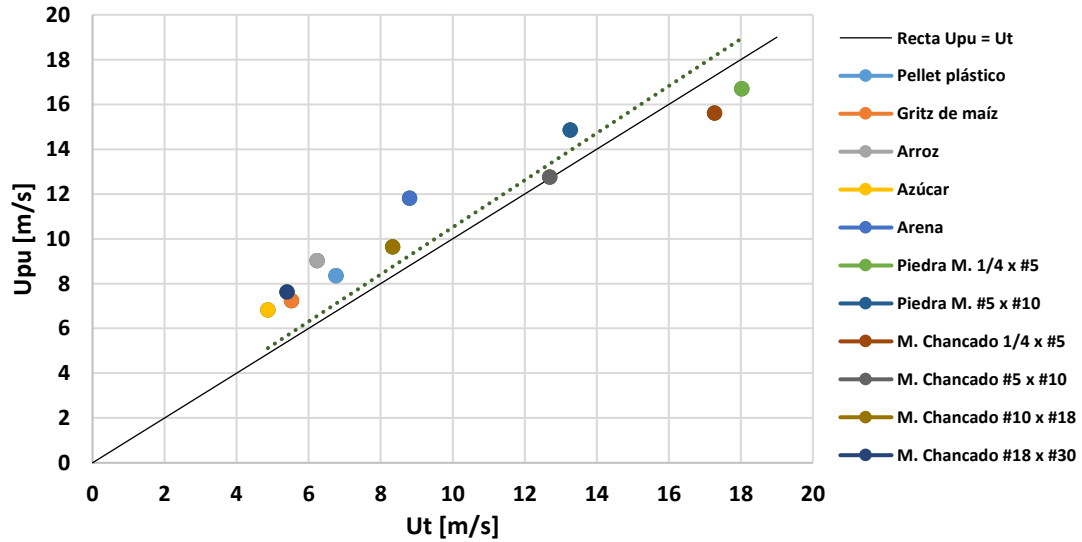


Figura 24: Velocidad de purga (U_{pu}) en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual (U_t) para todos los materiales ensayados.

5.2 Análisis de resultados

A continuación se presenta un análisis de uno de los parámetros más relevantes a la hora de diseñar un sistema de transporte neumático, la velocidad mínima de transporte para la configuración vertical construida, en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual.

5.2.1 Velocidad mínima y crítica de transporte

Para este trabajo, se definió la velocidad mínima de transporte como la mínima velocidad del gas a la cual aún existe un transporte vertical de sólidos a granel, existiendo o no comportamientos inestables, como ondulaciones y/o pulsaciones. Es importante destacar que el criterio para determinar esta velocidad de forma experimental, se basa primordialmente en la observación visual de lo que ocurre dentro de la cañería de transporte, identificando los patrones de flujo y el valor de presión en los manómetros disponibles en el laboratorio. Es por esto que se definen dos tipos de velocidades de transporte de sólidos: velocidad mínima de transporte y velocidad crítica de transporte.

La velocidad crítica de transporte corresponde a la velocidad del gas a la cual comienzan a aparecer distintos tipos de flujos dentro de la cañería, delimitando de esta forma un transporte de sólidos bajo un régimen homogéneo y desarrollado, de un flujo con comportamiento inestable.

En la Figura 25 se muestra una relación del factor adimensional $U_{g\text{ mín}}/U_t$, en función de la relación de carga para cada uno de los materiales ensayados. En este gráfico se puede apreciar que a medida que aumenta la relación de carga (y con ello el flujo de sólidos) dentro de la cañería, el factor $U_{g\text{ mín}}/U_t$ aumenta. Esto refleja que la velocidad mínima del gas de transporte debe ser mayor a medida que la concentración de sólidos se incrementa.

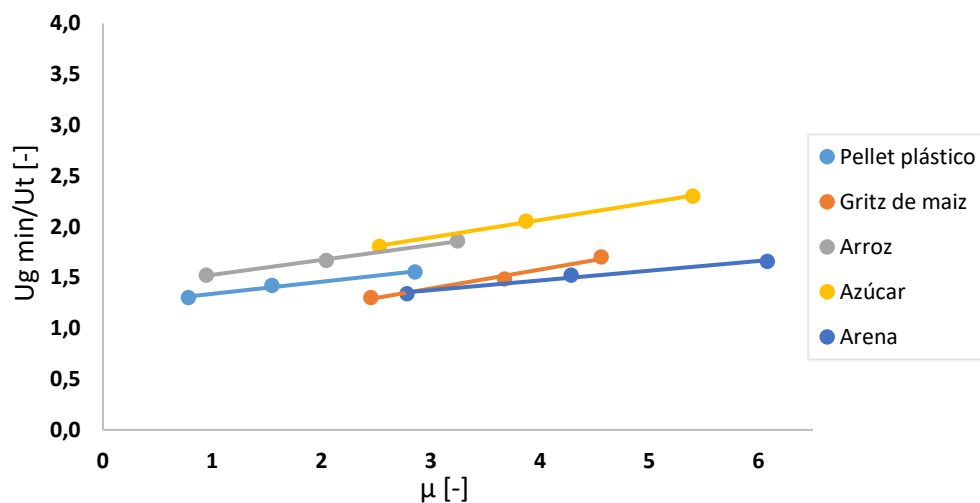


Figura 25: Relación de la velocidad mínima ($U_{g \min}/U_t$) en función de la relación de carga (μ) en el sistema.

De igual manera ocurre con la velocidad crítica de transporte, como se puede observar en la Figura 26.

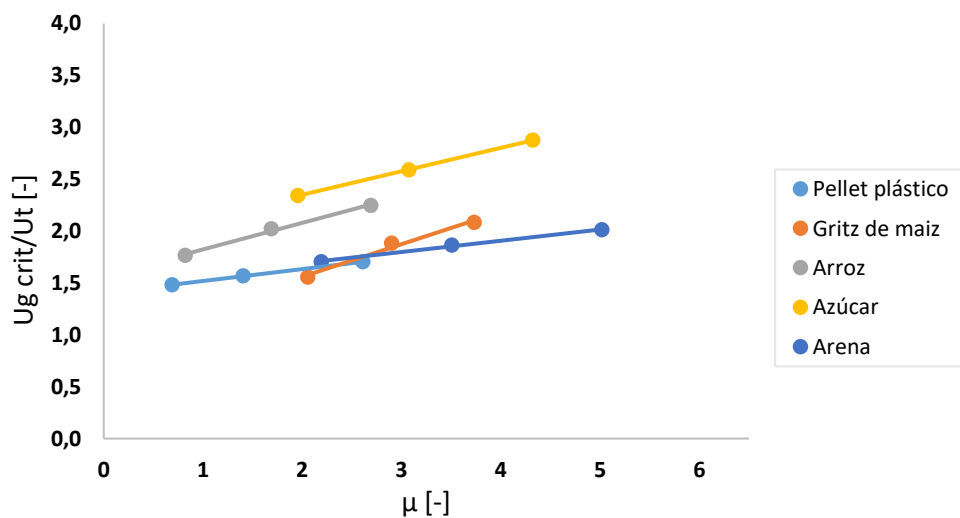


Figura 26: Relación de la velocidad crítica ($U_{g \text{ crit}}/U_t$) en función de la relación de carga (μ) en el sistema.

Teniendo clara dependencia de los factores $U_{g\text{ mín}}/U_t$ y $U_{g\text{ mín}}/U_t$ con la relación de carga μ para cada uno de los materiales, se propone una relación de tendencia lineal que relacione todos los materiales ensayados, según el criterio de velocidad mínima ($U_{g\text{ mín}}$) y velocidad crítica ($U_{g\text{ crít}}$) de transporte, para los distintos flujos de sólidos en los que se operó.

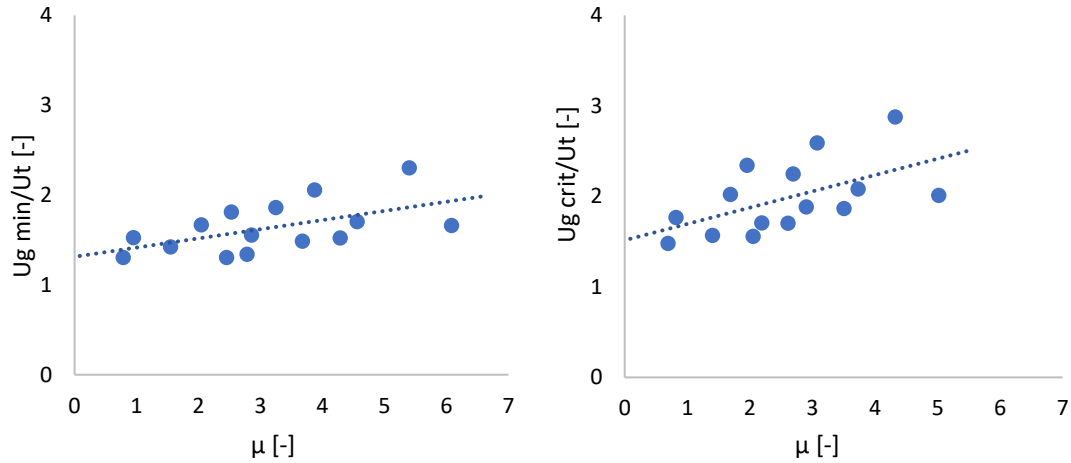


Figura 27: Tendencia lineal de los factores de velocidad mínima y crítica en función de la relación de carga en el sistema.

- Velocidad mínima de transporte:

$$U_{g\text{ mín}} = (0,102 * \mu + 1,3134) * U_t \quad (7)$$

- Velocidad crítica de transporte:

$$U_{g\text{ crít}} = (0,18 * \mu + 1,5155) * U_t \quad (8)$$

Con estas relaciones es posible obtener la velocidad de mínima y la velocidad crítica de transporte de los materiales, para cada una de las condiciones de operación ensayadas.

Tabla 7: Comparación de valores medidos y los calculados con el modelo propuesto para la velocidad mínima de transporte.

<i>Material</i>	<i>W_s [kg/min]</i>	<i>$\mu_{\min}$ [-]</i>	<i>$U_{g \min}$ calculado [m/s]</i>	<i>$U_{g \min}$ medido [m/s]</i>
Pellet de plástico	$W_{s1} = 0,78$	0,78	9,41	8,80
	$W_{s2} = 1,69$	1,55	9,94	9,60
	$W_{s3} = 3,42$	2,86	10,84	10,50
Gritz de maíz	$W_{s1} = 2,01$	2,45	8,64	7,30
	$W_{s2} = 3,43$	3,68	9,33	8,20
	$W_{s3} = 4,88$	4,56	9,83	9,40
Arroz	$W_{s1} = 1,03$	0,95	8,79	9,50
	$W_{s2} = 2,42$	2,04	9,49	10,40
	$W_{s3} = 4,29$	3,25	10,25	11,60
Azúcar	$W_{s1} = 2,54$	2,53	7,65	8,80
	$W_{s2} = 4,41$	3,87	8,32	10,00
	$W_{s3} = 6,89$	5,40	9,08	11,20
Arena	$W_{s1} = 3,74$	2,78	14,06	11,80
	$W_{s2} = 6,54$	4,29	15,41	13,40
	$W_{s3} = 10,11$	6,08	17,02	14,60

Para observar la dispersión y desviación de los datos calculados de velocidad respecto a los medidos en laboratorio, se muestra la siguientes gráfica, donde la línea recta representa la situación ideal cuando “ $U_{g \text{ calculado}} = U_{g \text{ medido}}$ ”:

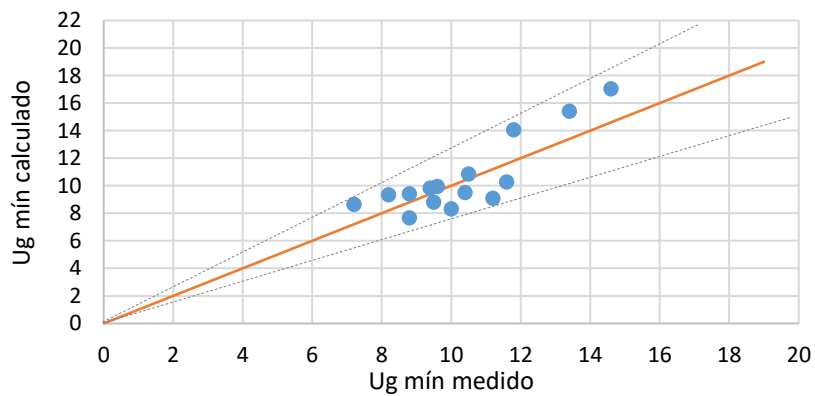


Figura 28: Dispersión y desviación de velocidades mínimas de transporte calculadas con respecto a las velocidades medidas.

Tabla 8: Comparación de valores medidos y los calculados con el modelo propuesto para la velocidad crítica de transporte.

<i>Material</i>	W_s [kg/min]	$\mu_{crít}$ [-]	$U_{g\ crít\ calculado}$ [m/s]	$U_{g\ crít\ medido}$ [m/s]
Pellet de plástico	$W_{s1} = 0,78$	0,69	11,08	10,00
	$W_{s2} = 1,69$	1,40	11,95	10,60
	$W_{s3} = 3,42$	2,61	13,41	11,50
Gritz de maíz	$W_{s1} = 2,01$	2,05	10,42	8,60
	$W_{s2} = 3,43$	2,90	11,26	10,40
	$W_{s3} = 4,88$	3,73	12,08	11,50
Arroz	$W_{s1} = 1,03$	0,82	10,37	11,00
	$W_{s2} = 2,42$	1,69	11,34	12,60
	$W_{s3} = 4,29$	2,69	12,47	14,00
Azúcar	$W_{s1} = 2,54$	1,95	9,09	11,40
	$W_{s2} = 4,41$	3,07	10,07	12,60
	$W_{s3} = 6,89$	4,32	11,16	14,00
Arena	$W_{s1} = 3,74$	2,19	16,81	15,00
	$W_{s2} = 6,54$	3,50	18,89	16,40
	$W_{s3} = 10,11$	5,02	21,28	17,70

De igual forma para la velocidad crítica, se muestra la gráfica de dispersión y desviación de los datos calculados de velocidad respecto a los medidos.

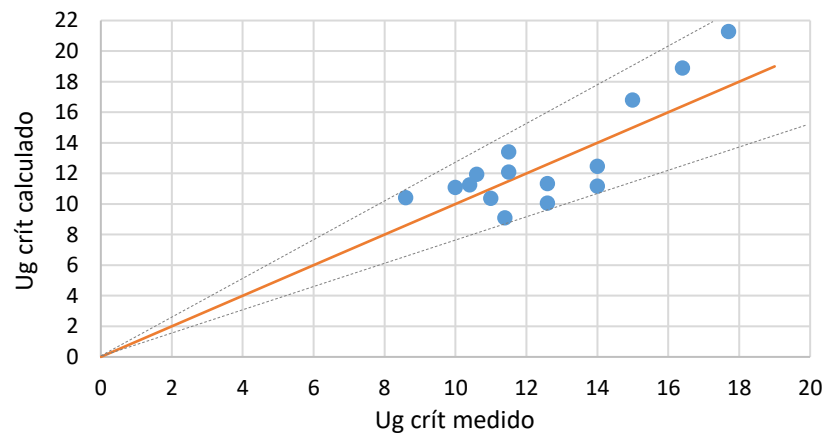


Figura 29: Dispersión y desviación de velocidades críticas de transporte calculadas con respecto a las velocidades medidas.

Para contrastar los valores calculados con los correspondientes a las mediciones realizadas en los ensayos de laboratorio, y comprobar la validez del modelo propuesto, se define un error promedio según la desviación que presenta cada valor calculado respecto del medido, el cual se obtiene con la siguiente relación:

$$Error [\%] = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum \left(\frac{(U_g \text{ medido} - U_g \text{ calculado})}{(U_g \text{ medido})} \right)^2} * 100 \quad (9)$$

dónde:

$U_g \text{ medido}$: Velocidad mínima o crítica de transporte medida [m/s]

$U_g \text{ calculado}$: Velocidad mínima o crítica de transporte calculada [m/s]

N : Número de datos [—]

Por lo tanto, el error promedio de las relaciones propuestas es de un 13% para la velocidad mínima de transporte ($U_{g \text{ min}}$), y de un 15% para el caso de la velocidad crítica de transporte ($U_{g \text{ crit}}$).

Como muestran las Figuras 28 y 29, los valores calculados mediante las relaciones propuestas se asemejan bastante a los obtenidos en los ensayos de laboratorio. El modelo cumple satisfactoriamente para materiales como el pellet de plástico, gritz de maíz y arena, donde las velocidades mínimas y críticas de transporte están por sobre el valor de las velocidades medidas empíricamente, dotándolas de un factor de seguridad a la hora de considerar el modelo para el diseño de un sistema de transporte neumático. Sin embargo, para el caso del arroz y azúcar, las relaciones arrojan valores inferiores a las medidos, lo cual puede deberse a que el tamaño de partículas asumido es inadecuado, y como consecuencia una equivalencia esférica errónea para efectos de cálculos.

5.2.2 Velocidad de purga

Tal como se define en el punto 2.9.1, la velocidad de purga corresponde a la velocidad para desatollar una cañería tapada, y vaciar la línea de transporte.

Mediante los ensayos de laboratorio se logró obtener experimentalmente la velocidad de purga de cada material, como se aprecia en la Tabla 6.

Teóricamente es necesario que la velocidad mínima del gas para lograr la purga del material almacenado en el fondo de la cañería sea mayor a la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual, de lo contrario el material no subiría y colapsaría sin desalojar la zona de transporte. Con el fin lograr relacionar estas velocidades, se grafica la velocidad de purga del material (U_{pu}) en función de la velocidad terminal de caída de una partícula (U_t), para verificar la condición antes expuesta.

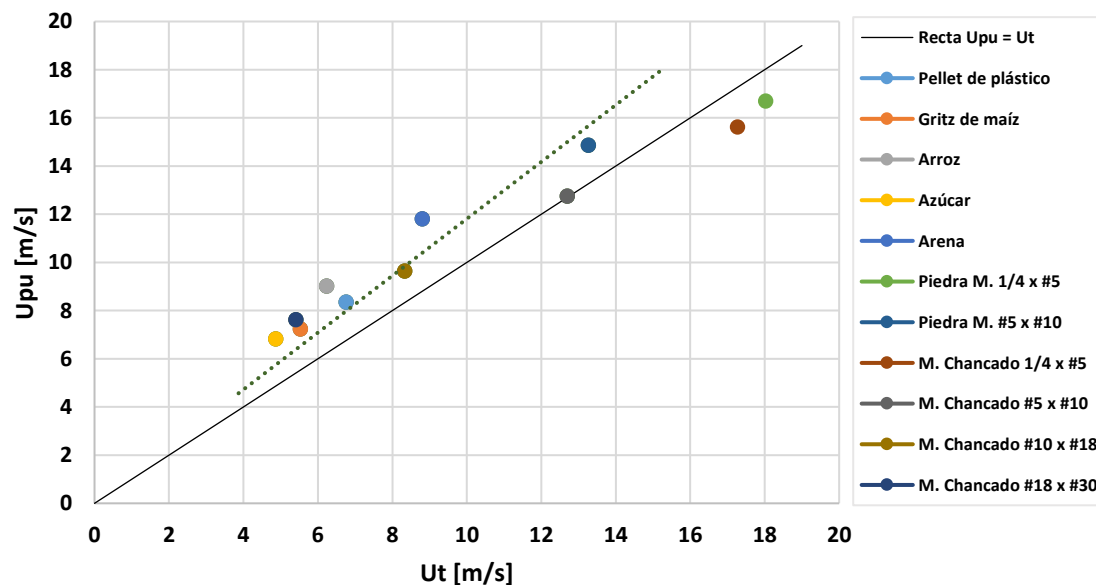


Figura 30: Velocidad de purga (U_{pu}) en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual (U_t).

Como se puede observar en la Figura 30, la mayoría de los materiales poseen una velocidad de purga mayor a la recta delimitante $U_{pu} = U_t$, por lo que efectivamente, la velocidad requerida para vaciar la cañería tapada supera la velocidad terminal de caída de una partícula individual. Sin embargo, para el caso del mineral chancado de cobre y piedra molida con material retenido en malla $\frac{1}{4}" \times \#5$, la velocidad de purga resulta ser menor que la velocidad terminal de caída de una partícula individual, lo cual no cumple con el requerimiento mínimo. Por lo tanto, para determinar una relación entre estos dos parámetros y para efectos de cálculo, no se incluye el efecto de dichos puntos fuera de la condición inicial necesaria, y mediante mínimos cuadrados se traza una tendencia lineal, obteniéndose la siguiente relación:

$$U_{pu} = 1,181 * U_t \quad (10)$$

Esta relación define la velocidad de purga en función de la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual, bajo las suposiciones de tamaño medio de partícula entre mallas y su forma esférica, para los materiales ensayados.

La Tabla 9 muestra los valores de velocidad de purga obtenidos mediante el modelo propuesto, y permite la comparación con respecto a los valores empíricamente medidos.

Tabla 9: Velocidades de purga medidos y calculados con el modelo propuesto.

Material	ρ_s [kg/m³]	d_p [mm]	U_t [m/s]	U_{pu} medido [m/s]	U_{pu} calculado [m/s]
Pellet de plástico	940	2,43	6,76	8,35	7,98
Grits de maíz	1370	1,30	5,53	7,23	6,53
Arroz	1430	1,50	6,23	9,02	7,36
Azúcar	1520	1,00	4,87	6,82	5,75
Arena	2480	1,60	8,80	11,81	10,39
Piedra molida #5 x #10	2630	3,00	13,27	14,86	15,67
Mineral chancado Cu #5 x #10	2420	3,00	12,70	12,75	15,00
Mineral chancado Cu #10 x #18	2420	1,50	8,33	9,64	9,84
Mineral chancado Cu #18 x #30	2420	0,80	5,41	7,62	6,38

El error promedio de la relación propuesta alcanza un 12 %. Si bien los valores obtenidos mediante la relación planteada presentan un error respecto a los medidos experimentalmente, éstos cumplen con la condición de sobrepasar la velocidad terminal de caída libre de una partícula, por lo que se considera que el modelo propuesto es válido para los materiales en cuestión, y bajo las condiciones de operación mencionadas en este trabajo.

Es importante destacar que al considerar la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual en las relaciones propuestas, se incluye el efecto que pueda tener la densidad y el tamaño de partículas de los materiales, por lo que resulta ser un modelo bastante general y práctico a la hora de determinar la velocidad de purga. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la cañería implementada en este trabajo es de un diámetro determinado y constante (45 mm I.D). Probablemente las partículas más gruesas usadas en estos ensayos, con tamaños por sobre los 4 mm, se vieron afectadas en una cañería de sección tan pequeña, como es el caso del mineral chancado de cobre y la piedra molida con material retenido en malla ¼" x #5.

En consecuencia, la velocidad real del gas dentro de la cañería se debe calcular de la siguiente forma:

$$U_{g \text{ real}} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4} - A_p} \text{ [m/s]} \quad (11)$$

donde A_p corresponde al área ocupada por las partículas en la sección de la cañería de transporte.

Por lo tanto, la velocidad real necesaria para vaciar la cañería resulta ser mayor que la experimentalmente obtenida, y es por esto que, para partículas relativamente más grandes, es necesario utilizar un diámetro de cañería mayor, para que no influya en el área efectiva de la sección, y, por ende, en la medición.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El dimensionamiento y operación de un sistema de transporte neumático se basa en correlaciones empíricas y ensayos experimentales de laboratorio para comprender y adoptar un diseño óptimo para cada operación y material granular.

En el presente trabajo se buscó aportar con conocimientos empíricos que modelen parámetros tan importantes como es la determinación de la velocidad mínima de transporte en un sistema de transporte neumático vertical, junto con parámetros relevantes que influyen en la operación del mismo.

Para lograr responder a las interrogantes planteadas en los objetivos de este trabajo de titulación, se diseñó e implementó un sistema de transporte neumático de orientación vertical en el Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (CITRAM), dependiente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, que permitió experimentar y desarrollar los diagramas de estado para comprender de manera concreta el funcionamiento del sistema, bajo determinadas condiciones de operación.

Se logró medir y relacionar parámetros influyentes en el diseño de un sistema de transporte, y comprobar la gran influencia de las características y propiedades de fluidez de los materiales, principalmente su densidad y el tamaño de las partículas.

6.1 Conclusiones

Los objetivos planteados al inicio del presente trabajo fueron cumplidos a cabalidad, logrando obtener resultados satisfactorios, y permitiendo analizar cada uno de ellos con el mayor criterio posible.

Los diagramas de estado permitieron identificar punto claves del sistema, como es la velocidad mínima de transporte y la velocidad crítica de transporte, definidas en el Capítulo 2. También se logró relacionar estas variables con parámetros intrínsecos de los materiales a transportar, como es el tamaño y la densidad de partículas, que afectan a la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual. En función de esto, se proponen relaciones empíricas para determinar las velocidades mencionadas, de acuerdo a los materiales ensayados.

- Velocidad mínima de transporte:

$$U_{g \text{ mín}} = (0,102 * \mu + 1,3134) * U_t \quad (7)$$

- Velocidad crítica de transporte:

$$U_{g \text{ crít}} = (0,18 * \mu + 1,5155) * U_t \quad (8)$$

Los errores promedios de estas relaciones corresponden a un 13% para la velocidad mínima de transporte, y un 15% para el caso de la velocidad crítica de transporte.

Además, se midió la velocidad de purga para todos los materiales seleccionados, logrando relacionarla con la velocidad terminal de caída libre de una partícula individual mediante un modelo lineal. Esto permite obtener de forma práctica la velocidad del gas para desatollar una cañería que se encuentra tapada con material.

➤ Velocidad de purga:

$$U_{pu} = 1,181 * U_t \quad (10)$$

El error presente en esta relación alcanza un 12% con respecto a los valores medidos experimentalmente.

Si bien los modelos propuestos están afectos a un error relativamente bajo, se recomienda utilizarlas con discreción, y con las consideraciones mencionadas este trabajo.

6.2 Recomendaciones

Es importante considerar para trabajos a futuro lo siguiente:

Se recomienda ensayar una mayor gama de materiales sólidos a granel, con distinto tamaño de partículas y densidades, con tal de tener un espectro más amplio de datos y fenómenos que ocurren al momento de transportar materiales, y así estimar de mejor manera un modelo analítico que los represente.

Mejorar el sistema de alimentación de sólidos existente, con el fin de tener un control más fino de las partículas que se desee transportar.

Probar, medir y comprobar los fenómenos de flujo que ocurren en un sistema neumático vertical al variar los diámetros de cañería en las zonas de aceleración y transporte.

REFERENCIAS

- [1] Konno H. y Saito S., “Pneumatic Conveying of Solids Through Straight Pipes”, Journal of Chem. Eng. Of Japan, Vol. 2, No. 2 (1969).
- [2] Cabrejos F., “Transporte Neumático”, Editorial USM, 1° Edición, Julio 2013.
- [3] Klinzing G., Rizk F., Marcus R., Leung L., “Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach”, 3rd Edition, (1997).
- [4] Rojas D., “Efecto del Tamaño de Partícula en un Sistema de Transporte Neumático Vertical”, memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, UTFSM, 2006, Chile.
- [5] López F., “Efecto de la Densidad de Partícula en un Sistema de Transporte Neumático Vertical”, memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, UTFSM, 2006, Chile.
- [6] Weippert V., “Desarrollo de Programa Computacional para el Diseño y Diagnóstico de Sistemas de Transporte Neumático en Fase Diluida”, memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, UTFSM, 2016, Chile.
- [7] Jenike & Johanson Chile, “Seminario sobre Manejo, Almacenamiento y Transporte Neumático de Materiales Sólidos a Granel”, Viña del Mar, 2017.
- [8] www.inn.cl
- [9] Klinzing G., Gas-Solid Transport (McGraw – Hill Book, 1981).
- [10] Cabrejos F., “Propiedades de Fluidéz de los Materiales Sólidos a Granel”, I Congreso de Metalurgia Internacional de año 2001 realizada en Arequipa, Perú.
- [11] www.astm.org



- [12] Jofré M., “Diseño e Implementación de un Sistema Experimental para el Transporte Neumático de Materiales Sólidos a Granel”, memoria para optar al título de Ingeniero Mecánico Industrial, UTFSM, 2003, Chile.

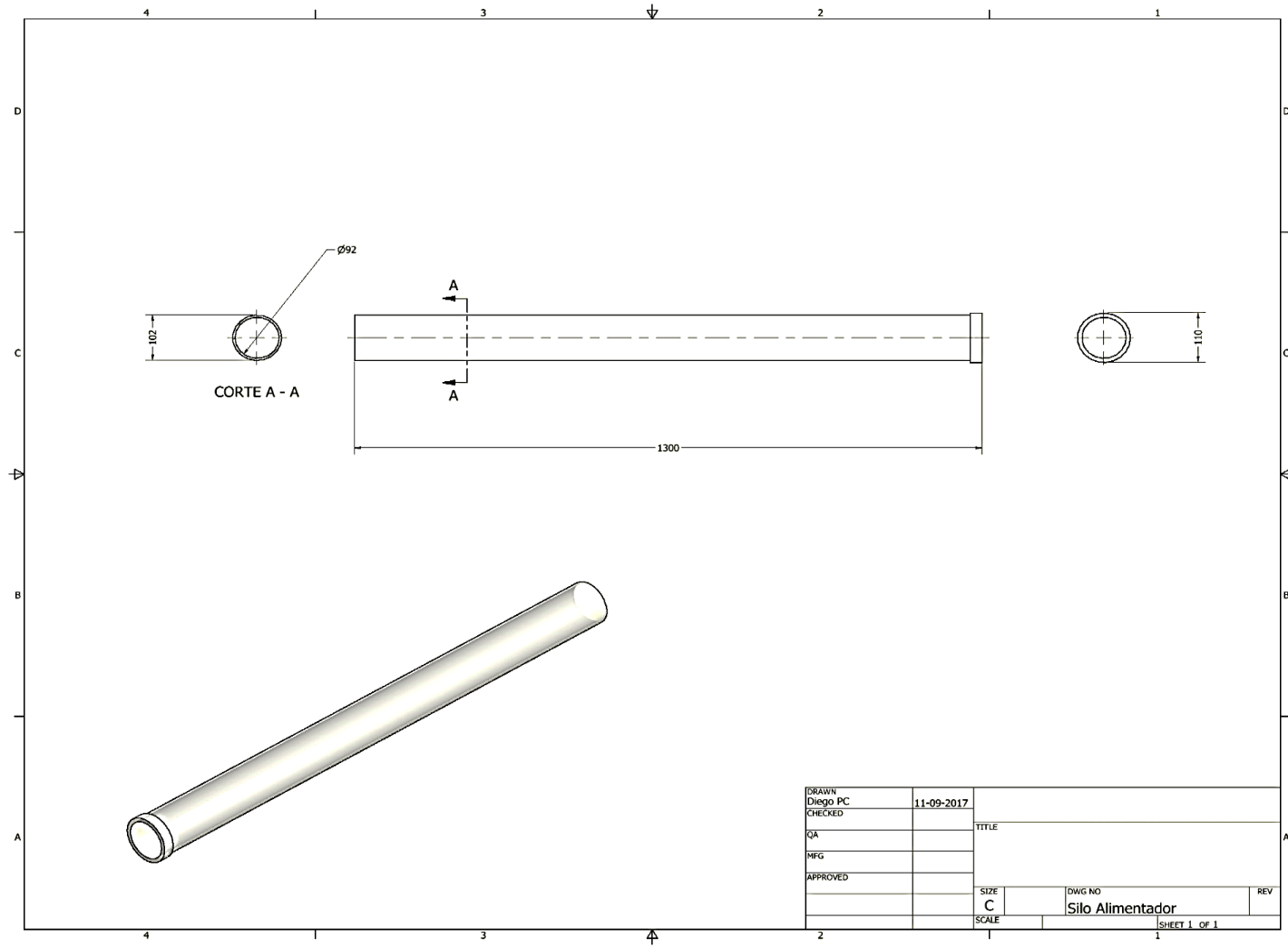
- [13] Shames I., “Mecánica de Fluidos”, Mc. Graw-Hill, 3° Edición 1995.

- [14] Mills D., “Pneumatic Conveying Desing Guide”, 2nd. Edition (2004).

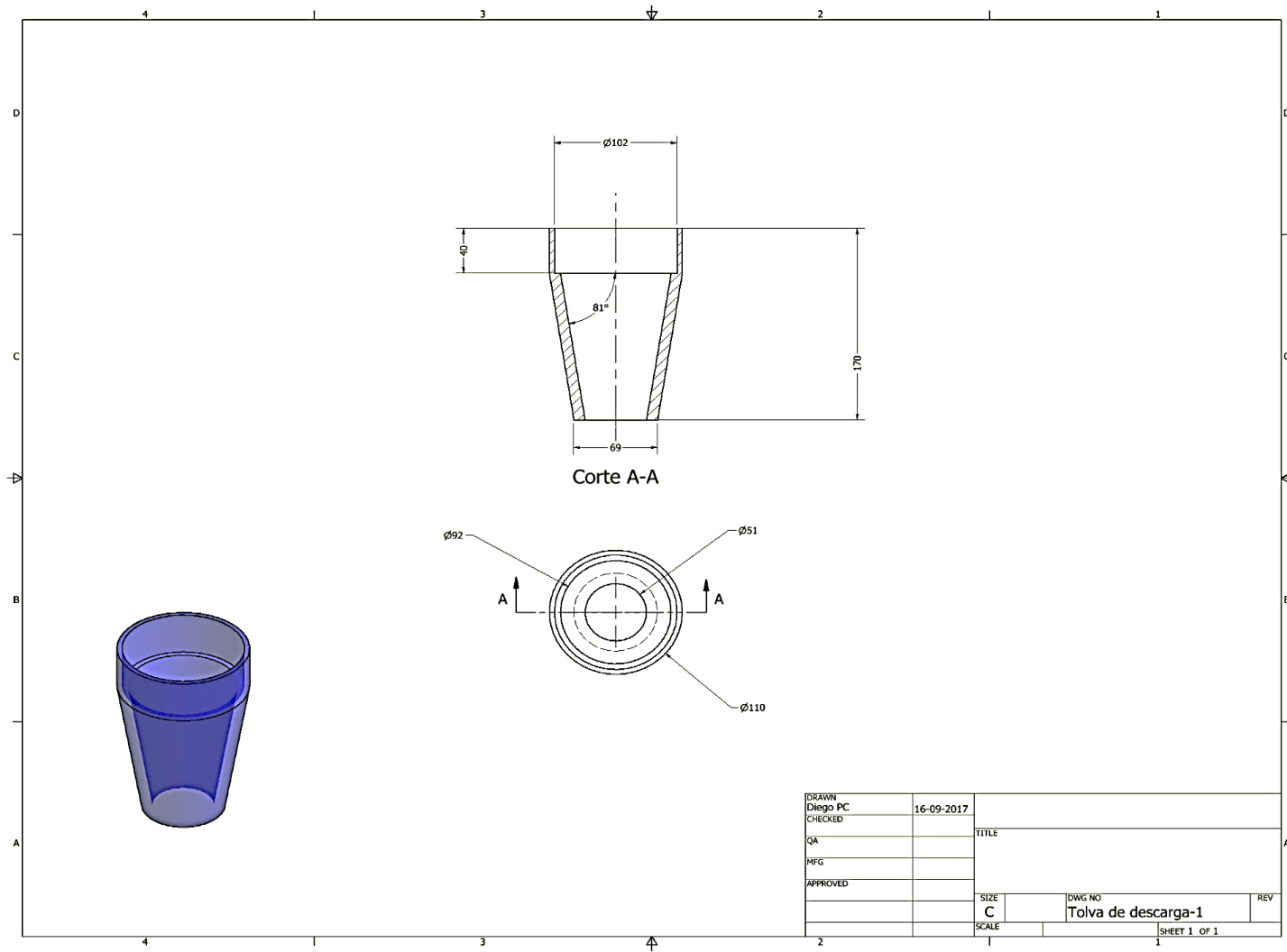
ANEXOS

A. Planos

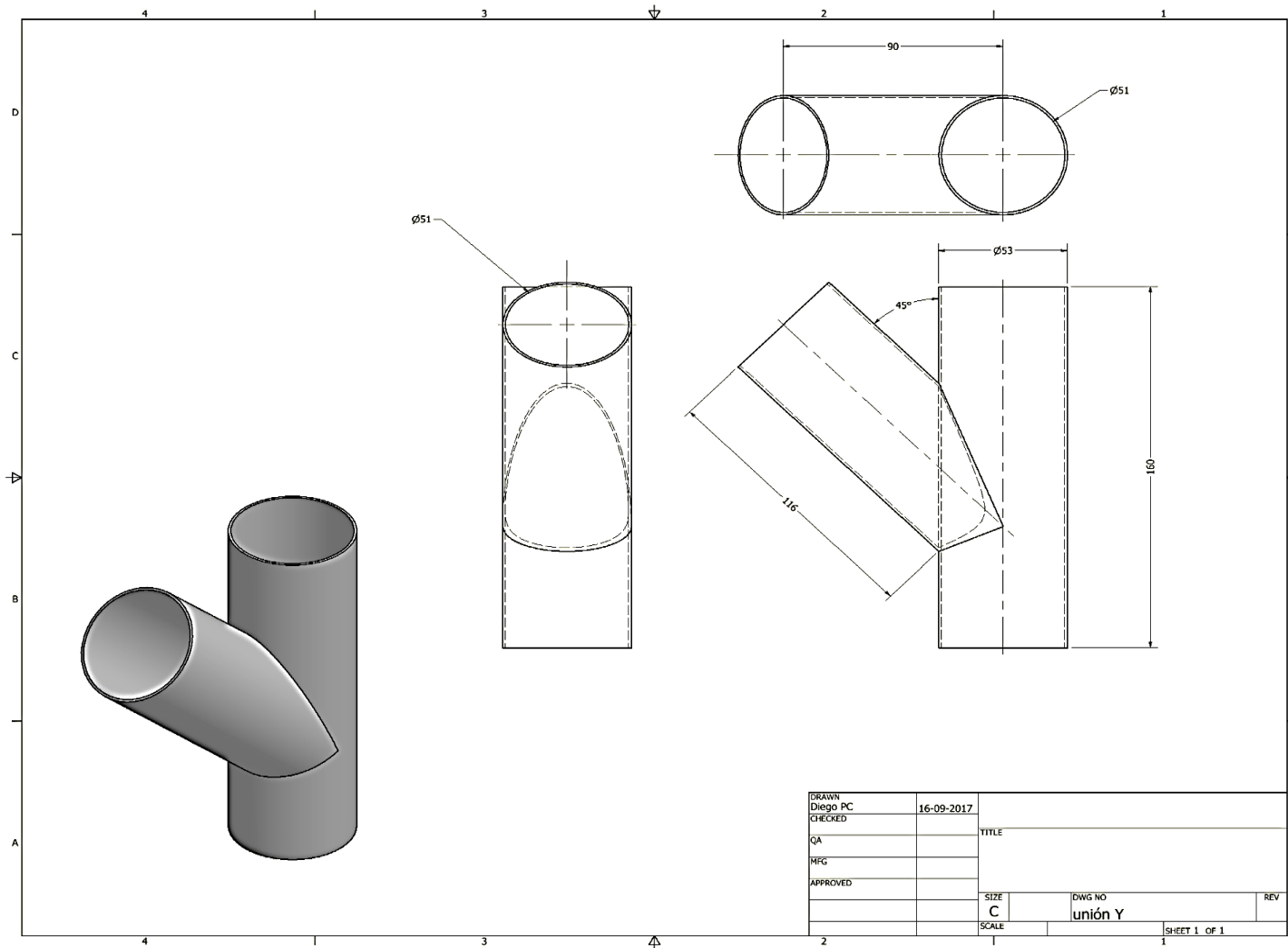
A.1 Silo alimentador:



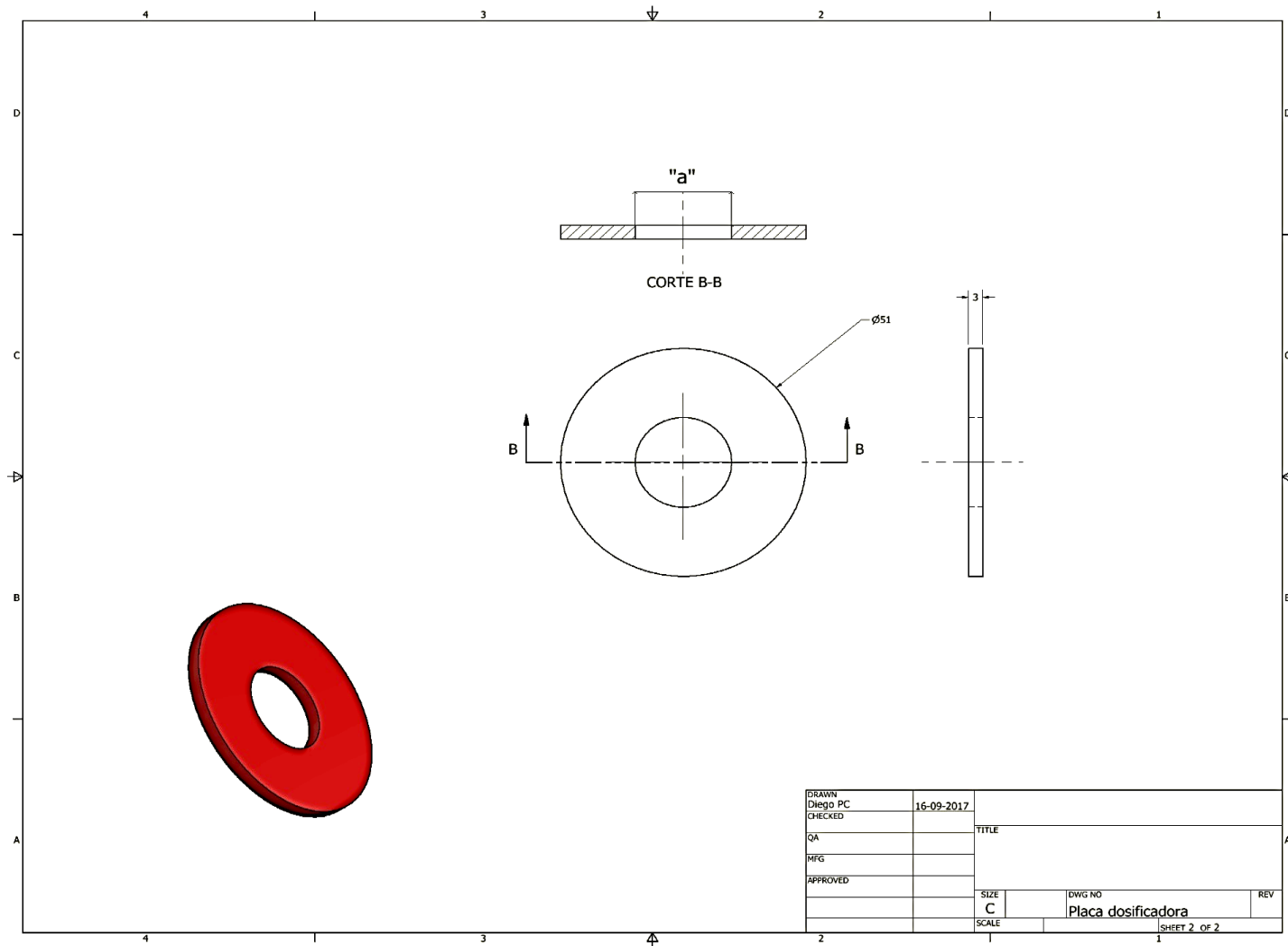
A.2 Tolva de descarga:



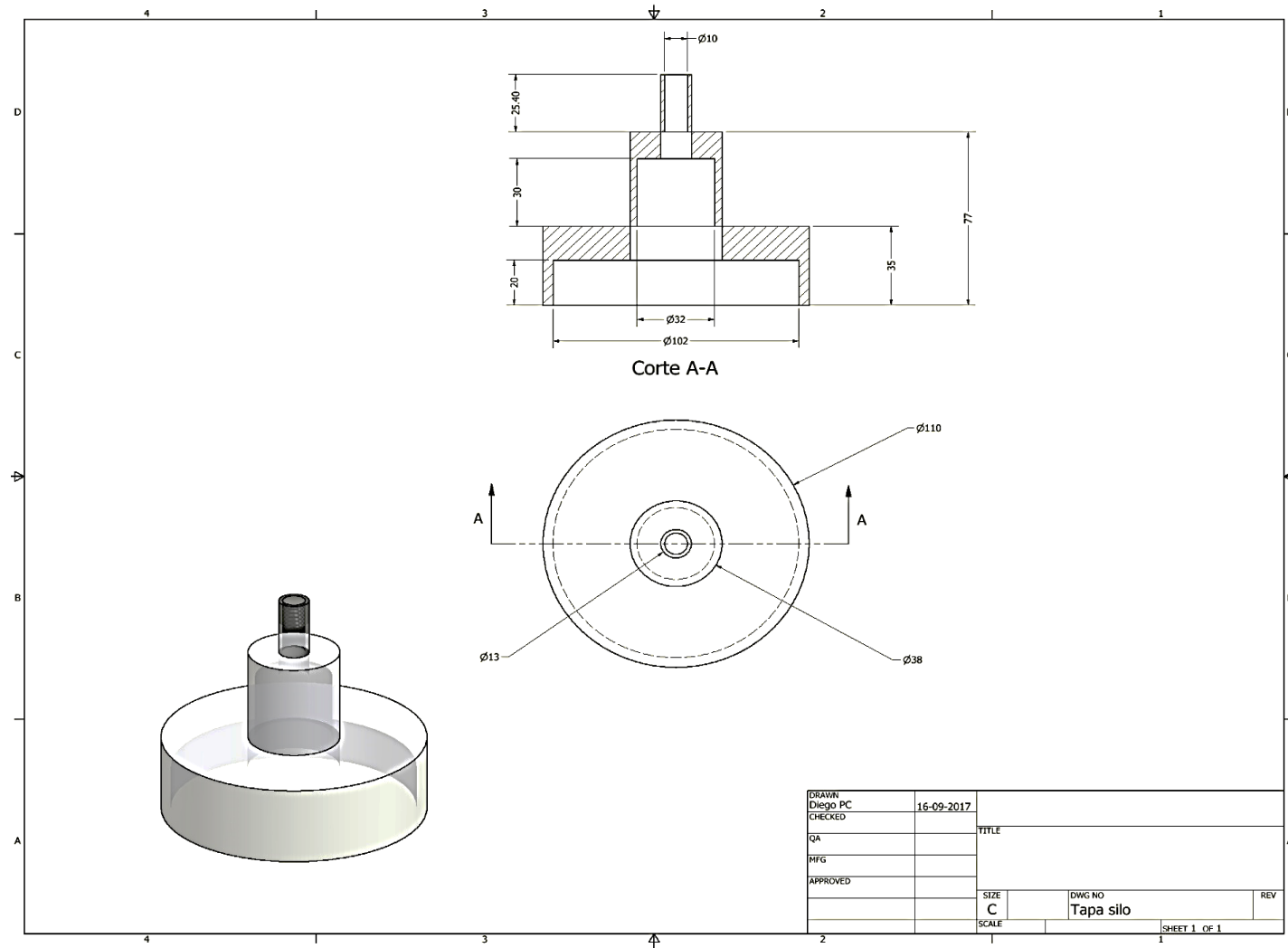
A.3 Empalme (unión en “Y”):



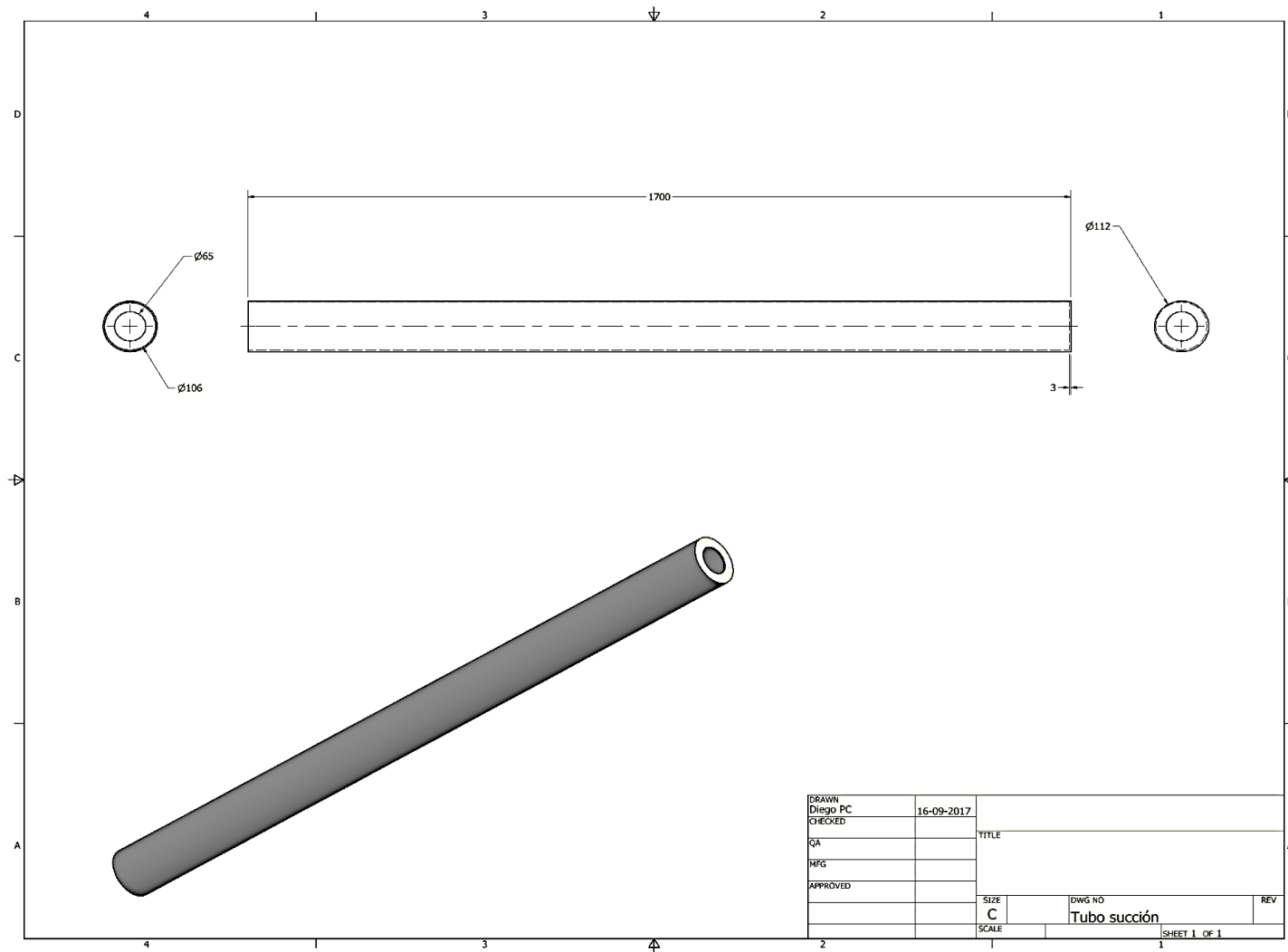
A.4 Placa dosificadora:



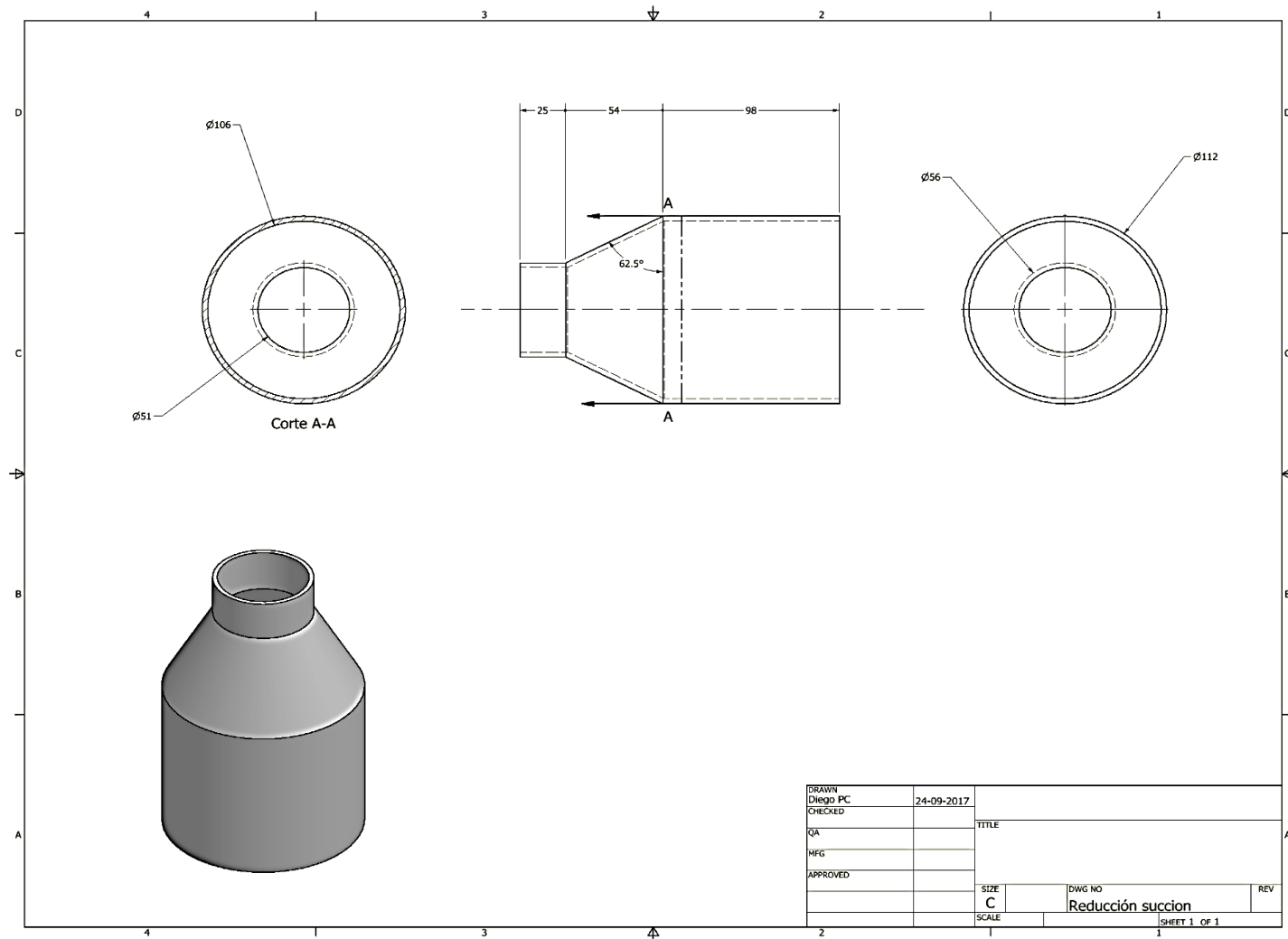
A.5 Tapa de silo alimentador:



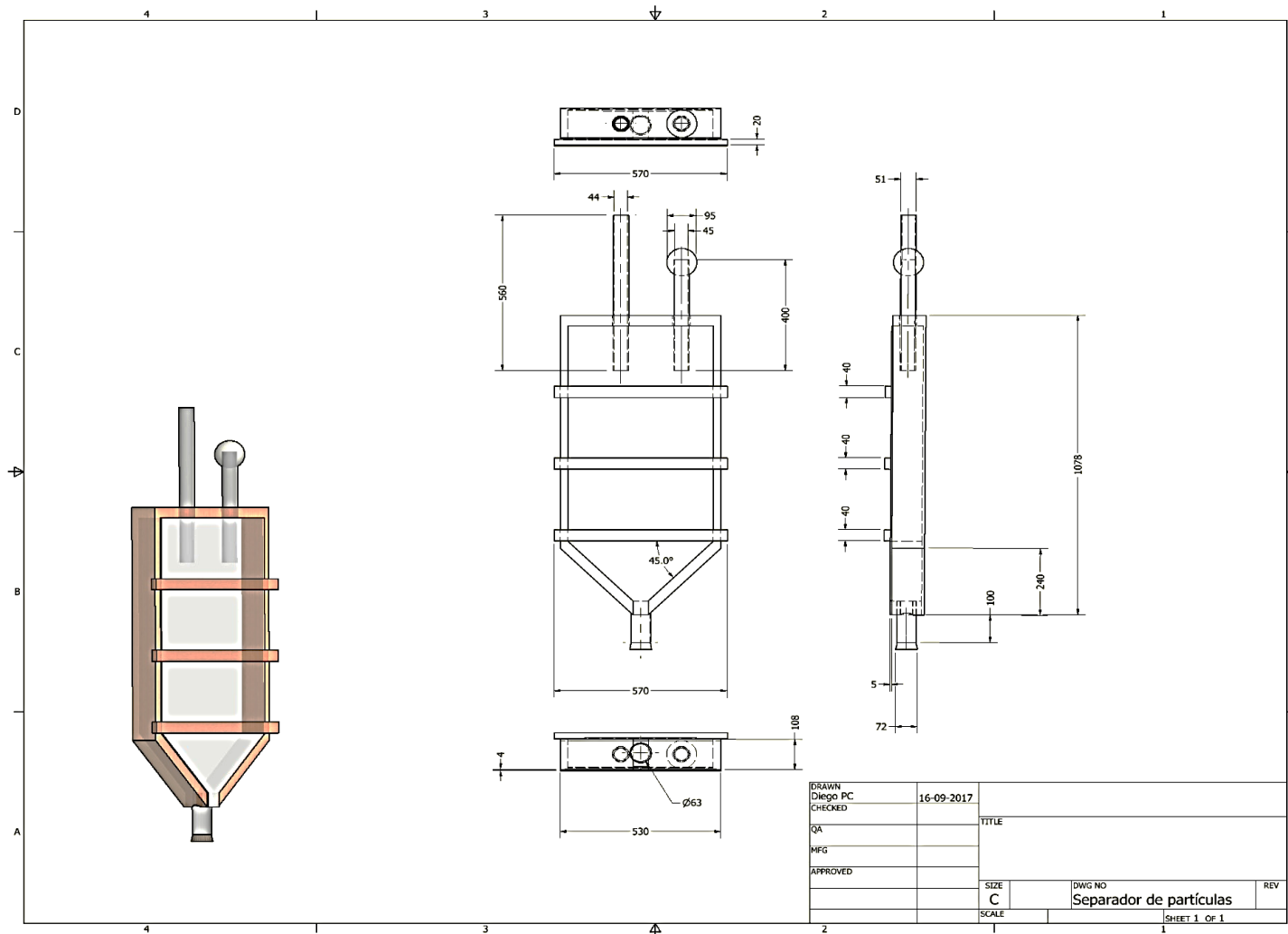
A.6 Tubo de succión:



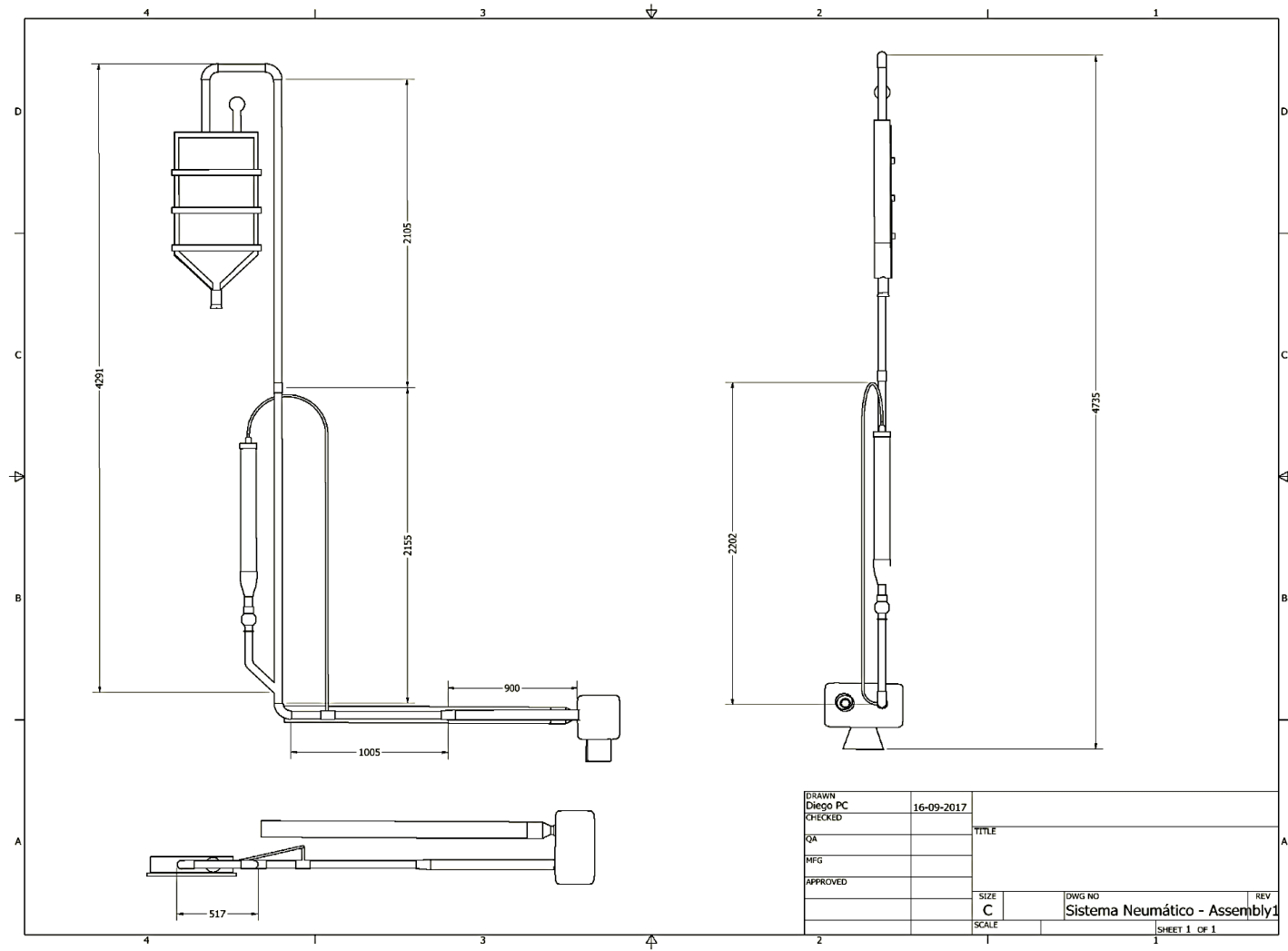
A.7 Reducción de zona de succión:



A.8 Separador de partículas:



A.9 Sistema de transporte neumático vertical diseñado:

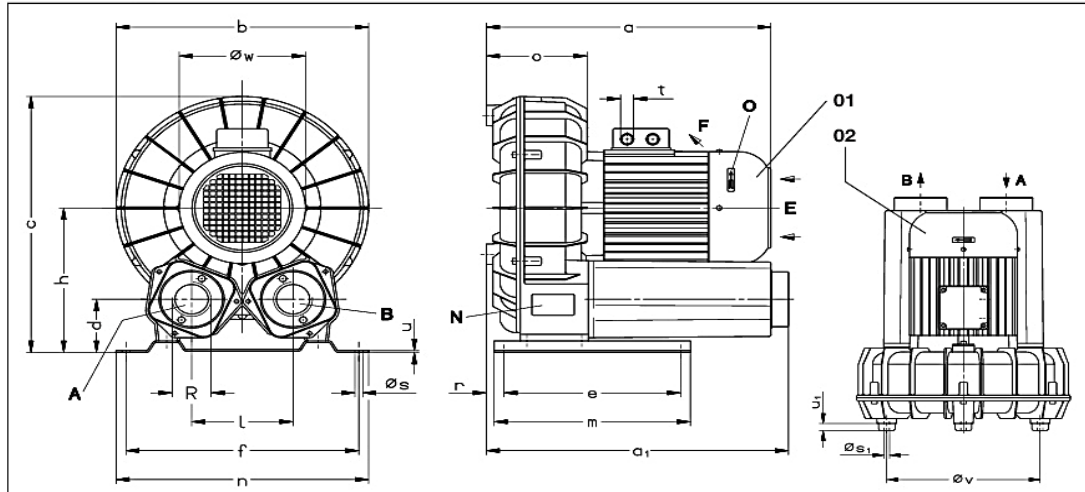


B Equipo motriz

B.1 Motor soplador

El soplador disponible en el CITRAM para la realización de los ensayos corresponde a un Gardner Denver BORA G-SAP 150, cuyas especificaciones técnicas se muestran a continuación.

Daten

Seitenkanal-
VakuumpumpenSide channel
vacuum pumpsTurbine latérale
videPompe per vuoto
a canali laterali

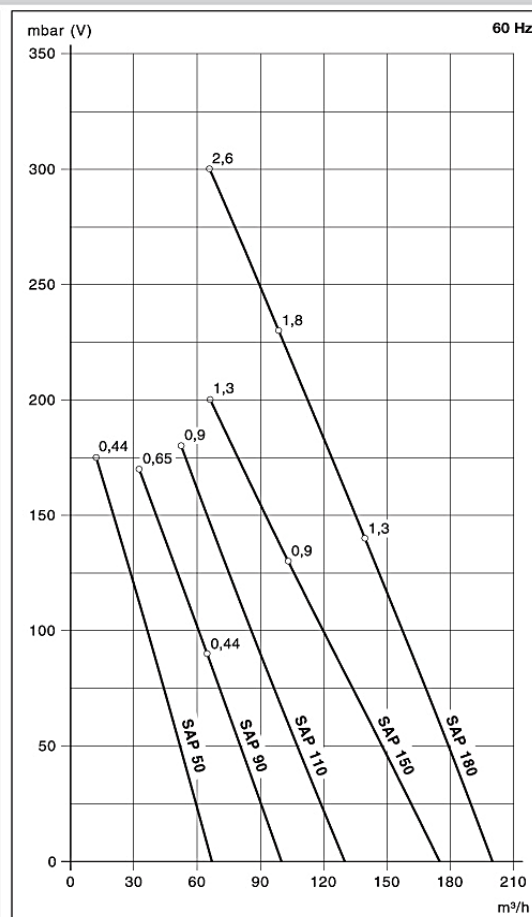
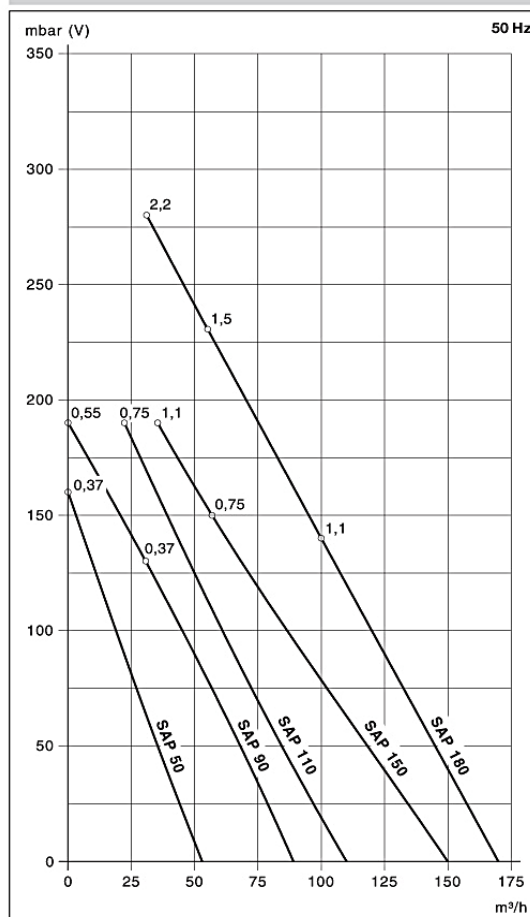
01	Normal-Ausführung	Standard version	Exécution standard	Esecuzione standard
02	Vertikal-Ausführung	Vertical version	Exécution verticale	Esecuzione verticale
A	Vakuum-Anschluss	Vacuum connection	Raccord du vide	Attacco vuoto
B	Abluft-Anschluss	Exhaust air connection	Raccord air d'échappement	Raccordo aria di scarico
E	Kühlluft-Eintritt	Cooling air entry	Entrée air refroidissement	Entrata aria di raffreddamento
F	Kühlluft-Austritt	Cooling air exit	Sortie air refroidissement	Uscita aria di raffreddamento
N	Datenschild	Data plate	Etiquette caractéristique	Targhetta dati
O	Drehrichtungsschild	Direction of rotation	Flèche sens rotation	Targhetta senso rotazione

G-SAP		50	90		110		150		180			
[mm]	a	3~ 1~	304 333	327 342	342 342	- -	333 333	334 369	369 369	367 367	371 406	406 -
	a ₁		300	331		344		345		390		
	b		234	251		282		282		332		
	c		267	296,5		322		322		381		
	d / h		58 / 150	68 / 171		68 / 181		68 / 181		80 / 215		
	e / f		220 / 226	220 / 226		220 / 226		220 / 226		270 / 275		
	m / n		240 / 246	240 / 246		240 / 246		240 / 246		300 / 305		
	l		104	110		110		110		133,5		
	o / r		108 / 26	118,5 / 24,5		127 / 19		133 / 19		126 / 23		
	es / es ₁		11 / M6	11 / M6		11 / M6		11 / M6		11 / M6		
	t		M 20 x 1,5	M 20 x 1,5		M 20 x 1,5		M 20 x 1,5		M 20 x 1,5		
	u / u ₁		2 / 20	2 / 20		2 / 20		2 / 20		3 / 20		
	ov		190	204		230		230		280		
	ow		139	139		157		157		157	177	177
		R	G 1	G 1½		G 1½		G 1½		G 2		
ZRK		25 (05)	32 (05)		40 (05)		40 (05)		50 (05)			
ZUV / ZBS	50 Hz	-	ZBS 40		ZBS 40		ZBS 40		ZBS 65		ZBS 40	ZBS 40
	60 Hz	ZUV 32	ZBS 40		ZBS 40		ZBS 40		ZBS 65		ZBS 40	ZBS 40
ZVF		32 (72)	32 (73)		40 (73)		40 (73)		50 (73)			
ZGD		25 (06)	32 (06)		40 (06)		40 (06)		50 (06)			
ZFP		145 (06)	216 (07)		216 (06)		216 (06)		216 (01)			
ZMS (3~)	50 Hz	25 / 16	25 / 16	40 / 25		-	63 / 40	63 / 40	63 / 40	63 / 40	100 / 63	160 / 100
	60 Hz	25 / 16	25 / 16	40 / 25		-	63 / 40	63 / 40	100 / 40	100 / 40	100 / 63	160 / 100
ZMS (1~)	50 Hz	40	40 63		-	100 63	63	100 40	100	100	100	-
	60 Hz	40	40 63		-	100 100	100	100	100	100	-	-
ZWS		61 (10)	61 (11)		61 (12)		61 (12)		83 (10)			

ZRK	Zubehör	Optional extras	Accessoires	Accessori
ZUV/ZBS	Rückschlagventil	Non-return valve	Clapet anti-retour	Valvola di non ritorno
ZVF	Saug-/Begrenzungsventil	Vacuum limitation valve	Limiteur de dépression	Valvola limitatrice di aspirazione
ZGD	Vakuumdichter Ansaugfilter	Vacuum tight suction filter	Filtre d'aspiration étanche	Filtro aspirazione ermetico
ZFP	Zusätzlicher Schalldämpfer	Additional silencer	Silencieux complémentaire	Silenziatore supplementare
ZMS	Staubabscheider	Dust separator	Filtre séparateur	Separatore polveri
ZMS	Motorschutzschalter	Motor starter	Disjoncteur moteur	Interruttore magnetotermico
ZWS	Wechselschaltung	Change over valve	Inverseur de débit	Valvola di inversione

G-SAP		50		90		110		150		180		
m³/h		50 Hz	53	89		110		150		170		
		60 Hz	67	100		130		175		200		
mbar (V)		50 Hz	160	130	190	-	190	150	190	140	230	280
		60 Hz	175	90	170	-	180	130	200	140	230	300
3~		50 Hz	200-255/346-440V ± 5%									
		60 Hz	200-277/346-480V ± 5%									
1~		50 Hz	230V ± 10%									
		60 Hz	230V ± 10%									
kW		50 Hz	0,37	0,37	0,55	-	0,75	0,75	1,1	1,1	1,5	2,2
		60 Hz	0,44	0,44	0,65	-	0,90	0,90	1,3	1,3	1,8	2,6
A (3~)		50 Hz	2,1/1,20	2,3/1,3	3,0/1,75	-	4,3/2,5	4,3/2,5	5,75/3,3	5,75/3,3	8,7/5,0	12,1/7,0
		60 Hz	2,1/1,20	2,3/1,3	3,46/2,0	-	4,8/2,8	4,8/2,8	6,4/3,7	6,4/3,7	7,7/4,5	11,3/6,5
A (1~)		50 Hz	3,0	3,7	4,6	-	6,5	6,2	9,2	9,2	9,5	-
		60 Hz	3,0	3,5	5,6	-	7,4	7,4	9,9	7,9	-	-
min ⁻¹		50 Hz	2850									
		60 Hz	3450									
dB(A)		50 Hz	61	60	62	-	63	62	63	64	65	66
		60 Hz	63	64	65	-	66	65	66	67	68	69
kg		3~	15,5	15	17	-	20,5	23	24	27	32,5	33
		1~	16	15,5	16	-	24,5	24,5	24,5	27	34	-

m³/h	Volumenstrom	Capacity	Volume engendré	Portata volumetrica
mbar	Druckdifferenz	Pressure difference	Pression différentielle	Differenza di pressione
V	Vakuumbetrieb	Vacuum operation	Fonction dépression	Esercizio in aspirazione
3~/1~	Motorausführung	Motor version	Exécution moteur	Esecuzione motore
kW	Motorleistung	Motor rating	Puissance moteur	Potenza motore
A	Stromaufnahme	Current drawn	Intensité absorbée	Corrente nominale
min ⁻¹	Drehzahl	Speed	Vitesse rotation	Numero giri
dB(A) → DIN 45635	Mittlerer Schalldruckpegel (Ausbläsung über Schlauchleitung)	Average noise level (Discharge connected to a pipeline)	Niveau sonore moyen (Refoulement au travers d'un tuyau)	Rumorosità media (Scarico tramite tubazione flessibile)
kg	Max. Gewicht	Maximum weight	Poids maxi.	Peso massimo



Die Kennlinien (Toleranz ±10%) gelten für den Zustand im Saugstutzen bei 20°C und einem Gegendruck von 1 bar (abs.). / The curves have a tolerance of ±10% and are related to inlet conditions at 20°C and back pressure of 1 bar (abs.). / Les courbes (tolérance ±10%) sont établies pour de l'air aspiré à 20°C et une pression au refoulement de 1 bar (abs.). / Le curve caratteristiche (toleranza ±10%) valgono per una temperatura di 20°C misurata alla bocca di aspirazione con una contropressione di 1 bar (abs.). / Le curve tecniche (toleranza ±10%) valgono per una temperatura di 20°C misurata alla bocca di aspirazione con una contropressione di 1 bar (abs.). / Technische Änderungen vorbehalten! / We reserve the right to alter technical information! / Sous réserve de modification technique! / Salvo modifiche tecniche!

B.2 Variador de Frecuencia

- Marca: Danfoss.
- Modelo: VLT Micro Drive.
- Rango: 10,0 – 53,0 [Hz].
- Resolución: 0,1 [Hz].



Figura 31: Variador de frecuencia conectado al motor soplador.

C Instrumentación

C.1 Instrumentos utilizados

➤ Manómetro 1:

- Marca: Dwyer
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0 – 0,50 [inH₂O]
- Resolución: 0,01 [inH₂O]

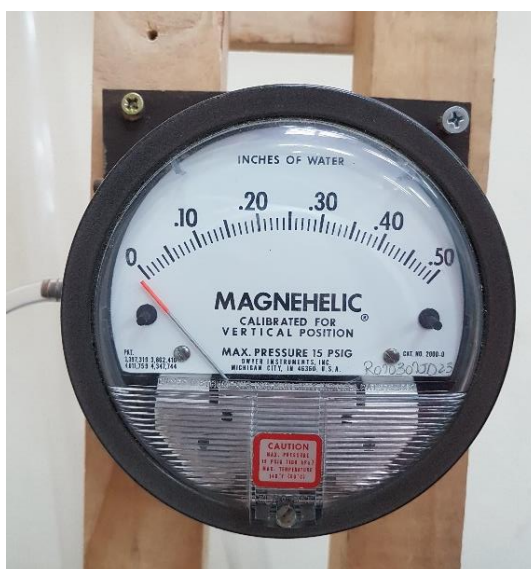


Figura 32: Manómetro 1 para la medición de caída de presión en la placa orificio (ΔP_{placa}).

➤ Manómetro 2:

- Marca: Dwyer
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0 – 5,0 [inH₂O]
- Resolución: 0,1 [inH₂O]

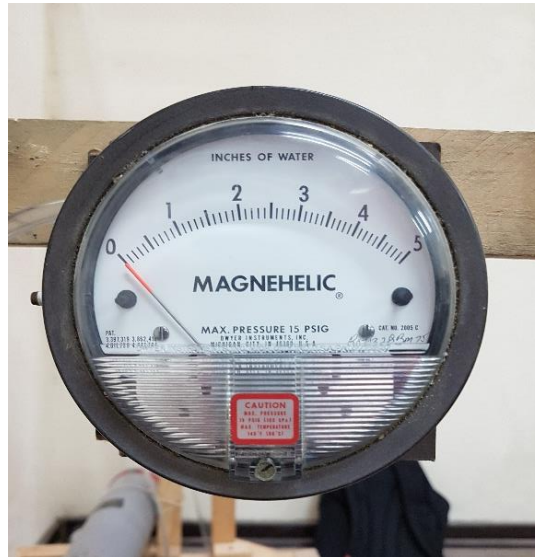


Figura 33: Manómetro 2 para la medición de caída de presión total en el sistema (ΔP_t).

➤ Manómetro 3

- | | | |
|---------------|------------|------------|
| - Marca: | Dwyer | |
| - Modelo: | Magnehelic | |
| - Rango: | 0 – 30 | $[inH_2O]$ |
| - Resolución: | 1 | $[inH_2O]$ |

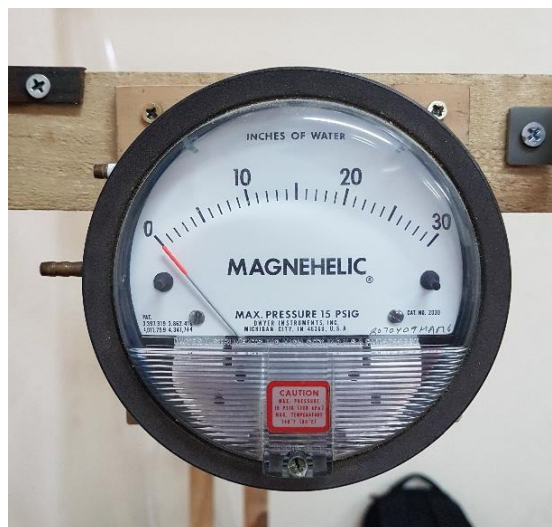


Figura 34: Manómetro 3 para la medición de caída de presión total en el sistema (ΔP_t).

➤ Tubo pitot y micromanómetro.

- Marca:	Air Flow Development	
- Modelo:	EDM 2500 M Micromanometer	
- Rango:	0 - 30	[m/s]
	0 - 2500	[Pa]
- Resolución:	0,5	[m/s]
	2	[Pa]



Figura 35: Tubo pitot y micromanómetro utilizado para la calibración de la placa orificio.

➤ Mallas granulométricas.

- Marca:	W.S. Tyler	
- Resoluciones:	○ Malla #5	2 [mm]
	○ Malla #10	1 [mm]
	○ Malla #18	0,6 [mm]
	○ Malla #30	0,3 [mm]
	○ Malla #50	0,15 [mm]



Figura 36: Juego de mallas granulométricas disponibles en el CITRAM.

➤ Cronómetro.

- Marca: Kenko
- Modelo: KK5898
- Resolución: 0,01 [s]



Figura 37: Cronómetro digital utilizado para medir el tiempo de descenso del material en el silo alimentador.

➤ Balanza digital.

- | | | |
|---------------|-------------------------------|------|
| - Marca: | FWE | |
| - Modelo: | Precisión Electronic Weighing | |
| - Rango: | 0 – 6000 | [mm] |
| - Resolución: | 0,1 | [g] |



Figura 38: Balanza digital para pesar los materiales sólidos a ensayar.

C.2 Calibración de instrumentos

La calibración de instrumentos fue debidamente verificada en el laboratorio de Termodinámica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Se calibraron los tres manómetros ocupados en la experimentación, cuyo proceso consistió en contrastar los valores indicados en cada manómetro diferencial con lo indicado en un manómetro de columna de agua, ambos sometidos a la misma presión de aire. Con esto se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 10: Datos de la verificación de calibración del Manómetro 1.

Manómetro 1 [in H₂O]	Columna de agua [in H₂O]	Desviación [in H₂O]
0,00	0,00	0,00
0,10	0,09	+0,01
0,20	0,19	+0,01
0,30	0,30	0,00
0,40	0,39	+0,01
0,50	0,50	0,00

Tabla 11: Datos de la verificación de calibración del Manómetro 2.

Manómetro 2 [in H₂O]	Columna de agua [in H₂O]	Desviación [in H₂O]
0,0	0,0	0,00
1,0	0,94	+0,06
2,0	1,95	+0,05
3,0	2,91	+0,09
4,0	3,86	+0,14
5,0	4,86	+0,14

Tabla 12: Datos de la verificación de calibración del Manómetro 3.

Manómetro 3 [in H₂O]	Columna de agua [in H₂O]	Desviación [in H₂O]
0	0,00	0,00
3	2,76	+0,24
6	5,65	+0,45
9	8,53	+0,47
12	11,60	+0,40
15	14,49	+0,51
18	17,50	+0,50
21	20,48	+0,52
24	23,62	+0,38
27	26,63	+0,37
30	29,76	+0,24

La desviación en cada una de las mediciones de los manómetros 2 y 3 resulta positiva y menor que la resolución del instrumento, por lo que se verifica que los manómetros se encuentran calibrados y en condiciones de uso.

En el caso del Manómetro 1, la desviación resulta ser cero en algunas mediciones y positiva en otras, cuyo valor máximo es igual a la resolución del instrumento. Es por esto que se verifica que el Manómetro 1 se encuentra en condiciones de uso, asumiendo la desviación como despreciable.

Además, se verificó la calibración de la balanza electrónica con cuatro masas patrones, tal como se indica a continuación:

<i>Masa patrón</i> [g]	<i>Balanza electrónica</i> [g]	<i>Desviación</i> [Kg]
0	0	0,0
100	99,9	+0,1
500	499,9	+0,1
1000	999,9	+0,1
5000	4999,4	+0,6

Dado que las cantidades de masa con las que se experimenta en el sistema de transporte neumático superan los 500 [g], no se consideran las desviaciones presentes en la balanza con respecto a las unidades patrones, ya que no influyen en mayor medida.

D. Características físicas de los materiales a granel utilizados

D.1 Medición de densidad

La medición de densidad de cada uno de los materiales se realizó mediante el siguiente método aplicado en el laboratorio de Termodinámica, dependiente del Departamento de Ingeniería de la UTFSM.

“Conocer la masa de una probeta (M_t) para medir la masa (m_i) de una determinada cantidad volumétrica de material alojada en ella (Vol_m). Luego, se procede a añadir parafina al interior de la probeta, con el fin de llenar cada uno de los intersticios vacíos que permite la forma de las partículas del material, y por consiguiente tomar la medición de masa final (m_f) de la mezcla de sólidos más parafina. Con esto, es posible determinar mediante relaciones matemáticas la densidad absoluta o real (ρ_s), como la densidad aparente (ρ_a) de cada material”.

Dato: *Densidad de parafina* [g/cm^3] = ρ_{pa}

Mediciones:

- *Tara de probeta* [g] = M_t
- *Masa inicial* [g] = m_i
- *Volumen definido* [cm^3] = Vol_m
- *Masa final* [g] = m_f

Cálculos:

$$\text{➤ Volumen parafina } [cm^3] = Vol_{pa} = \frac{m_f - m_i}{\rho_{pa}} \quad (12)$$

$$\text{➤ Densidad aparente } [kg/m^3] = \rho_a = \frac{m_i - M_t}{Vol_m} \times 1000 \quad (13)$$

$$\text{➤ Densidad absoluta } [kg/m^3] = \rho_s = \frac{m_i - M_t}{Vol_m - Vol_{pa}} \times 1000 \quad (14)$$

D.2 Contenido de humedad

La medición de contenido de humedad de cada uno de los materiales se realizó mediante el siguiente método aplicado en el laboratorio de Termodinámica, dependiente del Departamento de Ingeniería de la UTFSM.

“En tres probetas de masa conocida, se añade una determinada cantidad de material, registrando la masa inicial de cada muestra. Luego, se ingresa cada probeta con sólidos a un horno, durante un lapso de entre 3 – 6 horas a 105 °C, con la excepción de materiales alimenticios, que se someten sólo a 60°C. De forma siguiente, se registra la masa final de cada una de las probetas y muestras finales”.

Mediciones:

- *muestra inicial 1* $[g] = m_{i1}$
- *muestra inicial 2* $[g] = m_{i2}$
- *muestra inicial 3* $[g] = m_{i3}$
- *muestra final 1* $[g] = m_{f1}$
- *muestra final 2* $[g] = m_{f2}$
- *muestra final 3* $[g] = m_{f3}$

Cálculos:

$$Cont. de humedad_{Base seca} [\%] = prom\left(\frac{m_{i1}-m_{f1}}{m_{f1}}; \frac{m_{i2}-m_{f2}}{m_{f2}}; \frac{m_{i3}-m_{f3}}{m_{f3}}\right) * 100 \quad (75)$$

$$Cont. de humedad_{Base húmeda} [\%] = Prom\left(\frac{m_{i1}-m_{f1}}{m_{i1}}; \frac{m_{i2}-m_{f2}}{m_{i2}}; \frac{m_{i3}-m_{f3}}{m_{i3}}\right) * 100 \quad (16)$$

D.3 Granulometría de materiales

Para obtener la distribución granulométrica de los materiales, se deben tamizar directamente en las mallas granulométricas W.S Tyler, para así obtener una gráfica de distribución, y con ello estimar un tamaño de partícula medio (d_p), como se muestra a continuación.

Ejemplo de Arena:

Masa inicial [g] = 350,9

Masa final [g] = 349,6

Tabla 13: Material pasante y retenido en mallas granulométricas (arena).

<i>Tamaño Malla</i>	<i>Abertura Malla [mm]</i>	<i>Masa Retenida [gr]</i>	<i>Material Retenido [%]</i>	<i>Material Acumulado Retenido [%]</i>	<i>Material Acumulado Pasante [%]</i>
#5	4	0	0%	0%	100%
#10	2	100	28%	28%	72%
#18	1	162	46%	75%	25%
#30	0,6	44,8	13%	87%	13%
#50	0,3	25,7	7%	95%	5%
#100	0,15	8,5	2%	97%	3%
#200	0,074	8,6	2%	100%	0%

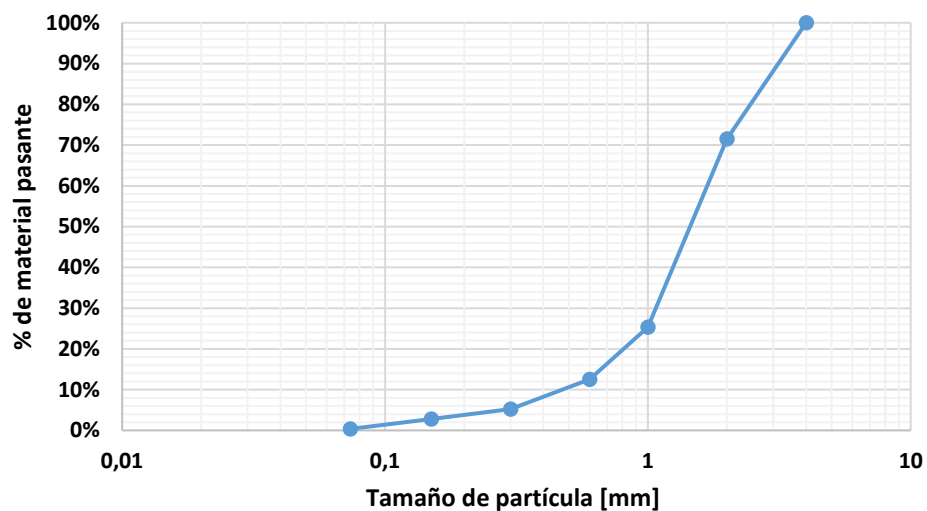


Figura 39: Distribución granulométrica de la arena.

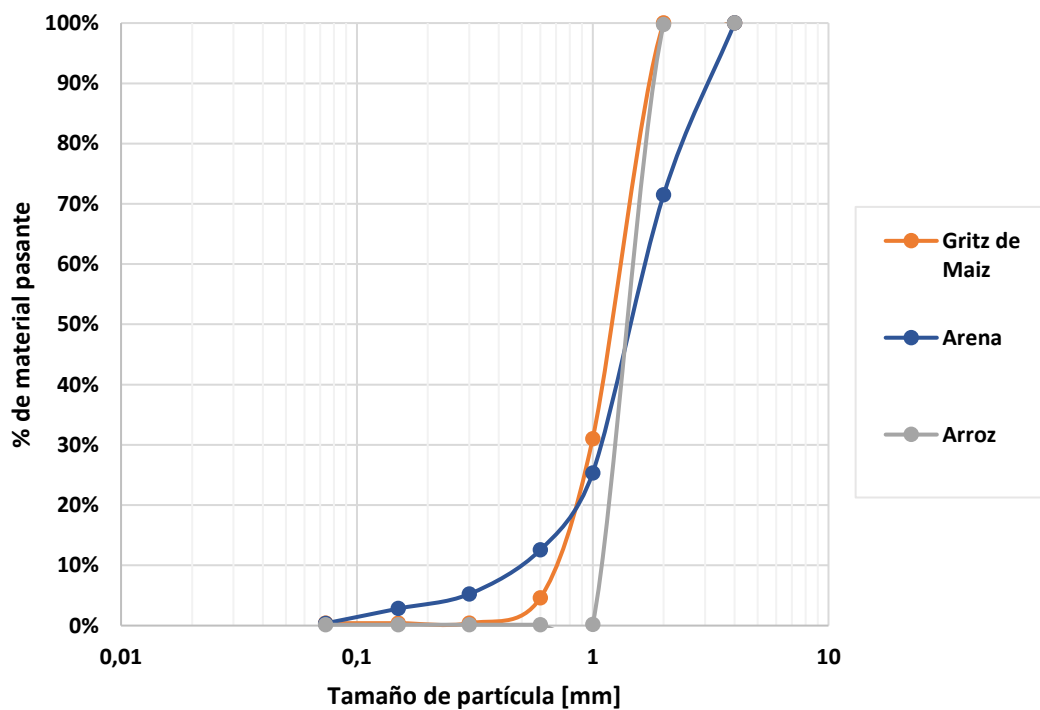


Figura 40: Distribución granulométrica del gritz de maíz, arroz y arena.

Con esto, se tiene las siguientes características para los materiales ensayados:

Tabla 14: Características de los materiales seleccionados para ensayar en sistema de transporte neumático.

<i>Material</i>	<i>Densidad de partícula</i> (ρ_s) [kg/m ³]	<i>Densidad aparente</i> (ρ_a) [kg/m ³]	<i>Tamaño de partícula</i> (d_p) [mm]	<i>Contenido de humedad</i> [%]		<i>Forma de partícula</i>
				<i>base seca</i>	<i>base húmeda</i>	
<i>Pellet de plástico</i>	940	550	2,90	0,07%	0,07%	<i>Romboidea u ovalada</i>
<i>Gritz de maíz</i>	1370	755	1,26	13,07%	11,56%	<i>semicubica granular</i>
<i>Arroz</i>	1430	793	1,50	13,19%	11,65%	<i>granular alargado</i>
<i>Azúcar</i>	1600	893	0,62	0,05%	0,05%	<i>granular molido</i>
<i>Arena</i>	2480	1495	1,70	0,78%	0,78%	<i>esférica porosa y granular</i>

Tabla 15: Características de los materiales adicionales para los ensayos de la velocidad de purga.

<i>Material</i>	<i>Densidad de partícula</i> (ρ_s) [kg/m ³]	<i>Densidad aparente</i> (ρ_a) [kg/m ³]	<i>Tamaño de partícula</i> (d_p) [mm]	<i>Contenido de humedad</i> [%]		<i>Forma de partícula</i>
				<i>base seca</i>	<i>base húmeda</i>	
<i>Mineral chancado Cu 1/4" x #5</i>	2420	1190	3,00	0,54%	0,54%	<i>Granular irregular</i>
<i>Mineral chancado Cu #5 x #10</i>	2420	1290	5,18	0,53%	0,53%	<i>Granular irregular</i>
<i>Mineral chancado Cu #10 x #18</i>	2420	1270	5,18	0,49%	0,49%	<i>Granular irregular</i>
<i>Mineral chancado Cu #18 x #30</i>	2420	1240	3,00	0,50%	0,50%	<i>Granular irregular</i>
<i>Piedra molida #5 x #10</i>	2630	1440	1,50	0,45%	0,44%	<i>Granular irregular</i>
<i>Piedra molida 1/4" x #5</i>	2630	1460	0,80	0,17%	0,17%	<i>Granular irregular</i>

E. Calibración de placa orificio

La calibración de la placa orificio implementada en los ensayos de laboratorio, consistió en registrar los valores de velocidad del anemómetro (cuyo tubo pitot se conecta de manera adecuada al tubo de succión) a medida que se aumenta el caudal de aire del soplador, según un incremento de 0,5 [in H_2O] en el manómetro 1 conectado a la succión.

Tabla 16: Valores medidos para la calibración de la placa orificio.

ΔP [in H_2O]	ΔP_{placa} [Pa]	U_g [m/s]
0,00	0,00	0,00
0,05	12,45	1,60
0,10	24,91	2,00
0,15	37,36	2,40
0,20	49,82	2,60
0,25	62,27	3,05
0,30	74,73	3,30
0,35	87,18	3,50
0,40	99,64	3,85
0,45	112,09	4,10
0,50	124,54	4,30

Con estos datos, es posible obtener la gráfica de ΔP_{placa} v/s U_g , donde el valor cuadrático de la ecuación de tendencia parabólica corresponde al coeficiente que se indica a continuación:

Según la ecuación de Bernoulli:

$$U_g = K_{placa} \sqrt{\frac{2 * \Delta P_{placa}}{\rho_g}} \quad (17)$$

$$\Delta P_{placa} = \left(\frac{\rho_g}{2 * K_{placa}} \right) * U_g^2 \quad (18)$$

Luego, según la ecuación de tendencia parabólica de la gráfica, se tiene la siguiente equivalencia:

$$\Delta P_{placa} = 6,7826 * U_g^2 = \left(\frac{\rho_g}{2 * K_{placa}} \right) * U_g^2 \quad (19)$$

donde:

$$6,7826 = \left(\frac{\rho_g}{2 * K_{placa}} \right) \quad (20)$$

Por lo tanto, despejando se obtiene el valor de la constante de calibración de la placa orificio:

$$K_{placa} = 0,2979 \cong 0,30 [-]$$

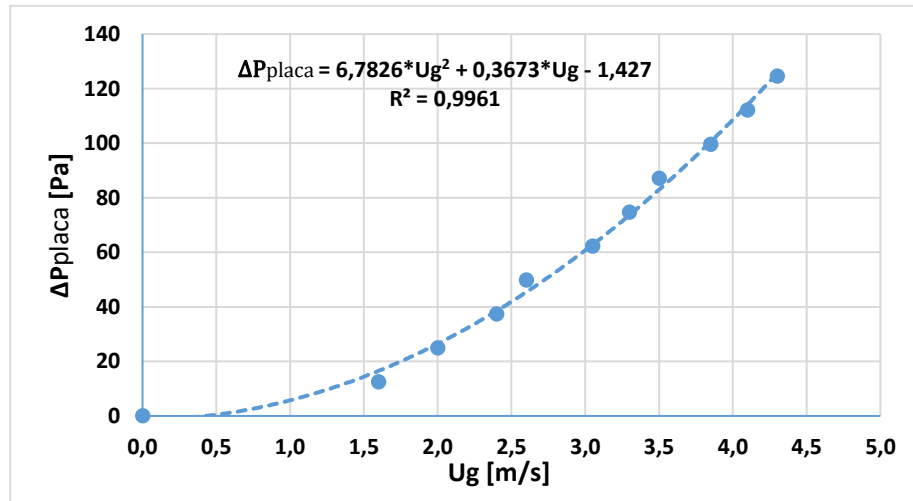


Figura 41: Caída de presión en la placa orificio (ΔP_{placa}) en función de la velocidad del gas (U_g), para la obtención de la constante de calibración de la placa (K_{placa}).

F. Curva característica del sistema (aire solo)

A continuación, se muestran los valores medidos y calculados para la obtención de la curva de aire solo ($W_s = 0$), la cual es indispensable para los diagramas de estado.

Asumiendo condiciones ambientales: (Temperatura = 20 [°C]; Presión = 760 [mmHg])

Datos:

- $\rho_g = 1,204 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- $K_{placa} = 0,2979 \text{ [-]}$
- $D_{acrílico} = 44,8 \text{ [mm]}$
- $D_{pvc} = 106,2 \text{ [mm]}$

Tabla 17: Mediciones y valores calculados para la obtención de la curva característica del sistema.

ΔP_t [inH ₂ O]	ΔP_t [Pa]	ΔP_{placa} [inH ₂ O]	ΔP_{placa} [Pa]	U_g [m/s]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,70	174,36	0,01	2,49	3,41
1,10	274,00	0,02	4,98	4,82
1,40	348,72	0,03	7,47	5,90
1,80	448,36	0,04	9,96	6,82
2,20	548,00	0,05	12,45	7,62
2,80	697,45	0,06	14,95	8,35
3,10	772,18	0,07	17,44	9,02
3,50	871,81	0,08	19,93	9,64
4,00	996,36	0,09	22,42	10,22
4,40	1095,99	0,10	24,91	10,78
4,80	1195,63	0,11	27,40	11,30
5,00	1245,44	0,12	29,89	11,81
6,00	1494,53	0,14	34,87	12,75
7,00	1743,62	0,16	39,85	13,63
8,00	1992,71	0,19	47,33	14,86
9,00	2241,80	0,21	52,31	15,62
10,00	2490,89	0,24	59,78	16,70

G. Tablas de valores medidos

G.1 Mediciones para diagramas de estado

#Pellet de plástico ($W_{s1} = 0,79 \text{ [kg/min]}$)

"Pellet de plástico"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]		Constante de placa orificio[K_{placa}]		dp [mm]	$D_{acrílico}$ [mm]	D_{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				940		1,20		0,30		2,43	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo					
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]											
16,00		1,00		0,79											
Nº	ΔP_{placa} [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔP_{placa} [Pa]	U_g [m/s]	W_g [Kg/min]	W_s [Kg/min]	μ [–]						
1	0,35	76,06	9,00	2241,80	87,18	20,16	2,30	0,79	0,34	Flujo homogéneo					
2	0,30	75,63	8,00	1992,71	74,73	18,67	2,13	0,79	0,37	Flujo homogéneo					
3	0,25	76,01	7,00	1743,62	62,27	17,04	1,94	0,79	0,40	Flujo homogéneo					
4	0,20	76,19	6,00	1494,53	49,82	15,24	1,74	0,79	0,45	Flujo homogéneo					
5	0,16	76,34	5,00	1245,44	39,85	13,63	1,55	0,79	0,51	Flujo homogéneo					
6	0,14	79,31	4,60	1145,81	34,87	12,75	1,45	0,76	0,54	Flujo homogéneo					
7	0,12	76,43	4,10	1021,26	29,89	11,81	1,34	0,79	0,58	Flujo homogéneo					
8	0,10	76,44	3,80	946,54	24,91	10,78	1,23	0,78	0,64	Flujo homogéneo					
9	0,09	77,09	3,60	896,72	22,42	10,22	1,16	0,78	0,67	Flujo homogéneo					
10	0,08	75,04	3,40	846,90	19,93	9,64	1,10	0,80	0,72	Ondulaciones y pulsos alejados, hay transporte					
11	0,07	76,10	3,50	871,81	17,44	9,02	1,03	0,79	0,76	Flujo ondulado y pulsos aleatorios, hay transporte					
12	0,06	0,00	6,00	1494,53	14,95	8,35	0,95	0,00	0,83	Flujo ondulado y muy pulsante (errático al final)					
13	0,05	0,00	10,00	2490,89	12,45	7,62	0,87	0,00	0,90	Ondulación inicial, bloques y taponeo al minuto					

#Pellet de plástico ($W_{s2} = 1,69 \text{ [kg/min]}$)

"Pellet de plástico"				ρ_s [kg/m3]	ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio[K _{placa}]		dp [mm]]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				940	1,20	0,30		2,43	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo			
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]									
20,00		1,00		1,69									
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [-]				
1	0,35	34,84	10,00	2490,89	87,18	20,16	2,30	1,72	0,74	Flujo homogéneo			
2	0,30	36,12	8,50	2117,26	74,73	18,67	2,13	1,66	0,80	Flujo homogéneo			
3	0,25	35,44	7,50	1868,17	62,27	17,04	1,94	1,69	0,87	Flujo homogéneo			
4	0,20	36,50	6,20	1544,35	49,82	15,24	1,74	1,64	0,98	Flujo homogéneo			
5	0,16	34,53	5,30	1320,17	39,85	13,63	1,55	1,74	1,09	Flujo homogéneo			
6	0,14	35,19	4,90	1220,54	34,87	12,75	1,45	1,71	1,17	Flujo homogéneo			
7	0,10	35,56	4,40	1095,99	24,91	10,78	1,23	1,69	1,38	Flujo homogéneo			
8	0,09	35,75	4,20	1046,17	22,42	10,22	1,16	1,68	1,45	Levemente ondulado			
9	0,08	35,40	4,50	1120,90	19,93	9,64	1,10	1,69	1,54	Ondulado y pulsos aleatorios, hay transporte			
10	0,07	35,31	7,00	1743,62	17,44	9,02	1,03	1,70	1,65	Flujo ondulado y pulsante, errático al minuto			
11	0,06	0,00	12,00	2989,07	14,95	8,35	0,95	0,00	1,78	Ondulado y pulsante al incio, errático en pocos instantes			

#Pellet de plástico ($W_{S3} = 3,42 \text{ [kg/min]}$)

"Pellet de plástico"				ρ_s [kg/m3]	ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio[K _{placa}]		dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				940	1,20	0,30		2,43	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo			
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]									
23,00		1,00		3,42									
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [–]				
1	0,35	16,97	12,00	2989,07	87,18	20,16	2,30	3,54	1,49	Flujo homogéneo			
2	0,30	17,16	11,00	2739,98	74,73	18,67	2,13	3,50	1,61	Flujo homogéneo			
3	0,26	16,94	10,00	2490,89	64,76	17,38	1,98	3,54	1,73	Flujo homogéneo			
4	0,22	17,44	9,00	2241,80	54,80	15,98	1,82	3,44	1,88	Flujo homogéneo			
5	0,20	18,03	8,50	2117,26	49,82	15,24	1,74	3,33	1,97	Flujo homogéneo			
6	0,18	17,56	8,00	1992,71	44,84	14,46	1,65	3,42	2,08	Flujo homogéneo			
7	0,14	17,97	7,00	1743,62	34,87	12,75	1,45	3,34	2,35	Flujo homogéneo			
8	0,12	17,66	6,30	1569,26	29,89	11,81	1,34	3,40	2,54	Flujo homogéneo			
9	0,11	18,07	6,00	1494,53	27,40	11,30	1,29	3,32	2,65	Pequeños pulsos alejados			
10	0,10	17,88	7,00	1743,62	24,91	10,78	1,23	3,36	2,78	Pulsaciones; ondulación en alimentación (hay transporte)			
11	0,08	0,00	8,00	1992,71	19,93	9,64	1,10	0,00	3,11	Ondulación y pulsante al inicio, errático al minuto			

#Gritz de maíz ($W_{s1} = 2,01$ [kg/min])

"Gritz de maíz"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m ³]		Constante de placa orificio [K_{placa}]		dp [mm]	$D_{acrílico}$ [mm]	D_{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1370		1,20		0,30		1,30	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo					
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]											
16,00		1,00		2,01											
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [-]						
1	0,30	29,00	10,50	2615,43	74,73	18,67	2,13	2,07	0,95	Flujo homogéneo					
2	0,25	30,90	9,50	2366,34	62,27	17,04	1,94	1,94	1,04	Flujo homogéneo					
3	0,22	29,41	8,80	2191,98	54,80	15,98	1,82	2,04	1,10	Flujo homogéneo					
4	0,20	30,31	8,00	1992,71	49,82	15,24	1,74	1,98	1,16	Flujo homogéneo					
5	0,15	29,56	7,00	1743,62	37,36	13,20	1,50	2,03	1,34	Flujo homogéneo					
6	0,12	29,88	6,00	1494,53	29,89	11,81	1,34	2,01	1,50	Flujo homogéneo					
7	0,10	29,72	5,50	1369,99	24,91	10,78	1,23	2,02	1,64	Flujo homogéneo					
8	0,08	29,84	4,90	1220,54	19,93	9,64	1,10	2,01	1,83	Flujo homogéneo					
9	0,07	29,90	4,60	1145,81	17,44	9,02	1,03	2,01	1,96	Flujo homogéneo					
10	0,06	30,31	4,40	1095,99	14,95	8,35	0,95	1,98	2,11	Pulsos leves, hay transporte					
11	0,05	29,55	4,90	1220,54	12,45	7,62	0,87	2,03	2,32	Pulsos notorios y recurrentes (hay transporte)					
12	0,04	0,00	5,50	1369,99	9,96	6,82	0,78	0,00	2,59	Flujo pulsante y ondulado; errático al final					
13	0,03	0,00	7,00	1743,62	7,47	5,90	0,67	0,00	2,99	Ondulación en alimentación; flujo pulsante y errático al minuto					
14	0,02	0,00	12,00	2989,07	4,98	4,82	0,55	0,00	3,66	Taponeo inmediato, no hay flujo					

#Gritz de maíz ($W_{s2} = 3,43 \text{ [kg/min]}$)

"Gritz de maíz"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio [K _{placa}]		dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1370		1,20	0,30		1,30	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo				
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]										
20,00		1,00		3,43										
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [-]					
1	0,30	17,38	13,00	3238,16	74,73	18,67	2,13	3,45	1,62	Flujo homogéneo				
2	0,28	17,60	12,50	3113,61	69,74	18,03	2,05	3,41	1,67	Flujo homogéneo				
3	0,25	17,31	11,50	2864,52	62,27	17,04	1,94	3,47	1,77	Flujo homogéneo				
4	0,20	17,28	10,20	2540,71	49,82	15,24	1,74	3,47	1,98	Flujo homogéneo				
5	0,18	17,34	9,80	2441,07	44,84	14,46	1,65	3,46	2,09	Flujo homogéneo				
6	0,15	17,28	8,80	2191,98	37,36	13,20	1,50	3,47	2,28	Flujo homogéneo				
7	0,12	17,44	7,80	1942,89	29,89	11,81	1,34	3,44	2,55	Flujo homogéneo				
8	0,10	17,34	7,00	1743,62	24,91	10,78	1,23	3,46	2,80	Flujo homogéneo				
9	0,08	17,88	6,50	1619,08	19,93	9,64	1,10	3,36	3,13	Muy leves pulsos; ondulación en alimentación (hay transporte)				
10	0,07	17,41	6,20	1544,35	17,44	9,02	1,03	3,45	3,34	Pulsos notorios y ondulaciones,hay transporte				
11	0,06	18,01	7,30	1818,35	14,95	8,35	0,95	3,33	3,61	Flujo muy ondulado y pulsante,hay transporte				
12	0,05	0,00	10,00	2490,89	12,45	7,62	0,87	0,00	3,96	Ondulaciones y bloques,colapso a pocos segundos				
13	0,04	0,00	12,00	2989,07	9,96	6,82	0,78	0,00	4,42	Taponeo al instante,no hav flujo				

#Gritz de maíz ($W_{s3} = 4,88 \text{ [kg/min]}$)

"Gritz de maíz"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m ³]	Constante de placa orificio [K _{placa}]		dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1370		1,20	0,30		1,30	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo				
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]										
23,00		1,00		4,88										
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [–]					
1	0,30	12,15	15,50	3860,88	74,73	18,67	2,13	4,94	2,30	Flujo homogéneo				
2	0,25	12,16	13,50	3362,70	62,27	17,04	1,94	4,93	2,52	Flujo homogéneo				
3	0,20	12,00	12,00	2989,07	49,82	15,24	1,74	5,00	2,81	Flujo homogéneo				
4	0,18	12,15	11,00	2739,98	44,84	14,46	1,65	4,94	2,97	Flujo homogéneo				
5	0,15	12,34	10,00	2490,89	37,36	13,20	1,50	4,86	3,25	Flujo homogéneo				
6	0,12	12,44	9,50	2366,34	29,89	11,81	1,34	4,82	3,63	Flujo homogéneo				
7	0,10	12,42	9,00	2241,80	24,91	10,78	1,23	4,83	3,98	Leves pulsaciones; ondulación en alimentación (hay transporte)				
8	0,08	12,66	9,50	2366,34	19,93	9,64	1,10	4,74	4,45	Flujo pulsante y ondulaciones notorias (hay transporte)				
9	0,07	0,00	10,00	2490,89	17,44	9,02	1,03	0,00	4,76	Flujo completamente ondulado, taponeo final				
10	0,06	0,00	14,00	3487,24	14,95	8,35	0,95	0,00	5,14	Ondulación inicial, colapso al instante, no hay flujo				

#Arroz ($W_{s1} = 1,03 \text{ [kg/min]}$)

"Arroz"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio[K_{placa}]		dp [mm]	$D_{acrílico}$ [mm]	D_{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1430		1,20	0,30		1,50	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo				
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]										
16,00		1,00		1,03										
Nº	ΔP_{placa} [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔP_{placa} [Pa]	U_g [m/s]	W_g [Kg/min]	W_s [Kg/min]	μ [-]					
1	0,35	57,44	11,00	2739,98	87,18	20,16	2,30	1,04	0,45	Flujo homogéneo				
2	0,30	58,49	10,00	2490,89	74,73	18,67	2,13	1,03	0,48	Flujo homogéneo				
3	0,25	60,72	8,50	2117,26	62,27	17,04	1,94	0,99	0,53	Flujo homogéneo				
4	0,22	58,69	7,50	1868,17	54,80	15,98	1,82	1,02	0,56	Flujo homogéneo				
5	0,20	60,00	7,00	1743,62	49,82	15,24	1,74	1,00	0,59	Flujo homogéneo				
6	0,18	57,50	6,50	1619,08	44,84	14,46	1,65	1,04	0,62	Flujo homogéneo				
7	0,15	58,34	6,00	1494,53	37,36	13,20	1,50	1,03	0,68	Flujo homogéneo				
8	0,11	59,14	5,00	1245,44	27,40	11,30	1,29	1,01	0,80	Flujo homogéneo				
9	0,09	58,05	4,50	1120,90	22,42	10,22	1,16	1,03	0,88	Pulsos muy leves y alejados; ondulado en alimentación				
10	0,08	57,00	5,00	1245,44	19,93	9,64	1,10	1,05	0,93	Flujo levemente ondulado, hay transporte				
11	0,07	0,00	8,00	1992,71	17,44	9,02	1,03	0,00	1,00	Ondulación y bloques, colapso al minuto				

#Arroz ($W_{s2} = 2,42 \text{ [kg/min]}$)

"Arroz"				ρ_s [kg/m3]	ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio[K_{placa}]		dp [mm]	$D_{acrílico}$ [mm]	D_{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1430	1,20	0,30		1,50	45	106	4,26	1 [inH ₂ O]	249 [Pa]
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo			
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]									
20,00		1,00		2,42									
Nº	ΔP_{placa} [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔP_{placa} [Pa]	U_g [m/s]	W_g [Kg/min]	W_s [Kg/min]	μ [–]				
1	0,35	25,62	13,00	3238,16	87,18	20,16	2,30	2,34	1,05	Flujo homogéneo			
2	0,30	26,70	11,00	2739,98	74,73	18,67	2,13	2,25	1,14	Flujo homogéneo			
3	0,25	24,94	10,00	2490,89	62,27	17,04	1,94	2,41	1,25	Flujo homogéneo			
4	0,20	25,30	9,00	2241,80	49,82	15,24	1,74	2,37	1,39	Flujo homogéneo			
5	0,18	23,59	8,00	1992,71	44,84	14,46	1,65	2,54	1,47	Flujo homogéneo			
6	0,15	25,15	7,50	1868,17	37,36	13,20	1,50	2,39	1,61	Flujo homogéneo			
7	0,12	23,31	7,00	1743,62	29,89	11,81	1,34	2,57	1,80	Aparición de pulsos leves			
8	0,11	24,01	6,80	1693,80	27,40	11,30	1,29	2,50	1,88	Pulsaciones alejadas			
9	0,10	24,05	8,00	1992,71	24,91	10,78	1,23	2,49	1,97	Flujo pulsante y ondulado (hay transporte)			
10	0,09	0,00	9,00	2241,80	22,42	10,22	1,16	0,00	2,08	Flujo pulsante y ondulado al inicio; errático al final			
11	0,08	0,00	12,00	2989,07	19,93	9,64	1,10	0,00	2,21	Flujo errático al instante, colapso			

#Arroz ($W_{s3} = 4,29 \text{ [kg/min]}$)

"Arroz"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio [K _{placa}]		dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1430		1,20	0,30		1,50	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo				
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]										
23,00		1,00		4,29										
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [–]					
1	0,35	14,41	15,00	3736,33	87,18	20,16	2,30	4,16	1,87	Flujo homogéneo				
2	0,30	14,09	13,00	3238,16	74,73	18,67	2,13	4,26	2,02	Flujo homogéneo				
3	0,25	14,10	12,00	2989,07	62,27	17,04	1,94	4,26	2,21	Flujo homogéneo				
4	0,20	14,03	11,00	2739,98	49,82	15,24	1,74	4,28	2,47	Flujo homogéneo				
5	0,18	13,69	10,00	2490,89	44,84	14,46	1,65	4,38	2,61	Flujo homogéneo				
6	0,15	13,97	9,80	2441,07	37,36	13,20	1,50	4,29	2,85	Pulsos aleatorios				
7	0,12	13,66	10,00	2490,89	29,89	11,81	1,34	4,39	3,19	Pulsos notorios y recurrentes, hay transporte				
8	0,11	13,92	11,00	2739,98	27,40	11,30	1,29	0,00	3,33	Flujo pulsante y ondulado, colapso al minuto				
9	0,10	0,00	15,00	3736,33	24,91	10,78	1,23	0,00	3,50	Ondulación inicial, bloques y colapso al minuto				

#Azúcar ($W_{s1} = 2,54 \text{ [kg/min]}$)

"Azúcar"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio[K _{placa}]		dp [mm]	$D_{acrílico}$ [mm]	D_{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1520		1,20	0,30		1,00	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo				
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]										
16,00		1,00		2,54										
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [-]					
1	0,35	23,75	11,00	2739,98	87,18	20,16	2,30	2,53	1,11	Flujo homogéneo				
2	0,30	23,82	10,00	2490,89	74,73	18,67	2,13	2,52	1,19	Flujo homogéneo				
3	0,25	23,87	9,00	2241,80	62,27	17,04	1,94	2,51	1,31	Flujo homogéneo				
4	0,20	23,16	8,00	1992,71	49,82	15,24	1,74	2,59	1,46	Flujo homogéneo				
5	0,15	23,75	7,50	1868,17	37,36	13,20	1,50	2,53	1,69	Flujo homogéneo				
6	0,12	24,20	7,00	1743,62	29,89	11,81	1,34	2,48	1,89	Flujo homogéneo				
7	0,10	24,19	7,00	1743,62	24,91	10,78	1,23	2,48	2,07	Homogéneo, muy leves pulsos alejados				
8	0,08	23,19	7,50	1868,17	19,93	9,64	1,10	2,59	2,31	Flujo Pulsante y ondulación en Alimentación (hay transporte)				
9	0,07	22,97	8,00	1992,71	17,44	9,02	1,03	2,61	2,47	Flujo pulsante y levemente ondulado (hay transporte)				
10	0,06	0,00	11,00	2739,98	14,95	8,35	0,95	0,00	2,67	Ondulación y pulsos al inicio, colapso al minuto				

#Azúcar ($W_{s2} = 4,41 \text{ [kg/min]}$)

"Azúcar"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]		Constante de placa orificio [K_{placa}]		dp [mm]	$D_{acrílico}$ [mm]	D_{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1520		1,20		0,30		1,00	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo					
Ø Placa [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]											
20,00		1,00		4,41											
Nº	ΔP_{placa} [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔP_{placa} [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [–]						
1	0,35	13,00	14,00	3487,24	87,18	20,16	2,30	4,62	1,92	Flujo homogéneo					
2	0,30	13,41	12,00	2989,07	74,73	18,67	2,13	4,47	2,08	Flujo homogéneo					
3	0,25	13,66	11,00	2739,98	62,27	17,04	1,94	4,39	2,27	Flujo homogéneo					
4	0,20	13,78	10,00	2490,89	49,82	15,24	1,74	4,35	2,54	Flujo homogéneo					
5	0,18	14,06	9,50	2366,34	44,84	14,46	1,65	4,27	2,68	Flujo homogéneo					
6	0,15	13,94	9,00	2241,80	37,36	13,20	1,50	4,30	2,93	Flujo homogéneo					
7	0,12	13,55	8,50	2117,26	29,89	11,81	1,34	4,43	3,28	Aparición de pulsos alejados					
8	0,11	13,07	8,50	2117,26	27,40	11,30	1,29	4,59	3,43	Pulsaciones más notorias; ondulación en Alimentación					
9	0,09	14,05	9,50	2366,34	22,42	10,22	1,16	4,27	3,79	Flujo pulsante y levemente ondulado (hay transporte)					
10	0,08	0,00	12,00	2989,07	19,93	9,64	1,10	0,00	4,02	Flujo ondulado y muy pulsante (errático al final)					
11	0,07	0,00	15,00	3736,33	17,44	9,02	1,03	0,00	4,30	Ondulación inicial, flujo errático al minuto, colapso					

#Azúcar ($W_{s3} = 6,89 \text{ [kg/min]}$)

"Azúcar"				ρ_s [kg/m3]	ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio[K _{placa}]	dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				1520	1,20	0,30	1,00	45	106	4,26	1 [inH ₂ O]	249 [Pa]
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo		
ØPlaca[mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]								
23,00		1,00		6,89								
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [—]			
1	0,35	8,75	17,00	4234,51	87,18	20,16	2,30	6,86	3,00	Flujo homogéneo		
2	0,30	8,37	16,00	3985,42	74,73	18,67	2,13	7,17	3,24	Flujo homogéneo		
3	0,25	8,22	15,00	3736,33	62,27	17,04	1,94	7,30	3,55	Flujo homogéneo		
4	0,20	9,15	14,00	3487,24	49,82	15,24	1,74	6,56	3,97	Flujo homogéneo		
5	0,18	9,47	13,00	3238,16	44,84	14,46	1,65	6,34	4,18	Flujo homogéneo		
6	0,15	9,15	12,00	2989,07	37,36	13,20	1,50	6,56	4,58	Pulsos ajeados		
7	0,12	8,22	12,50	3113,61	29,89	11,81	1,34	7,30	5,12	Flujo levemente pulsante		
8	0,11	8,59	13,00	3238,16	27,40	11,30	1,29	6,98	5,35	Pulsos y leves ondulaciones; ondulado en alimentación (hay transporte)		
9	0,10	8,65	15,00	3736,33	24,91	10,78	1,23	6,94	5,61	Flujo muy ondulado en toda configuración (colapso al final)		
10	0,09	0,00	18,00	4483,60	22,42	10,22	1,16	0,00	5,92	Ondulación inicial, flujo errático y colapso a pocos segundos		

#Arena ($W_{s1} = 3,74 \text{ [kg/min]}$)

"Arena"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio [K _{placa}]		dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				2480		1,20	0,30		1,60	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo				
ØPlaca [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]										
16,00		1,00		3,74										
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [-]					
1	0,35	16,38	13,00	3238,16	87,18	20,16	2,30	3,66	1,63	Flujo homogéneo				
2	0,30	16,66	12,00	2989,07	74,73	18,67	2,13	3,60	1,76	Flujo homogéneo				
3	0,28	16,18	11,50	2864,52	69,74	18,03	2,05	3,71	1,82	Flujo homogéneo				
4	0,25	15,69	11,00	2739,98	62,27	17,04	1,94	3,82	1,93	Flujo homogéneo				
5	0,23	16,53	10,50	2615,43	57,29	16,34	1,86	3,63	2,01	Flujo homogéneo				
6	0,20	16,21	10,00	2490,89	49,82	15,24	1,74	3,70	2,16	Flujo homogéneo				
7	0,18	15,65	9,50	2366,34	44,84	14,46	1,65	3,83	2,27	Pulsos alejados y leve ondulación				
8	0,16	16,28	9,00	2241,80	39,85	13,63	1,55	3,69	2,41	Pulsaciones; ondulación en alimentación				
9	0,14	15,66	8,50	2117,26	34,87	12,75	1,45	3,83	2,58	Flujo notoriamente pulsante				
10	0,12	15,29	8,50	2117,26	29,89	11,81	1,34	3,92	2,78	Flujo pulsante y ondulado (hay transporte)				
11	0,11	0,00	11,00	2739,98	27,40	11,30	1,29	0,00	2,91	Flujo muy ondulado; errático al final				
12	0,10	0,00	14,00	3487,24	24,91	10,78	1,23	0,00	3,05	Ondulación al inicio, flujo errático y colapso al minuto				

#Arena ($W_{s2} = 6,54 \text{ [kg/min]}$)

"Arena"				ρ_s [kg/m3]	ρ_g [kg/m³]	Constante de placa orificio[K _{placa}]		dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				2480	1,20	0,30		1,60	45	106	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo			
ØPlaca [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]									
20,00		1,00		6,54									
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [—]				
1	0,35	9,28	16,00	3985,42	87,18	20,16	2,30	6,47	2,85	Flujo homogéneo			
2	0,30	9,22	15,00	3736,33	74,73	18,67	2,13	6,51	3,08	Flujo homogéneo			
3	0,28	9,29	14,50	3611,79	69,74	18,03	2,05	6,46	3,19	Flujo homogéneo			
4	0,25	9,22	14,00	3487,24	62,27	17,04	1,94	6,51	3,37	Flujo homogéneo			
5	0,22	9,12	13,00	3238,16	54,80	15,98	1,82	6,58	3,59	Pulsos notorios			
6	0,20	9,06	13,00	3238,16	49,82	15,24	1,74	6,62	3,77	Flujo pulsante y ondulación en alimentación			
7	0,18	9,03	12,50	3113,61	44,84	14,46	1,65	6,64	3,97	Flujo pulsante			
8	0,16	9,15	12,00	2989,07	39,85	13,63	1,55	6,56	4,21	Flujo pulsante y ondulado (hay transporte)			
9	0,14	0,00	14,00	3487,24	34,87	12,75	1,45	0,00	4,51	Ondulación al inicio, flujo errático al minuto (colapso)			
10	0,13	0,00	17,00	4234,51	32,38	12,29	1,40	0,00	4,68	Ondulaciones, flujo errático y colapso al instante			

#Arena ($W_{s3} = 10,11$ [kg/min])

"Arena"				ρ_s [kg/m3]		ρ_g [kg/m³]		Constante de placa orificio [K _{placa}]		dp [mm]	D _{acrílico} [mm]	D _{pvc} [mm]	Altura estática [m]	Equivalencia	
				2480		1,20		0,30		1,60	44,8	106,2	4,26	1	249
Valores medidos				Valores calculados						Observaciones de flujo					
ØPlaca [mm]		Masa [kg]		Ws promedio [kg/min]											
23,00		1,00		10,11											
Nº	ΔPplaca [inH2O]	Tiempo [s]	ΔPt [inH2O]	ΔPt [Pa]	ΔPplaca [Pa]	Ug [m/s]	Wg [Kg/min]	Ws [Kg/min]	μ [-]						
1	0,35	5,88	21,00	5230,87	87,18	20,16	2,30	10,20	4,40	Flujo homogéneo					
2	0,30	6,09	20,00	4981,78	74,73	18,67	2,13	9,85	4,76	Flujo homogéneo					
3	0,28	5,94	19,00	4732,69	69,74	18,03	2,05	10,10	4,92	Flujo homogéneo					
4	0,25	5,84	18,00	4483,60	62,27	17,04	1,94	10,27	5,21	Pulsaciones notorias; ondulación en alimentación					
5	0,22	5,87	16,00	3985,42	54,80	15,98	1,82	10,22	5,55	Flujo pulsante; ondulación en alimentación (hay transporte)					
6	0,20	5,84	15,00	3736,33	49,82	15,24	1,74	10,27	5,83	Ondulación y pulsos (hay transporte)					
7	0,19	6,09	16,00	3985,42	47,33	14,86	1,69	9,85	5,98	Flujo ondulado en toda configuración (hay transporte)					
8	0,18	0,00	19,00	4732,69	44,84	14,46	1,65	0,00	6,14	Flujo ondulado, pulsante (colapso al minuto)					
9	0,16	0,00	25,00	6227,22	39,85	13,63	1,55	0,00	6,51	Ondulaciones al inicio, flujo errático y colapso en pocos segundos					