UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO-CHILE

DESARROLLO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO Y DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE NEUMÁTICO EN FASE DILUIDA

VICENTE SAMUEL WEIPPERT MARTÍNEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO CABREJOS MARÍN, Ph.D.

PROFESOR CORREFERENTE: Mg.-Ing., JAIME ESPINOZA SILVA

NOVIEMBRE 2016

Agradecimientos

Quiero agradecer, antes que todo, a mi mamá, mi papá y mi hermano, por la paciencia infinita, el constante apoyo y la incondicionalidad, no solo durante el desarrollo de este trabajo, si no que durante toda mi estadía en la universidad. Mención especial para el Aníbal, por haber lavado los platos que me tocaban a mi todas esas veces que tuve que estudiar para algún certamen de mate al otro día.

A mi familia en general, también por su constante apoyo, por los almuerzos, los asados y las celebraciones, necesarias siempre para distenderse del estudio y los trabajos.

A los profes del laboratorio, Vicente, Jorge y Gerardo, por la siempre buena voluntad, disposición y buena onda al momento de ayudarme cuando tuve algún pequeño problema o necesité algún elemento extra.

A toda la gente con la que compartí durante estos casi 7 años en la universidad, mis amigos. Al Alejandro, The Nik, Conejo, Pacheco, Ebdon y Pablo, por haber aportado su granito de arena.

A las personas que de alguna manera me apoyaron y ayudaron durante todo estos años; algunos profesores, apoyos de laboratorio, gente con la que compartí durante los períodos de práctica, y tantos otros que seguramente se me quedan en el tintero.

Y finalmente, a mi profesor guía durante estos últimos casi dos años, Francisco Cabrejos, por su constante dedicación, paciencia y buena voluntad para guiar el desarrollo de este trabajo y hacer que llegara a buen puerto.

"Todo pasa y todo queda,

pero lo nuestro es pasar"

Cantares, Antonio Machado

Resumen

El objetivo principal del presente trabajo es elaborar un programa con la capacidad de determinar la pérdida de presión y demás parámetros requeridos para diseñar un sistema de transporte neumático que opere en fase diluida. Debido a la complejidad de la elaboración de un modelo analítico para la interacción entre gas y sólidos es que el modelo propuesto se basa tanto en expresiones analíticas como en correlaciones empíricas.

El modelo desarrollado obtiene de forma separada la caída de presión en la fase gaseosa y la fase sólida. Para la fase gaseosa se utiliza una modificación de la clásica ecuación de Darcy-Weisbach, incluyendo el efecto de la compresibilidad del aire. Por otra parte, la fase sólida depende de un factor "K", el cual incorpora el efecto de múltiples variables en el comportamiento final del sistema. Para las curvas y codos, el modelo se basa en el estudio realizado por Schuchart, donde también la pérdida de carga se divide en fase gaseosa y fase sólida pero con otras relaciones de por medio, cobrando gran importancia el radio de curvatura del accesorio.

La plataforma utilizada para operar el modelo es Microsoft Excel, con las funcionalidades que otorga el uso de Visual Basic for Applications (VBA), de manera de hacer lo más intuitivo y automatizado cada procedimiento requerido para obtener los resultados numéricos.

Para verificar el funcionamiento del programa, se contrastó con valores obtenidos de literatura y ensayos de laboratorio propios, con el fin de verificar y ajustar algunas constantes y parámetros.

Finalmente, el modelo es válido, funciona de forma correcta, es capaz de estimar la caída de presión y el diagrama de estado de un sistema de transporte neumático en fase diluida, obteniendo errores menores al 15% en la gran mayoría de los casos, y es una opción para diseñar o diagnosticar sistemas reales.

Abstract

The main objective of the current work is to develop a software that has the capability to determinate the pressure drop and other relevant parameters for the design and diagnose of a dilute-phase pneumatic conveying system of bulk solids. Due the complexity in the development of an analytical model for the interaction between gas and solids, the proposed model in the current work is based both on analytical expressions and empirical correlations.

The developed model obtains separately the pressure drop in the gas phase and solid phase. For the gas phase, a modification of the classic Darcy-Weisbach equation is used, including the air compressibility effect. Otherwise, the solid phase depends on a “K” factor, which incorporates the effect of multiple variables in the final system behavior. For bends and elbows, the model is based on Schuchart research, in which the pressure drop is also divided in gas and solid phase, but in a different way, important being the radius of curvature of bends and elbows.

Microsoft excel is the platform selected to operate the model, using the functionalities that provide Visual Basic for Applications (VBA), in order to make more intuitive and automatized each required procedure to obtain the numeric results.

To test the performance of the program, a comparison with values obtained from literature and experimental results was done to verify and adjust some constants and parameters.

Finally, the model is valid and works fine to estimate the pressure drop and the state diagram of a dilute-phase pneumatic conveying system, obtaining percentage errors less than 15% in most cases, and is an option to design or diagnose real systems.

Índice

AGRADECIMIENTOS ..... **i**

RESUMEN ..... **ii**

ABSTRACT ..... **iii**

ÍNDICE ..... **iv**

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS ..... **vi**

GLOSARIO ..... **viii**

1 INTRODUCCIÓN **1**

2 OBJETIVOS **3**

3 ANTECEDENTES **4**

3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE NEUMÁTICO 5

3.1.1 Clasificación según la concentración de sólidos *5*

3.1.2 Clasificación según presión *6*

3.2 CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO 7

3.3 DIAGRAMA DE ESTADO 8

4 MODELO **11**

4.1 CAÍDA DE PRESIÓN 11

4.2 OTRAS CONSIDERACIONES 19

4.2.1 Factor de fricción f *19*

4.2.2 Velocidad mínima de transporte *21*

4.2.3 Fuga de aire en el punto de alimentación *22*

4.3 ALGORITMO 23

4.4 VALIDACIÓN DEL MODELO 28

4.4.1 Ejemplo 1: Transporte neumático de Poliestireno (Klinzing) *28*

4.4.2 Ejemplo 2: Transporte neumático de cenizas (Wypych) *31*

4.4.3 Ejemplo 3: Transporte neumático de cenizas (Wypych) *33*

5 EXPERIMENTAL **37**

5.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 38

5.1.1 Medición del flujo másico *40*

5.1.2 Características del material ensayado *41*

5.1.3 Instrumentos de medición utilizados *42*

5.2 EQUIPOS PRINCIPALES 43

6 RESULTADOS **44**

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS 47

7.1 TRAMO HORIZONTAL 47
7.2 CURVA 49
7.3 CODO 50
7.4 TRAMO VERTICAL POSTERIOR A CURVA 52
7.5 TRAMO VERTICAL POSTERIOR A CODO 54
7.6 RESUMEN GENERAL DE RESULTADOS 56

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57

9 REFERENCIAS 59

ANEXO 1: INSTRUMENTACIÓN 61

ANEXO 2: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MODELO 65

ANEXO 3: MEDICIONES 66

ANEXO 4: COMPARACIÓN ENTRE DIFERENCIAS MEDIDAS Y MODELO PARA TRAMOS INDIVIDUALES 72

ANEXO 5: CÓDIGO DEL PROGRAMA 77

Índice de Figuras y Tablas

Figura 1: Configuración de un sistema de transporte neumático de presión positiva... 8
Figura 2: Diagrama de estado estándar. 9
Figura 3: Punto de operación de un sistema de transporte neumático. 10
Figura 4: Representación esquemática de la tubería. 14
Figura 5: Representación esquemática de un codo/curva. 18
Figura 6: Pantalla de ingreso de elementos componentes del sistema 24
Figura 7: Pantalla de resultados del programa 26
Figura 8: Pantalla de ingreso de condiciones de operación. 27
Figura 9: Representación esquemática de la configuración para ejemplo 1 29
Figura 10: Comparación de resultados para ejemplo 1 29
Figura 11: Representación esquemática de la configuración para ejemplo 2. 31
Figura 12: Comparación de resultados para ejemplo 2. 32
Figura 13: Representación esquemática de la configuración para ejemplo 3. 34
Figura 14: Comparación de resultados para ejemplo 3. 35
Figura 15: Representación esquemática del banco de ensayos usado en laboratorio. 38
Figura 16: Soplador utilizado en el sistema de transporte neumático construido. 39
Figura 17: Tubo de pitot, silo y tramo de tubería horizontal. 39
Figura 18: Soplador, silo y segmento de tubería horizontal 40
Figura 19: Diagrama de estado para configuración 1. 44
Figura 20: Diagrama de estado para configuración 2. 44
Figura 21: Diagrama de estado para configuración 3. 45
Figura 22: Diagrama de estado para configuración 4. 45
Figura 23: Diagrama de estado para configuración 5. 46
Figura 24: Diagrama de estado para configuración 6. 46
Figura 25: Análisis para aire solo en tramo horizontal. 47
Figura 26: Análisis para flujo con presencia de sólidos en tramo horizontal. 48
Figura 27: Análisis para aire solo en la curva de radio r = 0,15 [m]. 49
Figura 28: Análisis para flujo con presencia de sólidos en la curva ensayada. 50
Figura 29: Análisis para aire solo en el codo utilizado. 51
Figura 30: Análisis para flujo con presencia de sólidos en el codo utilizado. 51
Figura 31: Análisis para aire solo en tramo vertical posterior a curva. 52
Figura 32: Análisis para flujo con presencia de sólidos en tramo vertical posterior a codo. 53
Figura 33: Análisis para aire solo en tramo vertical posterior a codo. 54
Figura 34: Análisis para flujo con presencia de sólidos en tramo vertical posterior a codo. 55

Tabla 1: Características del material, parámetros y condiciones para ejemplo 1. 28
Tabla 2: Comparación de resultados ejemplo 1. 30
Tabla 3: Características del material, parámetros y condiciones para ejemplo 2. 32
Tabla 4: Comparación de resultados ejemplo 2. 33
Tabla 5: Características del material, parámetros y condiciones para ejemplo 3. 34
Tabla 6: Comparación de resultados para ejemplo 3. 35
Tabla 7: Medición de flujo másico con las tres placas orificio utilizadas. 41
Tabla 8: Características del material ensayado. 42
Tabla 9: Resumen del análisis de resultados. 56

Glosario

Símbolo	Descripción
C_d	Coeficiente de arrastre sobre una partícula [-]
D	Diámetro interior de la cañería [m]
d_{pm}	Diámetro de partícula (medio) [m]
e	Rugosidad de la tubería [m]
ε	Espacio vacío [-]
f	Factor de fricción [-]
g	Aceleración de gravedad [m/s^2]
H	Altura en tubería vertical [m]
k_a	Coeficiente de pérdida de carga en accesorios [-]
K_{sh}	Factor K horizontal [-]
K_{sv}	Factor K vertical [-]
L	Largo de un segmento de cañería [m]
$L_{físico}$	Largo físico de un accesorio [m]
P	Presión [Pa]
p_f	Presión en el filtro [Pa]
r	Radio de curvatura [m]
R	Constante de gas [J/kg K]
Re	Número de Reynolds [-]
Re_p	Número de Reynolds de partícula [-]
T	Temperatura del gas [K]
U_g	Velocidad del gas [m/s]
U_p	Velocidad de partícula [m/s]
U_{pu}	Velocidad de desprendimiento [m/s]
U_s	Velocidad de depositación [m/s]
U_t	Velocidad terminal de partícula [m/s]
W_g	Flujo másico de gas [kg/s]
W_s	Flujo másico de sólidos [kg/s]
α	Caída de presión específica [-]
μ	Relación de carga [-]
ν	Viscosidad del gas [kg m/s]
ρ_g	Densidad del gas [kg/m^3]
ρ_p	Densidad de partícula [kg/m^3]

ΔP	Caída de presión [Pa]
$\Delta P_{p.\ alimentación}$	Caída de presión en punto de alimentación [Pa]
$\Delta P_{aceleración}$	Caída de presión en zona de aceleración [Pa]
$\Delta P_{horizontal}$	Caída de presión en tubería horizontal [Pa]
$\Delta P_{vertical}$	Caída de presión en tramo vertical [Pa]
ΔP_{codos}	Caída de presión en codos [Pa]
ΔP_{salida}	Caída de presión en salida [Pa]
ΔP_{filtro}	Caída de presión en filtro [Pa]
ΔP_{otros}	Caída de presión debido a efectos no modelables [Pa]
Q	Caudal de aire normalizado [Nm^3/h]

1 Introducción

Al ir directamente al significado del concepto de transporte neumático, se puede definir como la acción de transportar un material particulado entre dos puntos usando un gas (comúnmente aire) como fluido de transporte en un sistema de cañerías. No resulta difícil encontrar situaciones donde este método es utilizado, ya que basta con observar en una tienda comercial las cápsulas mediante las cuales se envía la recaudación del día a través de tubos, en la industria alimentaria como forma de transportar materias primas para la producción de alimentos, o más fácil aún: La aspiradora común y corriente que se utiliza en la gran mayoría de los hogares del mundo. ¿No es acaso esto un sistema mediante el cual se mueven partículas sólidas (suciedad) desde el suelo hasta una bolsa, a través de aire en una tubería?

Como se puede notar, no es algo a lo que se esté del todo ajeno en el diario vivir, y aún cuando métodos de este estilo se utilizan hace ya bastante tiempo, los fenómenos que ocurren durante la operación de estos sistemas no se pueden modelar analíticamente de forma eficaz y sencilla.

Si bien dentro de este amplio concepto califican un gran número de aplicaciones, el presente trabajo únicamente se remite al transporte neumático de sólidos a granel, entendiendo como sólido a granel un material compuesto por distintas partículas independientes unas de otras, de una misma composición pero de variados tamaños. Ejemplos clásicos de un sólido a granel son el cemento, la harina, algunos fertilizantes, arena, pellets, carbón pulverizado, entre otros.

Teniendo en cuenta la diversidad de materiales que caben dentro de la categoría de sólidos a granel, y que estos, bajo ciertas condiciones, pueden ser transportados de manera neumática, entonces se comprende la transversalidad de esta tecnología en variadas industrias, siendo una opción más conveniente que sus alternativas (correas, elevadores de capacho, camiones) para cantidades reducidas de material y condiciones limitadas de espacio físico. Usado desde la minería hasta en la industria alimentaria,

pasando por la industria química y el rubro energético, el uso de sistemas de transporte neumático ha ido en aumento con el paso de los años, y por la misma razón, es que se abre un campo de estudio con mucho por delante para comprender y trabajar.

Una de las ventajas considerables que posee esta tecnología frente a otras opciones, es el poco espacio físico requerido y su capacidad de adaptarse a formas complejas del lugar de emplazamiento. En lo que a materiales peligrosos y contaminantes respecta, también se ha convertido en una opción tremendamente viable debido a que el transporte se efectúa dentro de tuberías y aislado del medio ambiente, algo de vital importancia en un contexto donde cada vez la legislación medioambiental es más rigurosa con las emisiones industriales.

Por contraparte, en lo que a desventajas se refiere, son sistemas con un elevado consumo específico de energía y un costo relativamente alto de ingeniería, principalmente por la complejidad teórica que estos conllevan, incluyendo numerosas pruebas de laboratorio y ensayo de materiales. Otra limitante no menor es la que dice relación con el tamaño máximo de partículas a transportar, fijando como límite superior un diámetro de partícula de 20 [mm] como máximo.

El estudio de estos sistemas separa las dos fases presentes (gas y sólidos) en pos de una mayor simplicidad en los cálculos. Por una parte, la fase gaseosa se sustenta en la Mecánica de Fluidos y la ecuación propuesta por Darcy (1) para estimar la caída de presión en tuberías con agua, aplicando ciertas modificaciones que sí consideran la compresibilidad del gas. La complejidad surge cuando se hace necesario determinar el efecto de la interacción de los sólidos con el aire y las paredes, donde hasta el momento no hay modelos sencillos y universalmente aceptados con los cuales se determine la caída de presión del sistema. Ante esta imposibilidad es que numerosas investigaciones han recurrido al trabajo de laboratorio, con el fin de establecer correlaciones empíricas útiles, las cuales, bajo ciertas condiciones, entregan resultados más que aceptables para aplicaciones industriales.

2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es implementar un programa ejecutable mediante una planilla Excel que tenga la capacidad de entregar los parámetros relevantes para el diseño y/o diagnóstico de un sistema de transporte neumático en fase diluida.

Los objetivos específicos son:

- Elaborar un algoritmo de cálculo de los parámetros relevantes en un sistema de transporte neumático de uso sencillo y lograr ejecutarlo en Excel, incluyendo la caída de presión y el diagrama de estado,
- Mediante recopilación de datos en la literatura y ensayos de laboratorio, elaborar una base de datos para distintos materiales y configuraciones en la cual se base el programa para realizar los cálculos,
- Calibrar y probar el programa mediante ensayos de laboratorio y/o datos de una planta real.

Para esto, se diseñó e implementó un sistema de transporte neumático con cañerías de acrílico en el laboratorio perteneciente al Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (CITRAM) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, y se hicieron ensayos con gritz de maíz, para diferentes configuraciones y condiciones de operación.

3 Antecedentes

El transporte neumático de sólidos a granel no es una práctica reciente, se viene utilizando ya hace largos años en distintas industrias, y al igual que muchas tecnologías, en un principio obedeció más al ingenio que a la teoría. Con el paso del tiempo se han ido desarrollando modelos que describen de diversas maneras, algunos con más y otros con menos éxito, los fenómenos que ocurren en el interior de las tuberías, con el fin de hacer algo más predecible, y por consiguiente, controlable, la operación de estos sistemas.

Hoy, existen diversos modelos desarrollados por distintas personas que describen diferentes etapas y fenómenos involucrados, y por lo general, lo que se busca es obtener los valores de la caída de presión en el sistema total y tramos individuales, con el fin de dimensionar el equipamiento necesario y establecer las condiciones de operación óptimas.

En la gran mayoría de los casos, los modelos existentes separan los efectos de las dos fases (gas y sólidos), los tratan de forma separada, y luego se suman para obtener los resultados totales.

El tratamiento de la fase gaseosa está relativamente resuelto, utilizando muchas veces la ecuación de Darcy (1), ideada originalmente para el cálculo de la pérdida de carga en tuberías con agua, con la salvedad de que en este caso particular, se debe considerar el efecto de la compresibilidad del aire.

Es la fase sólida la que aún no ha sido resuelta de forma completa, debido principalmente a la complejidad que significa modelar la interacción de las partículas de material entre ellas mismas, las paredes de la tubería y el aire. A estas alturas existen modelos analíticos basados en las leyes de la mecánica clásica, pero que dada la cantidad de interacciones entre partículas, resultan en sistemas de ecuaciones de grandes proporciones, y que por lo mismo, requieren de alto poder computacional para ser resueltos.

Es por esto, que a nivel industrial y práctico, donde siempre es necesario simplificar las cosas, el problema de la fase sólida se ha resuelto, y con resultados más que aceptables, basándose en correlaciones empíricas obtenidas mediante pruebas de laboratorio y experiencia en sistemas existentes en la industria. Dado que cada ensayo corresponde a una configuración y materiales específicos, es que se ha requerido de los resultados de gran cantidad de personas para establecer correlaciones cada vez más generales y aplicables a sistemas de variadas características.

Aún así, dado que una correlación empírica no es una ley general, entonces existen configuraciones, accesorios y materiales que no obedecen de manera completa a los modelos empíricos elaborados, por lo que es necesario reformarlos, o pensar en modelos complementarios que sirven para condiciones y rangos bien establecidos.

3.1 Clasificación de los sistemas de transporte neumático

3.1.1 Clasificación según la concentración de sólidos

Tomando como criterio la concentración de sólidos, los sistemas de transporte neumático se pueden clasificar de la siguiente manera

- **Sistemas de transporte neumático de fase densa**

En estos sistemas, la cantidad de sólidos es alta en relación a la cantidad de gas que circula por la tubería, con relaciones de carga $\mu>50$. Una de sus ventajas es que debido al menor flujo de gas, las velocidades de transporte son más bajas y se produce menos desgaste de las cañerías y menos daño en las partículas sólidas. Por contraparte, son sistemas que operan en zonas menos estables, por lo que es difícil conseguir un flujo completamente homogéneo, y generan mayores caídas de presión.

- **Sistemas de transporte neumático de fase diluida**

En estos sistemas, se tiene una gran cantidad de gas respecto a la cantidad de partículas sólidas transportadas, con relaciones de carga $\mu<15$. Sus principales ventajas son, primero, que operan en un régimen estable de flujo y donde mejor funcionan los modelos, y segundo, generan menos caída de presión que los sistemas de fase densa.

Sus principales problemas son que, dada su alta velocidad de transporte, se genera atrición en algunas partículas al chocar a alta velocidad con codos y obstáculos, y el desgaste que se genera en estos mismos cuando se transportan materiales.

3.1.2 Clasificación según presión

- ***Sistemas de transporte neumático de presión negativa***

Corresponden a sistemas donde el equipo que suministra la presión y el flujo de aire se encuentra al final del sistema de cañerías, generando así una succión por vacío y el flujo necesario. Se utilizan principalmente cuando el material a transportar representa algún peligro para el medioambiente o quienes lo operan, debido a que si se produce una fisura en algún tramo del sistema, el vacío generado provoca que entre aire al sistema, y no que salga el gas con el material transportado hacia el exterior.

- ***Sistemas de transporte neumático de presión positiva***

Corresponden a sistemas donde el equipo que suministra la presión y el flujo de aire se encuentra al inicio del sistema, antes del punto de alimentación, generando así una presión positiva que logra "empujar" las partículas sólidas hacia el final de la tubería. Su ventaja radica en la mayor capacidad de transporte que tienen frente a los sistemas de presión negativa, dado el mayor diferencial de presión que se puede generar por sobre la presión atmosférica. También se utilizan cuando se tienen varios puntos de descarga distintos.

- ***Sistemas de transporte neumático de loop cerrado***

Corresponden a sistemas donde no existe la descarga del gas luego de ser utilizado como medio de transporte, dado que se produce una recirculación de este una vez descargados los sólidos. Se usan principalmente cuando los sólidos transportados son finos y de alta peligrosidad, dado el peligro que conllevaría liberar gas con estas partículas y también cuando el medio de transporte no es aire común y corriente, y liberarlo en vez de recircularlo conlleva elevados costos monetarios.

3.2 Construcción de un sistema de transporte neumático

Si bien son variadas las configuraciones posibles a la hora de construir un sistema para el transporte neumático de sólidos a granel, hay ciertos componentes y accesorios que son de uso común y se detallan a continuación:

- **Soplador:** Genera la presión y el flujo de aire necesario para mover las partículas de un punto a otro. Según la necesidad de presión, se utiliza un ventilador, soplador o un compresor.
- **Silo de alimentación:** Es donde se encuentran contenidas las partículas a transportar antes de ingresar al sistema.
- **Válvula de alimentación**: Es el nexo entre el silo y el sistema propiamente tal, regula el paso de sólidos de acuerdo a las necesidades de operación. Es de uso común la válvula de tipo rotatoria.
- **Zona de aceleración**: No se diferencia físicamente de una sección de tubería corriente, pero para efectos de cálculo se trata de forma distinta. Acá ocurre la aceleración de los sólidos hasta alcanzar una velocidad estable de transporte
- **Tubería:** Vía por donde fluye la mezcla de gas con sólidos. Puede ser con orientación horizontal o vertical, que para efectos de cálculo son distintos. Existen configuraciones inclinadas que no se tratarán en el presente trabajo debido a su complejidad y a que son poco frecuentes.
- **Codos y curvas:** Necesarios para el cambio de orientación en la tubería, hay de distintos tipos dependiendo de algunas características del material, como la abrasividad. Su principal característica al momento de elegirlos es el radio de curvatura, el que influye de forma directa en la caída de presión ocasionada.
- **Silo de descarga:** Lugar al que van a dar las partículas luego de ser transportadas.
- **Filtro:** Se utiliza para asegurar que el aire devuelto al ambiente esté libre de partículas y que no se pierda cantidad importante de sólidos. Los hay de distinto tipo (ciclón, precipitador electrostático, de mangas, entre otros).

- **Accesorios e instrumentos:** Entre ellos es posible encontrar principalmente transductores de presión, etc.

Número	Descripción
1	Soplador
2	Silo de alimentación
3	Válvula de alimentación
4	Zona de aceleración
5	Tramo de cañería
6	Codo o curva
7	Silo de descarga
8	Filtro de aire
9	Accesorios/instrumentación

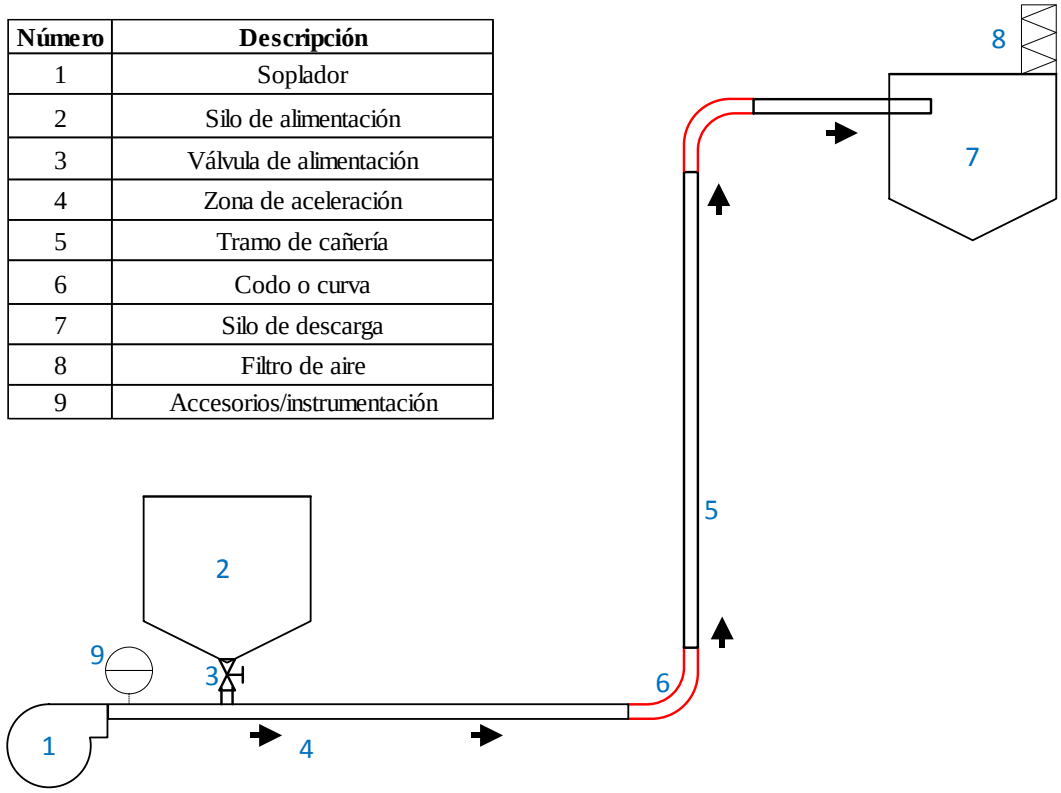


Figura 1: Configuración de un sistema de transporte neumático de presión positiva.

3.3 Diagrama de estado

Uno de los elementos importantes al momento de estudiar y analizar un sistema de transporte neumático, es el diagrama de estado, gráfico de caída de presión en función del caudal de aire (también se construye en función de la velocidad del aire) y con un flujo de sólidos constante, donde resulta sumamente fácil identificar los distintos regímenes de operación que se pueden dar durante la operación del sistema. Se distingue un mínimo en la caída de presión que es idealmente el punto donde debiera operar para hacerlo de la forma más eficiente posible, pero teniendo en cuenta que

mientras menor es el flujo de aire entonces se corre más riesgo de caer en fases inestables. La Figura 2 muestra un diagrama de estado típico con todas las zonas más relevantes.

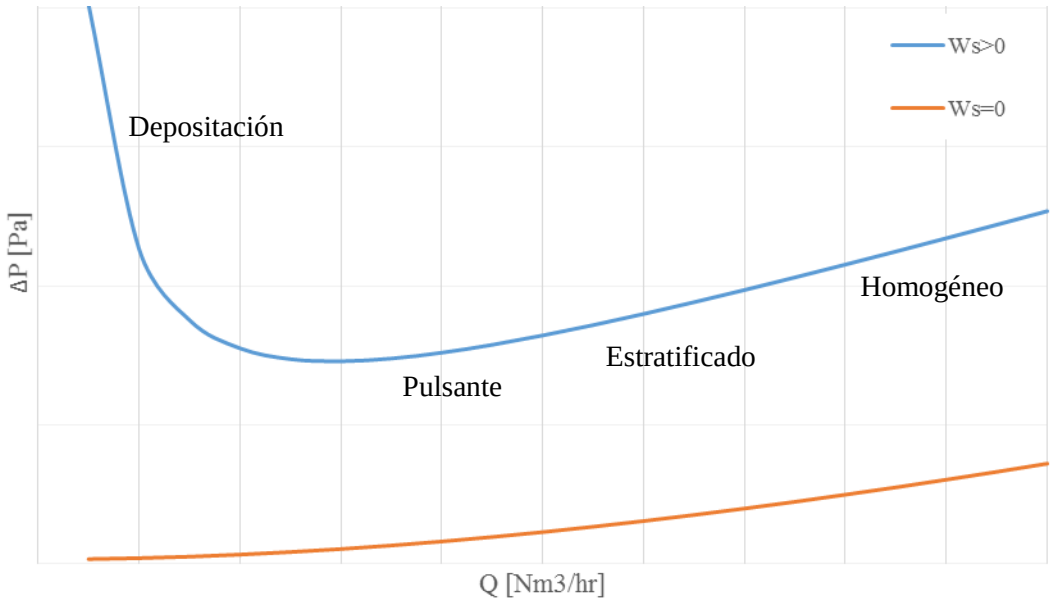


Figura 2: Diagrama de estado estándar.

En el gráfico se identifica la curva azul, que corresponde a flujo con carga de sólidos mayor a cero ($W_s > 0$), y la curva naranja, que corresponde a flujo de aire sólo ($W_s = 0$). Tal como se muestra, el mínimo en la caída de presión se encuentra entre las zonas de flujo pulsante y estratificado, razón por la que no es conveniente acercarse demasiado a este mínimo, debido a que ambos tipos de flujos no son completamente estables.

Flujo homogéneo: Corresponde a la zona ubicada más hacia la derecha y es donde se desarrolla el flujo más estable. Todas las partículas fluyen de forma parecida sin depositarse y logrando ser transportadas desde un punto a otro. En la gran mayoría de los casos es en esta zona donde se desea operar.

Flujo Estratificado: Corresponde a la zona con un flujo que requiere menos velocidad del gas para funcionar, pero es algo más inestable. Las partículas sólidas se mueven de forma irregular, concentrándose en la parte inferior de la tubería.

Flujo Pulsante: En esta zona el flujo es aún más inestable. Las partículas se mueven formando "émbolos" de material a lo largo de la tubería, como enviado por pulsos.

Depositación: Ocurre cuando el flujo no es capaz de transportar las partículas sólidas y se depositan en el fondo de la tubería. El gas no cumple con la velocidad mínima para moverlas de un punto a otro.

Otro elemento de importancia en la operación de estos sistemas es la curva característica correspondiente al soplador, ya que es con esta herramienta mediante la cual se determina las posibles configuraciones que se disponen y cómo se va a operar. También es un gráfico de presión en función del flujo de aire.

Ya descritos los dos diagramas relevantes, tanto el de estado como el del soplador, entonces para encontrar el punto de operación es necesario superponer ambas curvas y encontrar la intersección entre ellas, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.

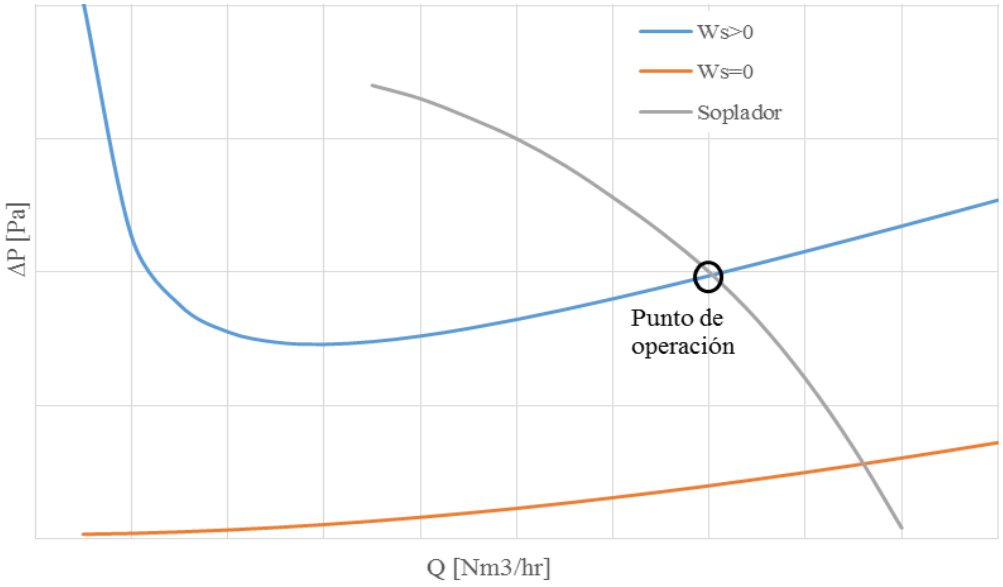


Figura 3: Punto de operación de un sistema de transporte neumático.

4 Modelo

El modelo propuesto reconoce 7 tipos de elementos componentes del sistema de transporte neumático:

1. Punto de alimentación (Tee)
2. Largo de aceleración
3. Tubería Horizontal
4. Tubería Vertical
5. Codos y curvas
6. Salida
7. Filtro

Es necesario destacar que estos elementos son los que influyen en la caída de presión del sistema, puesto que hay otros elementos de vital importancia para el funcionamiento como lo son el compresor, el alimentador y los silos, los cuales no afectan.

Todos estos componentes se tratan de forma distinta para efectos de cálculo, por lo que a continuación se detallan los criterios y relaciones para cada uno de ellos.

4.1 Caída de presión

La caída de presión total del sistema es la suma de las caídas de presión individuales en cada componente y se establece de la siguiente manera:

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{P.\ alimentación} + \Delta P_{aceleración} + \Delta P_{horizontal} + \Delta P_{vertical} + \Delta P_{codos} + \Delta P_{salida} + \Delta P_{filtro} \quad (1)$$

- ***Punto de alimentación (Tee recta)***

La caída de presión en el punto de alimentación únicamente tomará en cuenta la pérdida ocasionada por la fase gaseosa, descartando por un tema de complejidad los

efectos de la fase sólida en la caída de presión total. La relación utilizada para calcular la caída de presión en una Tee es la siguiente (1):

$$\Delta P_{P.\ alimentación} = k * {U_g}^2 * \frac{\rho_g}{2} \tag{2}$$

donde: k = 0,4 @ tee recta

- ***Largo de aceleración***

En esta zona las partículas entran al sistema y adquieren la velocidad de transporte que mantendrán durante el trayecto. Se sugiere que el largo de este segmento sea entre 100 y 200 veces el diámetro de la tubería (2).

Para el cálculo de la caída de presión en esta zona se utilizó el modelo propuesto por Klinzing (3), con la siguiente relación:

$$\Delta P_{aceleración} = \rho_g * U_g * U_p * \mu \tag{3}$$

Para la velocidad de partícula en tramo horizontal se utiliza la relación de Hinkle (4):

$$U_p = U_g * (1 - 0{,}0637 * {d_{pm}}^{0{,}3} * {\rho_p}^{0{,}5}) \tag{4}$$

Y para el caso de la velocidad de partícula en tramo vertical se utiliza la relación propuesta por Konno y Saito (5):

$$U_p = U_g - U_t \tag{5}$$

con la velocidad terminal de caída de una partícula individual definida de la siguiente manera:

$$U_t = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{d_{pm} * g}{C_d} * \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}} \tag{6}$$

El coeficiente de arrastre, C_d, se calcula mediante la siguiente relación propuesta por Kaskas (6), válida para $Re_p < 10^5$:

$$C_d = \frac{24}{Re_p} + \frac{4}{{Re_p}^{0,5}} + 0,4 \tag{7}$$

Donde Rep representa el número de Reynolds de partícula, y se define como:

$$Re_p = \frac{U_g * \rho * d_{pm}}{\mu} \tag{8}$$

- ***Tubería Horizontal***

En el caso de tubería horizontal, no existe altura estática, por lo que la pérdida de carga total se define de la siguiente manera:

$$\Delta P_{horizontal} = \Delta P_{h.\ gas} + \Delta P_{h.\ sólidos} \tag{9}$$

Para el cálculo de la caída de presión en una tubería horizontal producto de la fase gaseosa, se recurre a la ecuación de Darcy-Weisbach (7) para la pérdida de carga en tuberías. Resulta necesario tener en cuenta que esta ecuación fue formulada para utilizarla con agua, por lo que los efectos de la compresibilidad del fluido no son tomados en cuenta. Considerando esto, entonces es posible introducir ciertas modificaciones a la ecuación de Darcy-Weisbach con tal de hacerla útil para fluidos compresibles como el aire. Para esto se recurre al comportamiento de gas ideal del aire y a la ley de continuidad para hacer una integración a lo largo de la tubería, como se muestra en la Figura 4.

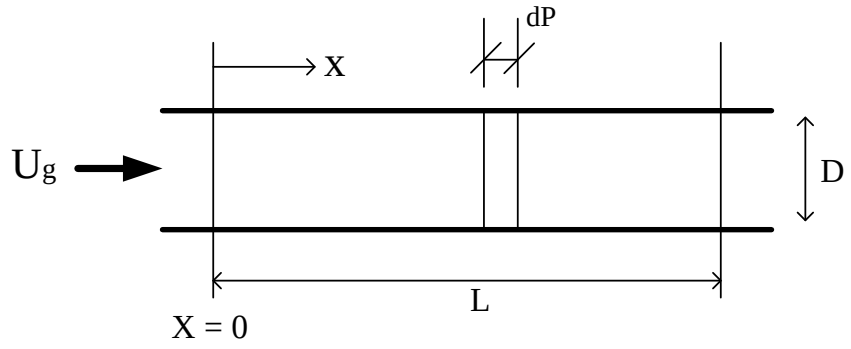


Figura 4: Representación esquemática de la tubería.

Luego:

$$W_g = \rho_g * U_g * \frac{\pi}{4} * D^2 \tag{10}$$

$$\rho_g = \frac{P}{R\,T} \tag{11}$$

$$dP = f * \frac{dx}{D} * \frac{\rho_g * {U_g}^2}{2} \tag{12}$$

Donde, combinando las ecuaciones anteriores e integrando a lo largo de una tubería de largo *L* se obtiene:

$$\int_{P=P1}^{P=P2} P * dP = 8 * f * \frac{1}{D^5} * \frac{{W_g}^2}{\pi^2} * R * t * \int_{x=0}^{x=L} dx \tag{13}$$

Desarrollando la integral:

$$\Delta P_{h.\ gas} = P_1 - P_2 = \sqrt{{P_2}^2 + 16 * f * \frac{L}{D^5} * \frac{{W_g}^2}{\pi^2} * R * T} - P_2 \tag{14}$$

En el caso de la fase sólida, Gasterstadt (8) estableció un modelo basado en la caída de presión específica, dividiendo la ecuación 9 por la caída de presión del aire, obteniendo finalmente un modelo de la forma:

$$\alpha_h = \frac{\Delta P_{horizontal}}{\Delta P_{h.\ gas}} = 1 + \frac{\Delta P_{h.\ sólidos}}{\Delta P_{h.\ gas}} \tag{15}$$

De donde se desprende que:

$$\Delta P_{h.\ sólidos} = \mu * K_{sh} * \Delta P_{gas} \tag{16}$$

El parámetro K_{sh} se define como el factor de fricción por la presencia de sólidos, y en base a lo publicado por Cabrejos, Ríos, Campano, Rojas y López (9), se puede obtener de la siguiente manera:

$$K_{sh} = 0{,}027 * \left(\frac{d_{pm}}{D}\right)^{0{,}21} * \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0{,}48} \tag{17}$$

Finalmente, la caída total de presión debido a ambas fases puede expresarse de la siguiente forma:

$$\Delta P_{horizontal} = (1 + \mu * K_{sh}) * \Delta P_{h.\ gas} \tag{18}$$

- ***Tubería Vertical***

En este caso, la caída de presión puede expresarse de forma similar al caso de tubería horizontal, con la salvedad que debe incluirse el efecto del cambio de altura. Si bien la altura estática en estricto rigor afecta a ambas fases, el efecto de la altura en la fase gaseosa se desprecia frente a la magnitud de la fase sólida. La ecuación a tratar en este caso es de la siguiente forma:

$$\Delta P_{vertical} = \Delta P_{v.\ gas} + \Delta P_{v.\ sólidos} + \Delta P_{estático\ sólidos} \tag{19}$$

Al igual que el caso anterior, la caída de presión producto de la fricción del gas se puede obtener mediante la ecuación 14. De manera similar, es necesario recurrir a una caída de presión específica para obtener las pérdidas producto de la fricción de la fase sólida, quedando la ecuación como se ve a continuación:

$$\Delta P_{v.\ sólidos} = \mu * K_{sv} * \Delta P_{gas} \tag{20}$$

donde el factor K_{sv} cumple la misma función y se obtiene de forma muy similar al caso anterior, también publicado por Cabrejos, Ríos, Campano, Rojas y López (9) y puede obtenerse de forma analítica mediante la siguiente relación:

$$K_{sv} = 0{,}023 * \left(\frac{d_{pm}}{D}\right)^{0{,}21} * \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0{,}48} \tag{21}$$

En el modelo propuesto por Yang (10), la caída de presión producto de la altura estática se define como:

$$\Delta P_{estático\ sólidos} = \rho_p * (1 - \varepsilon) * H * g \tag{22}$$

donde $\mathcal{E}$ es el denominado “voidage” y representa el espacio que ocupa el gas del total en un flujo bifásico. Se define de la siguiente manera:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right) * \left(\frac{U_g}{U_p}\right) * \mu \tag{23}$$

Combinando las ecuaciones 5, 6, 22 y 23, se obtiene:

$$\Delta P_{estático\ sólidos} = \frac{\rho_g * U_g * H * g}{U_g - \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{d_{pm} * g}{C_d} * \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}}} \tag{24}$$

Finalmente, sumando todas las fuentes de caída de presión, se obtiene la siguiente relación:

$$\Delta P_{vertical} = (1 + K_{sv} * \mu) * \Delta P_{v.\ gas} + \frac{\rho_g * U_g * H * g}{U_g - \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{d_{pm} * g}{C_d} * \frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}}} \tag{25}$$

- ***Codos y curvas***

La caída de presión producida en los codos consta de dos componentes: fase gaseosa y fase sólida. La ecuación que define la caída total de presión es la siguiente:

$$\Delta P_{codo} = \Delta P_{c.\ gas} + \Delta P_{c.\ sólidos} \tag{26}$$

En el caso de la fase gaseosa, el tratamiento es el mismo que se hace en la ecuación de Darcy-Weisbach para accesorios, que se detalla a continuación:

$$\Delta P_{c.\ gas} = P_1 - P_2 = \sqrt{{P_2}^2 + 16 * \frac{k}{D^4} * \frac{{W_g}^2}{\pi^2} * R * T} - P_2 \tag{27}$$

Aun cuando se identifica un factor k, este no tiene relación alguna con los factores K_{sh} y K_{sv}, y es sencillo encontrar un listado de distintos valores para distintos accesorios en la literatura.

El tratamiento de la fase sólida en los accesorios es uno de los apartados de complejidad que se encuentran en esta disciplina, donde existen diversas formas de enfrentarlo dependiendo del modelo propuesto. En este caso en particular, se utilizará

el modelo propuesto por Schuchart (11) en una publicación del año 1968. Si bien la publicación contiene todo el detalle de la experimentación y las condiciones de operación, el resultado final se puede resumir en la siguiente ecuación que determina la caída de presión de los sólidos, relacionándola con la caída de presión de la fase sólida en una tubería de "largo físico" equivalente al accesorio, donde, en el caso de codos y curvas, corresponde a la cuarta parte de una circunferencia de radio igual al radio de curvatura del accesorio:

$$\frac{\Delta P_{sólidos\ codo}}{\Delta P_{sólidos\ largo\ físico}} = 210 * \left(\frac{2 * r}{D}\right)^{-1,15} \tag{28}$$

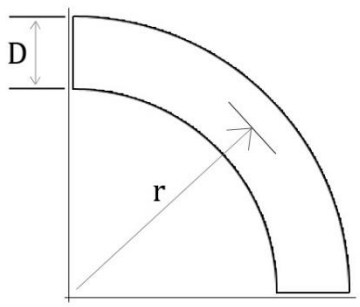


Figura 5: Representación esquemática de un codo/curva.

Desarrollando, se obtiene que la caída de presión en los codos producto de la fase sólida queda finalmente definida por la siguiente relación:

$$\Delta P_{c.\ sólidos} = 210 * \left(\frac{2 * r}{D}\right)^{-1,15} * \left(\sqrt{{P_2}^2 + 16 * f * \frac{L_{físico}}{D^5} * \frac{{W_g}^2}{\pi^2} * R * T} - P_2\right) * (\mu * K_{sh}) \tag{29}$$

- ***Salida***

Se considera la salida de la tubería en su tramo final como un accesorio, debido a la caída de presión que ocasiona. Es relevante destacar que en este caso únicamente se considera como caída de presión la ocasionada por la fase gaseosa, dejando de lado el efecto de los sólidos en este accesorio particular, principalmente por la complejidad que significa modelarlos de manera óptima. La relación utilizada para calcular la caída de presión en salidas es la siguiente (1):

$$\Delta P_{salida} = k * {U_g}^2 * \frac{\rho_g}{2} \tag{30}$$

Donde: k = 1

- ***Filtro***

Si bien existen algunos modelos que entregan resultados acerca de la caída de presión en el proceso de filtrado y separación, por el momento esta información debe suministrarla el usuario directamente al programa en el apartado correspondiente. El valor utilizado por defecto para diseño de sistemas nuevos es de P_f = *1500 [Pa]* el cual se considera una buena aproximación (12).

4.2 Otras consideraciones

4.2.1 Factor de fricción f

En la ecuación 12 se hace referencia a un factor de fricción *f,* término que proviene de la ecuación de Darcy original concebida para su uso en agua y que conceptualmente es una forma de cuantificar la fricción que existe entre el aire y las paredes de la tubería por la cual es transportado.

Existen varios modelos distintos para el cálculo del factor de fricción, algunos con rangos de utilización más amplios que otros. En este caso, se utiliza el modelo propuesto por Serghides (13) en el año 1984, principalmente por dos razones: En primer lugar, un análisis realizado por A. Miller el año 2009 (14) para su trabajo de

título, arrojó que este modelo es el que menor error relativo presenta tomando como referencia la ecuación de Colebrook-White, debido a que esta es la base para la mayoría de los modelos posteriores. Por otra parte, el modelo funciona en un rango bastante amplio de rugosidad relativa y régimen de flujo.

La ecuación propuesta por Serghides para el cálculo del factor f es la siguiente:

$$f = \left(A - \frac{(B-A)^2}{C - 2 * B + A}\right)^{-2} \tag{31}$$

Con:

$$A = -2 * Log_{10} * \left(\frac{\frac{e}{D}}{3{,}7} + \frac{12}{Re}\right)$$

$$B = -2 * Log_{10} * \left(\frac{\frac{e}{D}}{3{,}7} + \frac{2{,}51 * A}{Re}\right)$$

$$C = -2 * Log_{10} * \left(\frac{\frac{e}{D}}{3{,}7} + \frac{2{,}51 * B}{Re}\right)$$

Para el siguiente rango de utilización:

$$1 * 10^{-6} < \frac{e}{D} < 5 * 10^{-2}\ ; Re > 2300$$

Es necesario destacar que si bien pareciera que el factor de fricción es variable pues depende del número de Reynolds, el que a su vez depende de la velocidad, que cambia a lo largo de la tubería, esto no es así. La definición del número de Reynolds es:

$$Re = \frac{\rho_g * U_g * D}{\mu} \tag{32}$$

La invariabilidad de este número adimensional viene dada por el producto ρ_g x U_g, el que se mantiene constante producto del comportamiento de gas ideal del aire. Por otra parte, la viscosidad del gas y el diámetro de la tubería se consideran constantes.

4.2.2 Velocidad mínima de transporte

Si bien al utilizar un sistema de transporte neumático siempre se buscará que el consumo de energía sea el menor posible, tendiendo a operar en donde se encuentra la menor pérdida de carga, es de suma importancia considerar que en este punto el flujo ya comienza a ser inestable, por lo que se hace relevante buscar un punto donde el consumo de energía sea bajo y al mismo tiempo no se entre en zonas de inestabilidad.

Se muestran a continuación las relaciones mediantes las cuales se obtendrán las velocidades mínimas relevantes en la operación de estos sistemas.

- ***Velocidad de desprendimiento***

Punto en donde la velocidad comienza a hacer posible que las partículas dejen el estado de reposo y comiencen a ser transportadas. Si bien existen diversos modelos, se utilizará el siguiente, propuesto por Cabrejos y Klinzing (15):

$$\frac{U_{pu}}{\sqrt{d_p * g}} = 0{,}0428 * {Re_P}^{0{,}175} * \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0{,}75} * \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0{,}25} \tag{33}$$

Válida para los siguientes rangos:

$$25 < Re_p < 5000$$

$$8 < \frac{D}{d_p} < 1340$$

$$700 < \frac{\rho_p}{\rho_g} < 4240$$

- ***Velocidad de depositación***

Punto donde, luego de estar ya en movimiento, las partículas vuelven al reposo debido a una baja velocidad. Si bien aún falta mayor desarrollo de relaciones en este punto, se utilizará el siguiente modelo propuesto por Schade (16):

$$U_s = \sqrt{g * D} * \left(\frac{D}{d_{pm}}\right)^{0,025} * \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0,34} * \mu^{0,11} \tag{34}$$

- ***Velocidad mínima de transporte***

Se define la velocidad mínima de transporte, como el punto desde donde será seguro operar para no caer en zonas de flujo inestable. La siguiente relación es la recomendada para estimarla (17):

$$U_{g\,min} = C * U_s; \quad 1,15 < C < 1,2 \tag{35}$$

4.2.3 Fuga de aire en el punto de alimentación

Si bien existen algunos modelos que entregan resultados acerca de la caída de presión en el punto de alimentación, por el momento esta información debe suministrarla el usuario directamente al programa en el apartado correspondiente. El valor utilizado por defecto para diseño de sistemas nuevos es de un 5% del flujo de aire en el compresor, el cual se considera una buena aproximación.

4.3 Algoritmo

Para entender el funcionamiento del programa desarrollado es necesario hacer una descripción del algoritmo mediante el cual operará, sus datos de entrada (inputs), constantes y datos de salida (outputs). Se describirá de forma textual en un principio para luego complementar con un diagrama de flujo (ver Anexo 2) que facilite esta tarea.

En primer lugar, el usuario debe ingresar las características del material, las que se detallan a continuación:

- Nombre del material
- Densidad de partícula
- Tamaño máximo de partícula
- Tamaño medio de partícula
- Contenido de humedad

Luego, el usuario debe definir las condiciones de operación, donde se especifican las siguientes variables:

- Caudal normalizado de gas
- Flujo másico de sólidos
- Tipo de sistema (presión negativa o positiva)
- Gas a utilizar (Aire por defecto)
- Temperatura del gas (se asume constante a lo largo de la tubería)
- Elevación sobre el nivel del mar (ubicación del sistema)

Ya fijadas las condiciones y parámetros anteriores, entonces se hace necesario establecer la configuración del sistema de transporte neumático, determinando los tramos y accesorios que lo compondrán y los valores relevantes para cada elemento. Los componentes debe elegirlos el usuario de una lista de piezas disponibles son:

- Punto de alimentación (Tee recta)
- Tramo de aceleración

- Cañería horizontal
- Cañería vertical
- Codos y curvas
- Salida

Y las características necesarias por definir en cada componente son las siguientes:

- Largo (Solo para el caso de cañerías)
- Diámetro interior
- Material
- Radio de curvatura (Solo para el caso de codos y curvas)
- Rugosidad

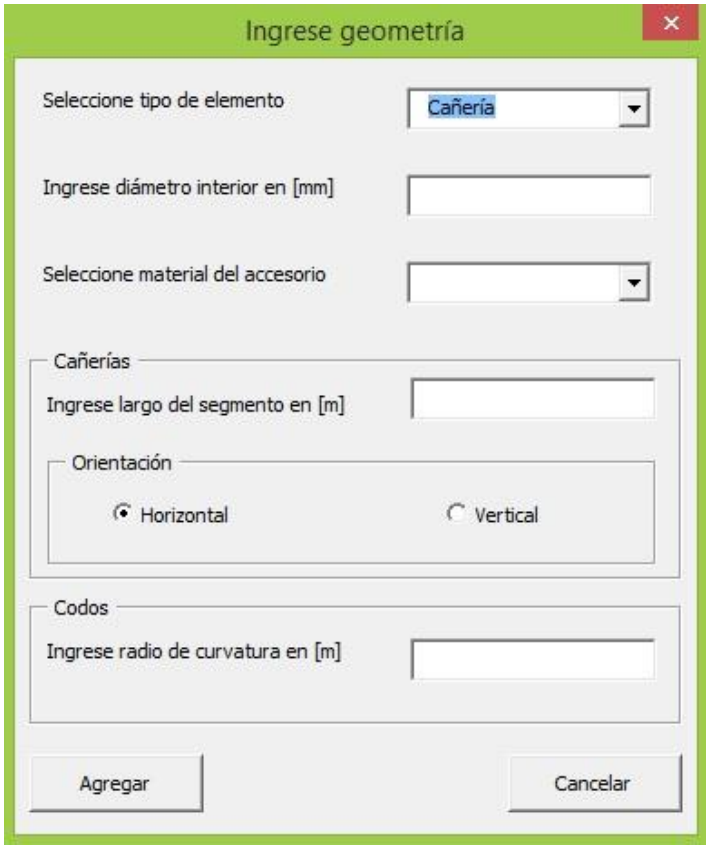


Figura 6: Pantalla de ingreso de elementos componentes del sistema

En el caso de los sistemas de presión positiva el ingreso de los componentes del sistema debe hacerse partiendo desde el último elemento (filtro), ya que el algoritmo contempla que el inicio del cálculo sea en el tramo final debido a que es en ese punto donde se encuentra el único valor de presión conocido con anterioridad: la presión atmosférica. **En caso de que el sistema sea de presión negativa, el ingreso de los componentes parte desde el primero hasta el último elemento.**

Un último valor necesario corresponde al límite superior del eje de las abscisas (caudal normalizado de aire) en el diagrama de estado, para que así se muestre sólo el rango deseado por el usuario. Esto se logra ingresando el límite superior en la ventana correspondiente.

Ya ingresadas todas las variables y condiciones, entonces es posible proceder con la rutina de cálculo principal.

El programa genera 6 valores por cada elemento/componente del sistema: Densidad de entrada y salida, presión de entrada y salida, y velocidad de entrada y de salida para el gas, donde los valores de salida ya conocidos corresponden al valor de entrada del elemento anterior.

En primer lugar, se genera un contador que toma valores desde 1 hasta el número total de elementos, y en cada valor se evalúa a qué tipo de los 7 elementos disponibles corresponde, para así seleccionar la ecuación adecuada para calcular la caída de presión, tomar los valores de entrada para la presión, calcular la caída de presión y la densidad de salida del elemento. El proceso se repite para todos los elementos componentes del sistema.

Una vez obtenida la caída de presión para cada elemento, se suman las caídas de presión individuales y la caída producto del filtro, hasta obtener la presión en el punto de alimentación del sistema. Obtenida la caída de presión total, entonces el programa elabora el diagrama de estado, tomando a lo menos 20 valores distintos para el caudal de aire en tramos equidistantes entre 0 y el límite fijado por el usuario.

Finalmente, todos los resultados se resumen en una hoja de resultados, donde se muestran los datos de entrada, las constantes utilizadas y los datos de salida, como caída de presión, relación de carga, factor K vertical y horizontal, y el diagrama de estado, con la opción de agregar comentarios y acotaciones en el espacio señalado.

Nombre proyecto			Fecha	02-11-2016	
Descripción proyecto					
Valores y propiedades					
Inputs			Constantes		
Material	Eraring Flyash		Densidad aire	1,2	[kg/m3]
Densidad de partícula	1365,00	[kg/m3]	Viscosidad dinam.	0,00002	[kg/ms]
Tam. Máx. partícula	1,50	[mm]			
Tam. Med. Partícula	1,50	[mm]	factores de accesorios		
Diámetro cañería	69,0	[mm] ID	Codo 90°	0,75	[-]
Largo Horizontal	80	[m]	Codo 45°	0,35	[-]
Largo Vertical	30	[m]	Tee directo	0,4	[-]
Flujo de aire	500	[Nm3/hr]	Tee desviado	1	[-]
Flujo de sólidos	3,0	[ton/hr]	Curva 180°	1,5	[-]
P punto de alim.	169477	[Pa]	Entrada	1	[-]
P punto descarga	1500	[Pa]	Salida	1	[-]
Temperatura del aire	293	[K]	Curva 90°	0,25	[-]
Elevación	0,00	[msnm]			
Presión barométrica	760,0	[mm Hg]			
ΔP del filtro	1500	[Pa]			
% Humedad	20	%			
Resultados					
Outputs			Diagrama de estado		
ΔP Total	0,667	[bar]			
μ	4,99	[Kgs/Kgg]			
f	0,01623	[-]			
k sh	0,4400	[-]			
k sv	0,3323	[-]			
Ws	3,00	[ton/hr]			
Wg	0,60	[ton/hr]			
Re	165690	[-]			
Ug aliment.	22,4	[m/s]			
Ug salida	37,1	[m/s]			
Comentarios y acotaciones					

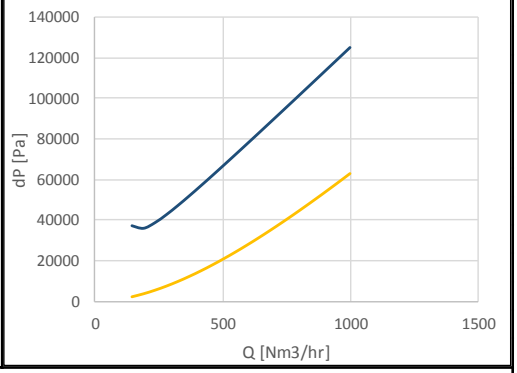


Figura 7: Pantalla de resultados del programa

Nota: El programa corresponde a una planilla Excel con macros activadas (formato .xlms), con el algoritmo construido usando las utilidades que brinda Visual Basic for Applications (VBA). Cuenta con una rutina principal que realiza el cálculo de la caída de presión, una rutina secundaria dependiente de la rutina principal para la obtención del diagrama de estado, y una serie de rutinas menores relacionadas con las Userform (cuadros de interacción entre VBA y el usuario a través de la planilla de Excel) necesarias para el ingreso de los datos requeridos. El programa está sujeto a modificaciones si es que resultara necesario para mejorarlo o agregarle funcionalidades. Se requiere conocimiento básico acerca del uso de Macros y VBA por parte del usuario.

La hoja 1 (Sheet 1) corresponde a la interfaz del programa, donde el usuario proporciona los datos requeridos y manda a realizar las acciones necesarias. La hoja 2 (Sheet 2) contiene una serie de valores calculados u obtenidos de tabla que son de uso interno del programa, el usuario no interactúa en esta hoja a no ser que deban ser cambiadas algunas constantes o valores. En la hoja 3 (Sheet 3) se encuentra contenido exclusivamente el diagrama de fase luego de dar la orden de generarlo desde la hoja 1. Finalmente, en la hoja 4 (Sheet 4) se presentan todos los resultados relevantes y un resumen de los datos de entrada más relevantes.

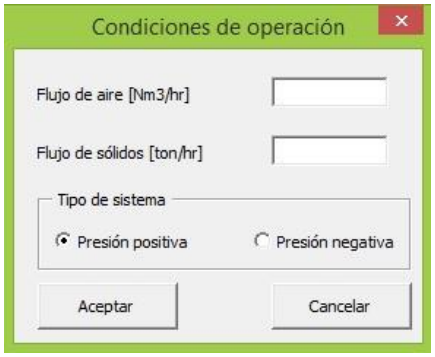


Figura 8: Pantalla de ingreso de condiciones de operación.

Mayores detalles respecto al modelo y programa se encuentran en el Anexo 5, junto con el código de la rutina principal de cálculo.

4.4 Validación del modelo

Ya presentado el modelo y su funcionamiento, entonces corresponde ajustarlo y ponerlo a prueba, esto mediante ensayos de laboratorio y datos encontrados en la literatura existente. Se encontraron tres distintas configuraciones con el objetivo de comprobar paso por paso que el modelo prediga de forma eficaz los parámetros necesarios para la operación de un sistema de transporte neumático en fase diluida, la primera de Klinzing (18), y las dos siguientes de Wypych (19).

4.4.1 Ejemplo 1: Transporte neumático de Poliestireno (Klinzing)

Un sistema de transporte neumático de 100 [m] horizontales, 20 [m] verticales y 102,2 [mm] I.D., mostrado esquemáticamente en la Figura 9, opera con las características del material y los parámetros de operación resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Características del material, parámetros y condiciones para ejemplo 1.

Características del material	
Material	Poliestireno
Densidad de partícula	1050 [kg/m^3]
Tamaño de partícula	2,5 [mm]
Parámetros de operación	
Flujo de sólidos	3,9 [ton/hr]
Caudal de aire	100-1000 [kg/m^3]
Condiciones de borde	
Elevación del sistema	0 m.s.n.m.
Temperatura del gas	20 [°C]
Gas de transporte	Aire
Caída presión filtro	1000 [Pa]

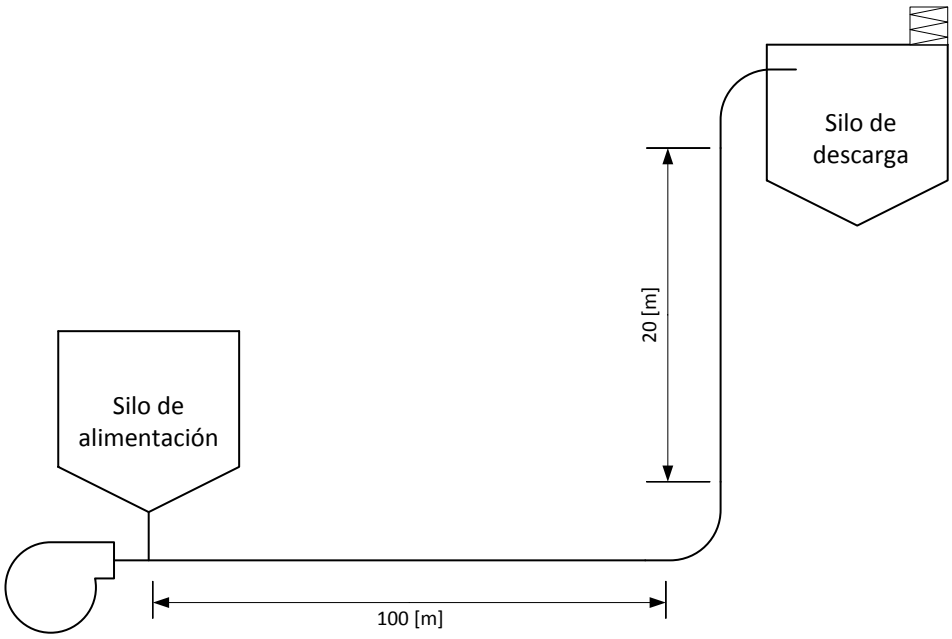


Figura 9: Representación esquemática de la configuración para ejemplo 1

Los resultados obtenidos mediante el modelo y su comparación con lo obtenido por Klinzing se muestran en la Figura 10 y Tabla 2.

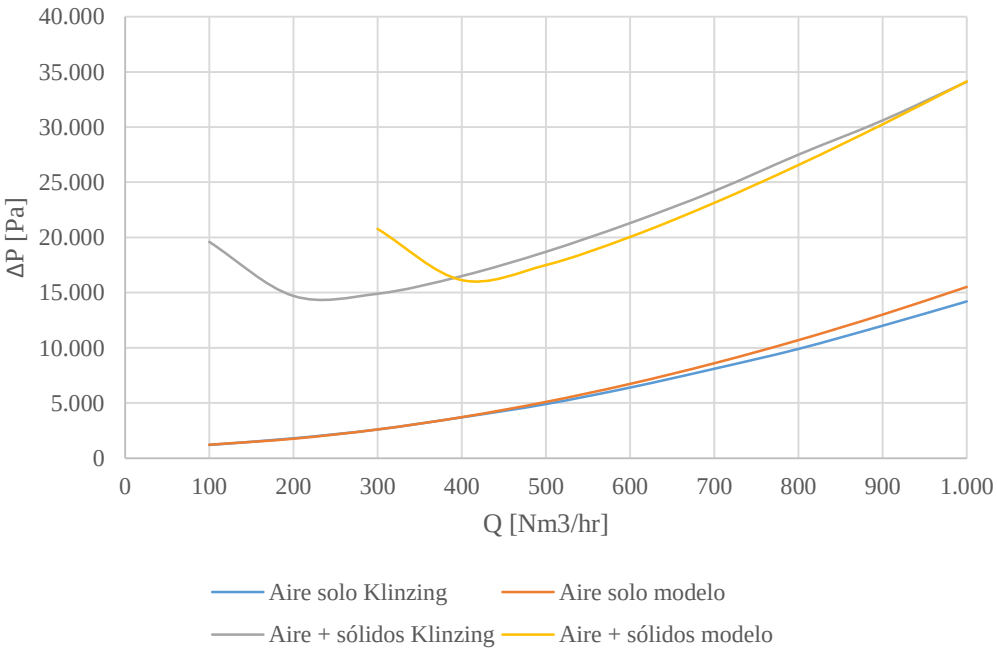


Figura 10: Comparación de resultados para ejemplo 1

Tabla 2: Comparación de resultados ejemplo 1.

Q	**ΔP aire [Pa]**		**ΔP sólidos [Pa]**	
[Nm^3/hr]	Klinzing	Modelo	Klinzing	Modelo
100	1.200	1.218	19.600	
200	1.800	1.763	14.700	
300	2.600	2.602	14.900	20.774
400	3.700	3.717	16.500	16.134
500	4.900	5.097	18.700	17.495
600	6.400	6.729	21.300	20.044
700	8.100	8.599	24.200	23.132
800	9.900	10.696	27.500	26.561
900	12.000	13.005	30.600	30.244
1.000	14.200	15.514	34.100	34.133

En el caso particular del aire solo, se observa que las curvas correspondientes a lo publicado por Klinzing y lo obtenido por el modelo, se comportan de forma similar, con errores dentro del rango testeado menores al 10%. En estos casos, la diferencia se debe probablemente al valor del factor K de pérdidas para accesorios o la rugosidad de la tubería.

Para la curva que presenta el flujo de sólidos, los dos primeros valores calculados por el modelo no aparecen debido a que no se obtuvieron resultados razonables, mientras que en el tercer valor, el error porcentual es de alrededor de un 40%. Estas diferencias se explican considerando que el modelo construido está pensado para sistemas de fase diluida y en zonas estables de operación, por sobre el punto de desprendimiento y depositación. Para flujos de aire por sobre esta zona, los errores se reducen considerablemente, siendo todos menores al 7%.

Para la caída de presión con flujo de sólidos, se utilizó un factor K_{sh} de 0,32 y K_{sv} de 0,27, valor calculado por el programa mediante las correlaciones (17) y (21).

4.4.2 Ejemplo 2: Transporte neumático de cenizas (Wypych)

El sistema de transporte neumático ensayado de aproximadamente 170 [m] de largo con cañería de 69 [mm] I.D se muestra esquemáticamente en la Figura 11. La especificación del material, parámetros de operación y condiciones de borde se resumen en la Tabla 3.

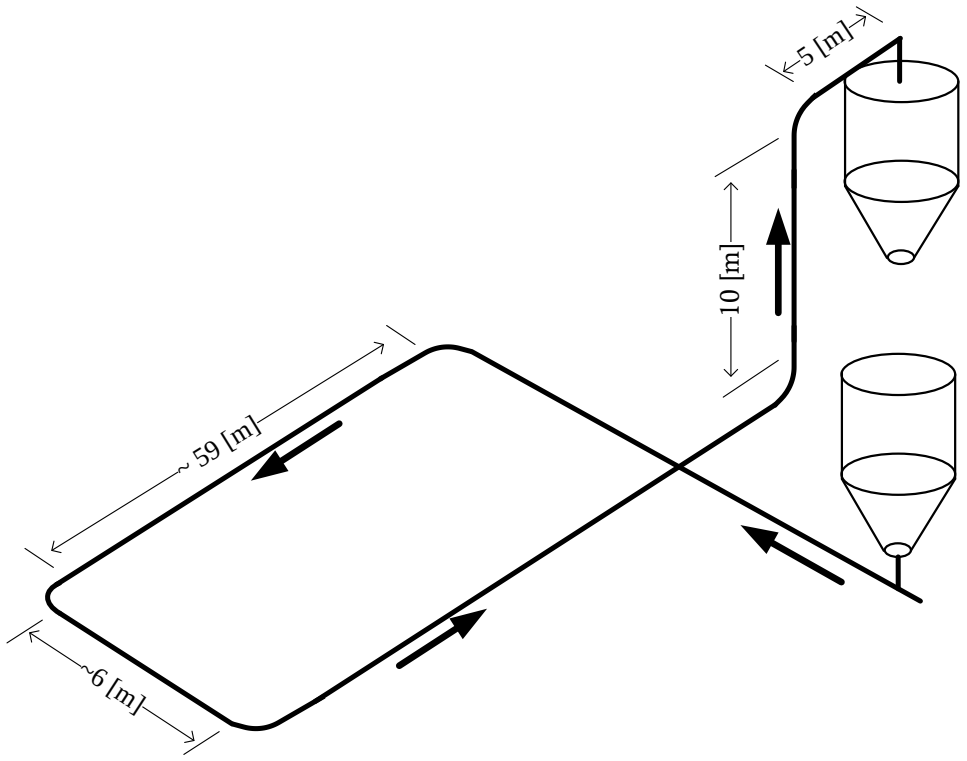


Figura 11: Representación esquemática de la configuración para ejemplo 2.

Tabla 3: Características del material, parámetros y condiciones para ejemplo 2.

Características del material	
Material	Cenizas
Densidad de partícula	2197 [kg/m^3]
Tamaño de partícula	0,017 [mm]
Parámetros de operación	
Flujo de sólidos	7,2 [ton/hr]
Caudal de aire	215-1108 [Nm^3/hr]
Condiciones de borde	
Elevación del sistema	0 m.s.n.m.
Temperatura del gas	20 [°C]
Gas de transporte	Aire
Caida presión filtro	1000 [Pa]

Los resultados obtenidos por el modelo y su comparación con los datos originales de Wypych se muestran a continuación en la Figura 12 y Tabla 4.

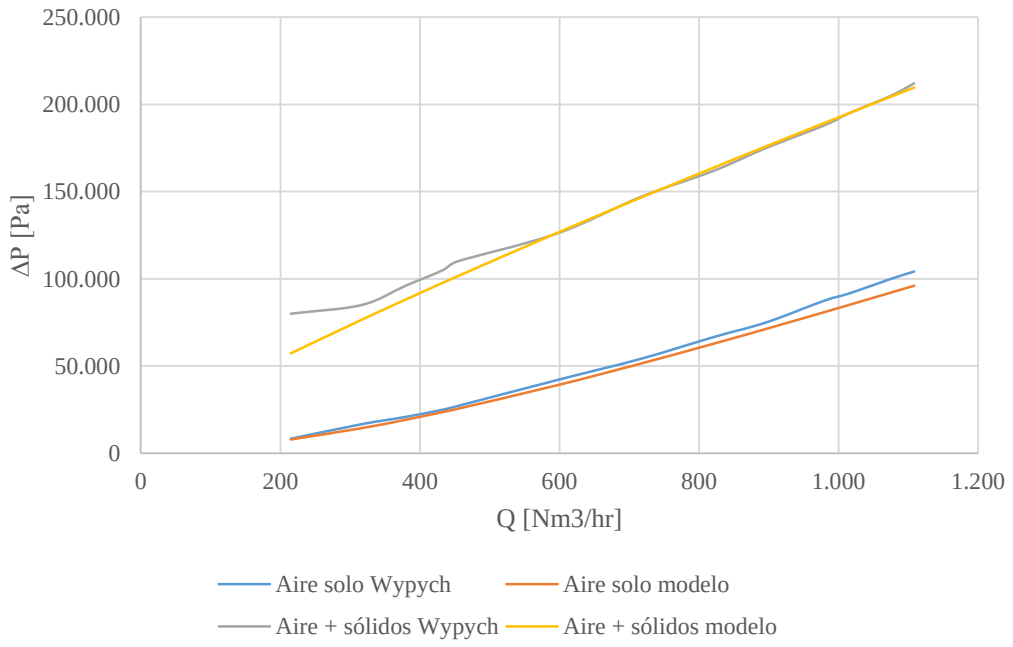


Figura 12: Comparación de resultados para ejemplo 2.

Tabla 4: Comparación de resultados ejemplo 2.

Q	**ΔP Aire solo [Pa]**		**ΔP Aire + sólidos [Pa]**	
[Nm^3/hr]	Wypych	Modelo	Wypych	Modelo
215	8.333	7.888	80.000	57.300
317	16.666	14.410	85.000	76.539
379	20.833	19.190	96.000	88.075
433	25.000	23.667	105.000	97.770
454	27.083	25.492	110.000	101.494
597	42.000	38.999	126.000	126.363
717	54.166	51.439	147.000	146.590
822	66.666	62.866	162.000	163.818
896	75.000	71.286	175.000	175.932
980	87.500	80.919	188.000	189.335
1.016	91.666	85.104	195.000	195.031
1.076	100.000	92.142	205.000	204.464
1.108	104.166	96.044	212.000	209.623

Tal como se observa en el gráfico, para el caso del aire solo la curva obtenida mediante el programa se comporta de manera muy similar a los valores de referencia de Wypych, con un error promedio de 5,7%.

Para el caso con flujo de sólidos, se utilizó un valor de K_{sh} calculado de manera de minimizar el error. Usando K_{sh} = 0,27 y K_{sv} = 0,15 se obtiene una curva modelada por el programa considerablemente parecida a la curva obtenida con los valores suministrados por Wypych. Nuevamente, y al igual que en el ejemplo anterior, sin considerar la zona inestable de operación, los valores son satisfactorios y cercanos a lo esperable en la zona estable. El error promedio en esta zona alcanza sólo al 5%.

4.4.3 Ejemplo 3: Transporte neumático de cenizas (Wypych)

Al igual que el ejemplo anterior, se trata de un sistema de transporte neumático de presión positiva con cenizas, de 553 [m] de largo y con cañería de 69 [mm] I.D

mostrado en la Figura 13 . La especificación del material, parámetros de operación y condiciones de borde se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5: Características del material, parámetros y condiciones para ejemplo 3.

Características del material	
Material	Cenizas
Densidad de partícula	2197 [kg/m^3]
Tamaño de partícula	0,017 [mm]
Parámetros de operación	
Flujo de sólidos	5,148 [ton/hr]
Caudal de aire	173-932 [Nm^3/hr]
Condiciones de borde	
Elevación del sistema	0 m.s.n.m.
Temperatura del gas	20 [°C]
Gas de transporte	Aire
Caída presión filtro	1500 [Pa]

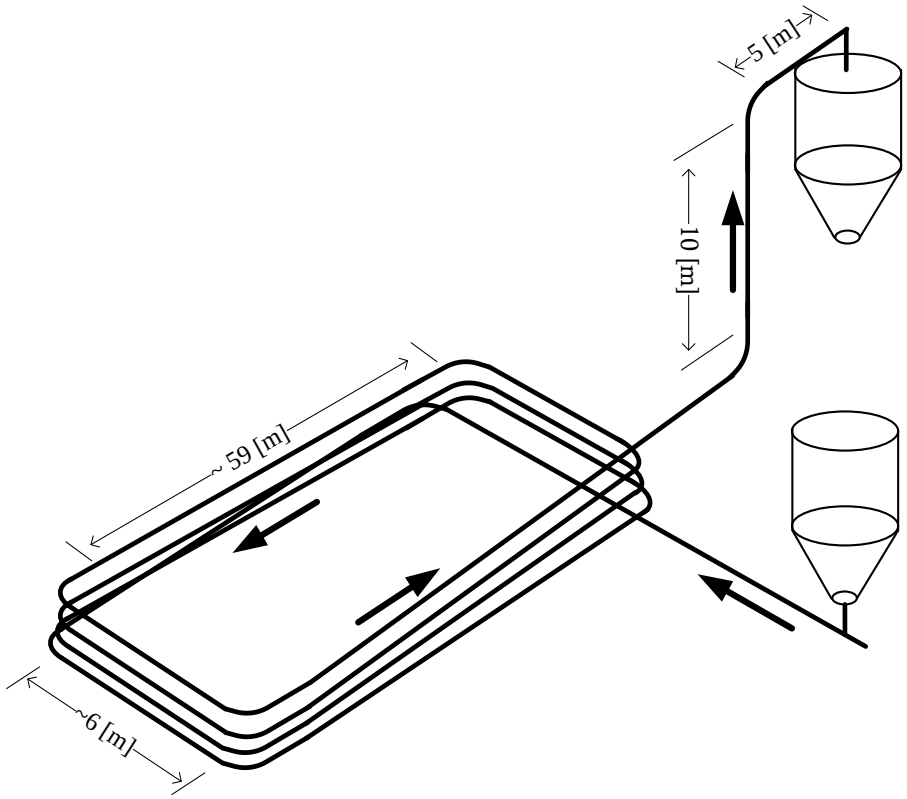


Figura 13: Representación esquemática de la configuración para ejemplo 3.

Los resultados obtenidos, tanto para el flujo con y sin presencia de sólidos, se muestran en la Figura 14 y Tabla 6.

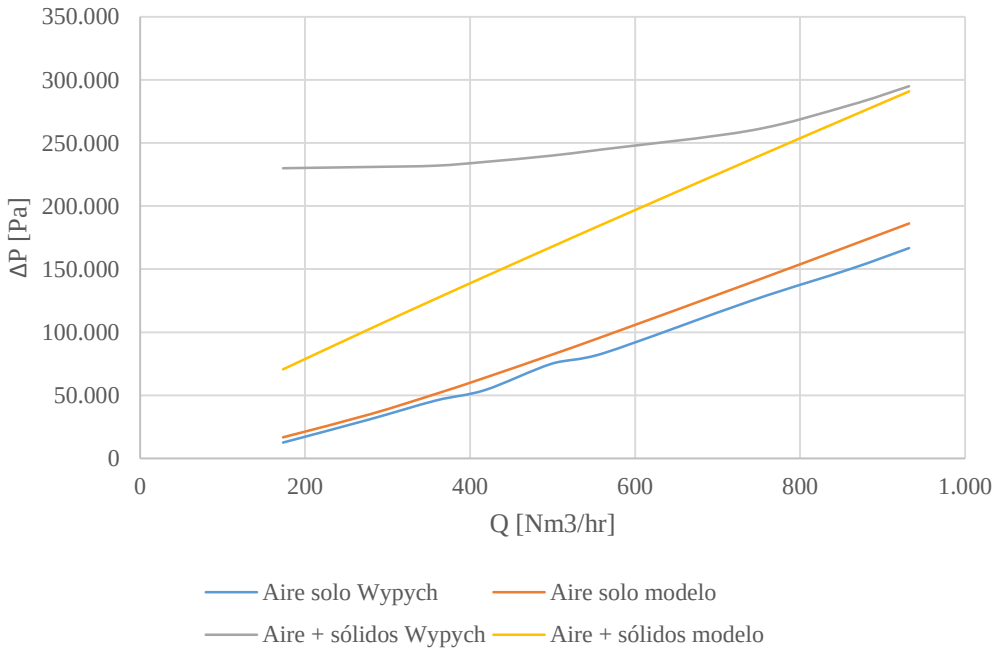


Figura 14: Comparación de resultados para ejemplo 3.

Tabla 6: Comparación de resultados para ejemplo 3.

Q	**ΔP Aire solo [Pa]**		**ΔP Aire + sólidos [Pa]**	
[Nm^3/hr]	Wypych	Modelo	Wypych	Modelo
173	12.500	16.664	230.000	70.580
278	30.833	34.779	231.000	102.443
359	45.833	51.062	232.000	126.526
418	54.166	63.954	235.000	144.143
499	75.000	82.119	240.000	167.684
562	83.333	96.675	245.000	185.830
741	125.000	139.492	260.000	237.046
860	150.000	168.600	280.000	270.763
932	166.666	186.176	295.000	290.857

En el caso del flujo de aire sin presencia de sólidos, se tiene una buena similitud entre la curva obtenida de los datos de Wypych y la curva arrojada por el modelo, al

igual que en los dos ejemplos anteriores, por lo que no se necesita mayor análisis, con un error promedio de 15,2%.

Para el caso con flujo de sólidos, los primeros valores calculados distan considerablemente de los de referencia, debido a que se está en una zona de bajo caudal de aire, y por lo tanto de inestabilidad. A medida que se aumenta el flujo de aire y el gráfico se desplaza más hacia una zona estable de fase diluida, se puede notar cómo la curva de valores calculados va tomando la misma forma que la curva de referencia. Para esto se utilizó un valor de 0,17 para el factor K_{sh} y 0,15 para el factor K_{sv}.

5 Experimental

Otra alternativa para calibrar el modelo es mediante ensayos de laboratorio propios. Mediante un procedimiento secuencial, se puede determinar la caída de presión para cada componente individual, procedimiento que se explicará en mayor detalle a continuación.

La fase experimental de este trabajo consta del diseño, montaje y operación de un sistema de transporte neumático de presión positiva, con cañerías de acrílico de 44 [mm] I.D., para el cual se ensayaron seis configuraciones en el orden que se describe a continuación:

1. Tramo horizontal de 4,2 [m]
2. Tramo horizontal de 4,2 [m] + tramo horizontal de 2 [m] adicional
3. Tramo horizontal de 6,2 [m] + curva + tramo horizontal de 2[m]
4. Tramo horizontal de 6,2 [m] + codo + tramo horizontal de 2 [m]
5. Tramo horizontal de 6,2 [m] + curva + tramo vertical de 2 [m]
6. Tramo horizontal de 6,2 [m] + codo + tramo vertical de 2 [m]

La razón por la cual los ensayos obedecen a esta lógica es la siguiente: Al medir la caída de presión para una configuración a un caudal de aire determinado, y luego medirla en la configuración siguiente al mismo caudal, ocasionará que la diferencia entre ambas lecturas, sea el aporte individual a la caída de presión del elemento extra que se sumó de una configuración a otra.

Por ejemplo, se obtiene una caída de presión total del sistema de X [Pa] para la configuración 1 a un flujo de Y [Nm3/hr] de aire, luego para la configuración 2, para el mismo flujo Y [Nm3/hr] de aire, se obtiene una caída de presión total de X+Z [Pa]. Entonces, el tramo de 2 [m] que se agregó entre una configuración y otra ocasionará una caída de presión adicional de Z [Pa].

El objetivo del procedimiento anteriormente descrito es comparar la caída de presión individual obtenida experimentalmente de esta forma, con el valor obtenido

mediante el modelo, con el fin de ajustar los parámetros K_{sh}, K_{sv} y k (codo y curva) usados por el programa.

5.1 Procedimiento experimental

El siguiente procedimiento se utilizó para cada una de las seis configuraciones. En cada una de ellas, la primera curva corresponde a aire solo, y las 3 siguientes a flujo bifásico.

La curva de aire solo consta de aproximadamente 20 puntos, abarcando el mayor rango posible de caudal de aire.

En el caso de las tres curvas restantes, el flujo de sólidos fue controlado mediante 3 placas orificio debidamente calibradas con anterioridad (15, 18 y 20 [mm]), ubicadas entre el silo y el punto de alimentación del sistema. Para cada curva se llevaron a cabo dos mediciones independientes de 10 puntos cada una. Si estas resultaban notoriamente distintas, se procedía a realizar una tercera medición para determinar cuál de las dos anteriores resultó más fidedigna.

La Figura 15 muestra un esquema del sistema de transporte neumático utilizado, y las Figuras 16, 17 y 18 los principales equipos implementados en el laboratorio.

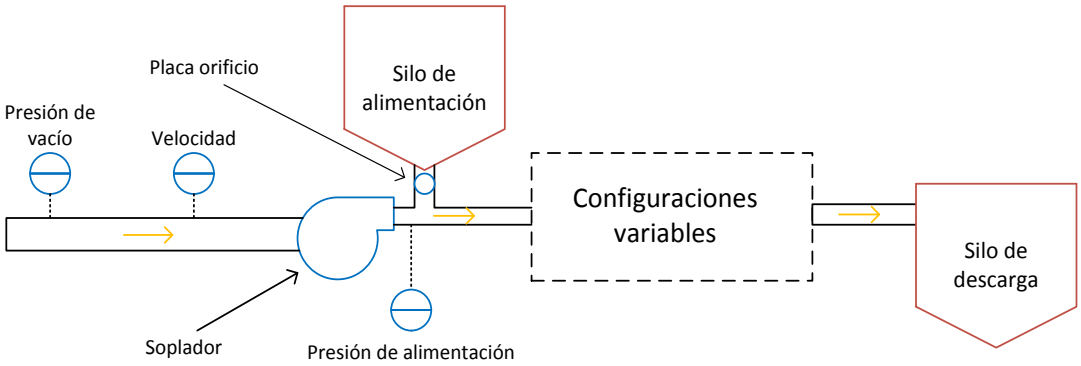


Figura 15: Representación esquemática del banco de ensayos usado en laboratorio.

Figura 16: Soplador utilizado en el sistema de transporte neumático construido.

Figura 17: Tubo de pitot, silo y tramo de tubería horizontal.

Figura 18: Soplador, silo y segmento de tubería horizontal.

5.1.1 Medición del flujo másico

Como se mencionó anteriormente, el flujo másico del sistema fue controlado mediante 3 placas orificio, las cuales fueron calibradas con anterioridad a la realización de los ensayos. Para esto se midió la cantidad (en masa) que logró descargar el silo de forma directa a un recipiente durante un período de tiempo determinado, para luego determinar en una balanza electrónica el peso. Para cada placa se realizaron 7 mediciones, obteniendo así un promedio. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Medición de flujo másico con las tres placas orificio utilizadas.

n°	**15 [mm]** kg/min	**18 [mm]** kg/min	**20 [mm]** kg/min
1	1,879	3,026	3,676
2	1,921	2,986	3,656
3	1,919	3,023	3,689
4	1,925	2,988	3,644
5	1,930	3,008	3,686
6	1,858	3,000	3,674
7	1,806	2,909	3,644
Promedio	**1,891**	**2,991**	**3,667**

Cabe destacar que si bien estas mediciones fueron hechas directamente desde la descarga del silo, sin pasar por el sistema de transporte neumático, el comportamiento de la descarga una vez conectado el silo a la tubería es considerablemente parecido si es que se realizan los ensayos en zonas de flujo estable. Esto se comprobó midiendo el flujo de sólidos para ciertos puntos distintos en la descarga del sistema neumático. Si bien el procedimiento más exacto sería el descrito en el último párrafo, se optó por calibrar las placas con anterioridad, y luego comprobar para algunos puntos representativos que ese flujo se cumpliera una vez conectado al sistema de tuberías, esto principalmente por un tema de tiempo y eficacia de los ensayos.

5.1.2 Características del material ensayado

El material con el cual se realizaron todos los ensayos experimentales de este trabajo correspondió a gritz de maíz, elección basada en la facilidad de manejo del material, no contando con propiedades nocivas para el medio ambiente ni la salud. Las características del material se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Características del material ensayado.

Nombre	Gritz de maíz
Densidad de partícula	1365 [kg/m^3]
Densidad aparente	750 [kg/m^3]
Tamaño máximo de partícula	2 [mm]
Tamaño medio de partícula	1,5 [mm]
Contenido de humedad	11,4%

5.1.3 Instrumentos de medición utilizados

Los instrumentos de medición utilizados se describen a continuación. Más detalles de las características de cada uno se puede encontrar en el Anexo 1.

- **Tubo de pitot:** Utilizado en la succión del soplador para obtener la presión de estancamiento, y con esta, determinar la velocidad del flujo en ese punto. El objetivo final de este procedimiento es obtener por continuidad el caudal en el sistema, que dado el tamaño reducido del sistema de transporte neumático, se desprecia la variación de la densidad del aire.
- **Manómetro 1:** Manómetro de mayor resolución y menor rango, utilizado en la sección de succión del soplador para establecer la presión de vacío que se genera en el ducto de entrada al sistema.
- **Manómetro 2:** Manómetro de menor resolución y mayor rango, posicionado antes del punto de alimentación de los sólidos, con el objetivo de medir la presión en ese punto, y por ende, la caída de presión total del sistema.
- **Manómetro 3:** Manómetro de menor resolución y mayor rango aún, posicionado antes del punto de alimentación de los sólidos, con el objetivo de medir la presión en ese punto, y por ende, la caída de presión total del sistema. Cabe destacar que la función es la misma que en el manómetro 2, la diferencia es que dependiendo la configuración a ensayar y las condiciones, se conecta uno o el otro dependiendo de los requerimientos.

- **Balanza electrónica:** Utilizada para medir el flujo másico de las placas orificio puestas en la descarga del silo.
- **Cronómetro:** Utilizado para medir el tiempo de descarga de material para cada placa orificio.

5.2 Equipos principales

Los siguientes equipos y elementos se utilizaron para construir y operar el sistema de transporte neumático utilizado en la fase experimental.

- **Soplador:**
  - Caudal: 175 [m3/hr] máx.
  - Marca: Gardner Denver
  - Presión: 130 [mbar]
- **Silos:**
  - Volumen silo 1: 0,054 [m^3]
  - Volumen silo 2: 0,047 [m^3]
  - Volumen silo 3: 0,055 [m^3]
- **Cañerías:**
  - Material: Acrílico
  - I.D.: 44 [mm]
- **Filtro:**
  - Material: Papel
- **Curva:**
  - Radio de curvatura: 0,15 [m]
  - Material: PVC
  - I.D.: 44 [mm]
- **Codo:**
  - Radio de curvatura: 0,03 [m]
  - Material: PVC
  - I.D.: 44 [mm]

6 Resultados

Las Figuras 19, 20, 21, 22, 23 y 24 muestran los diagramas de estado obtenidos para las seis configuraciones ensayadas.

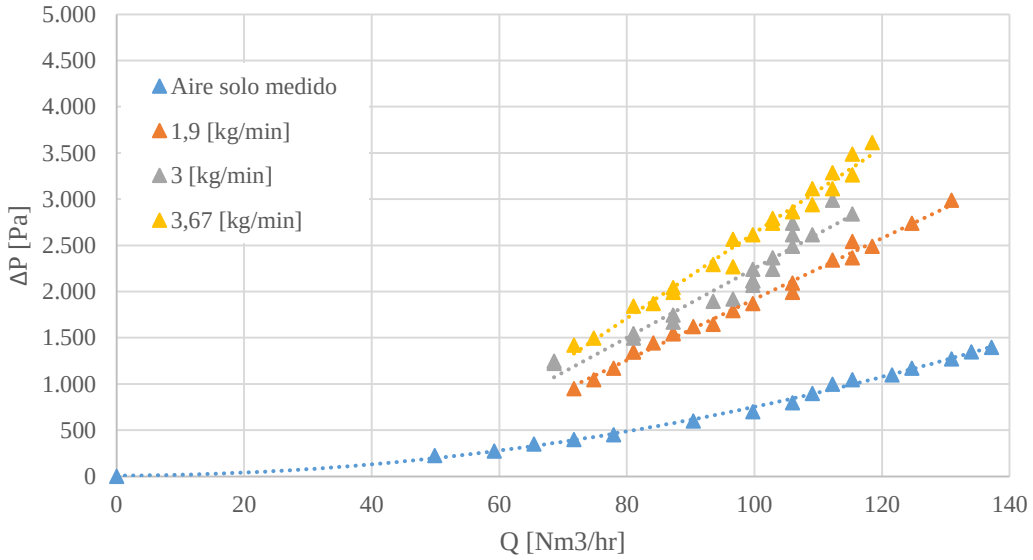


Figura 19: Diagrama de estado para configuración 1.

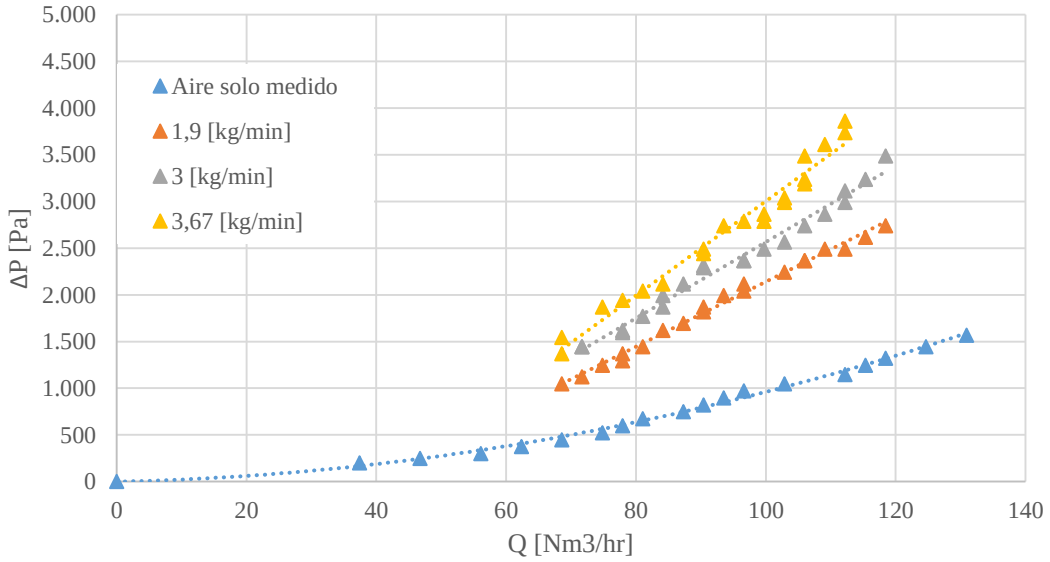


Figura 20: Diagrama de estado para configuración 2.

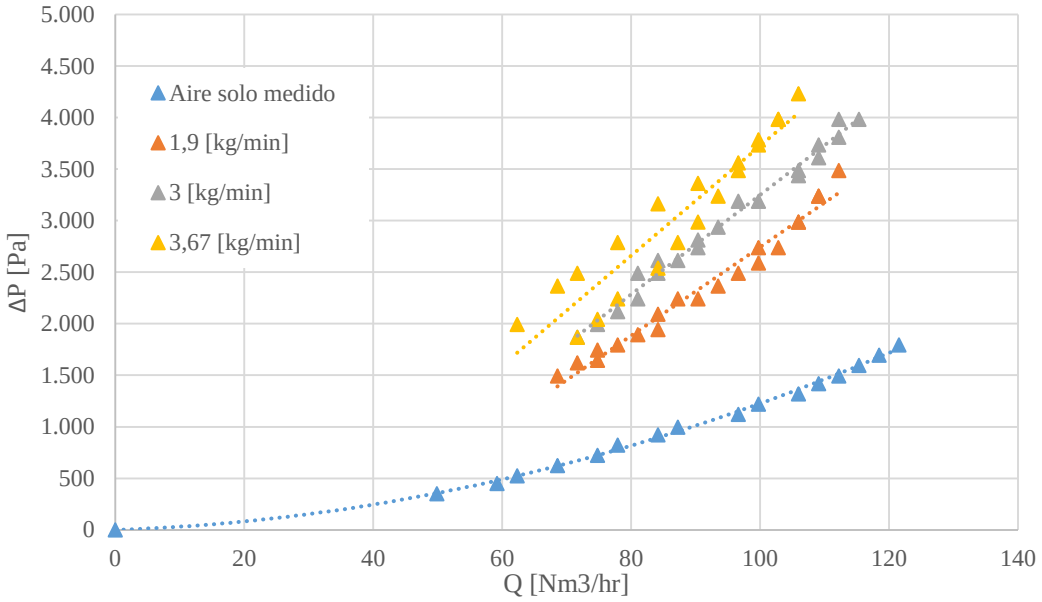


Figura 21: Diagrama de estado para configuración 3.

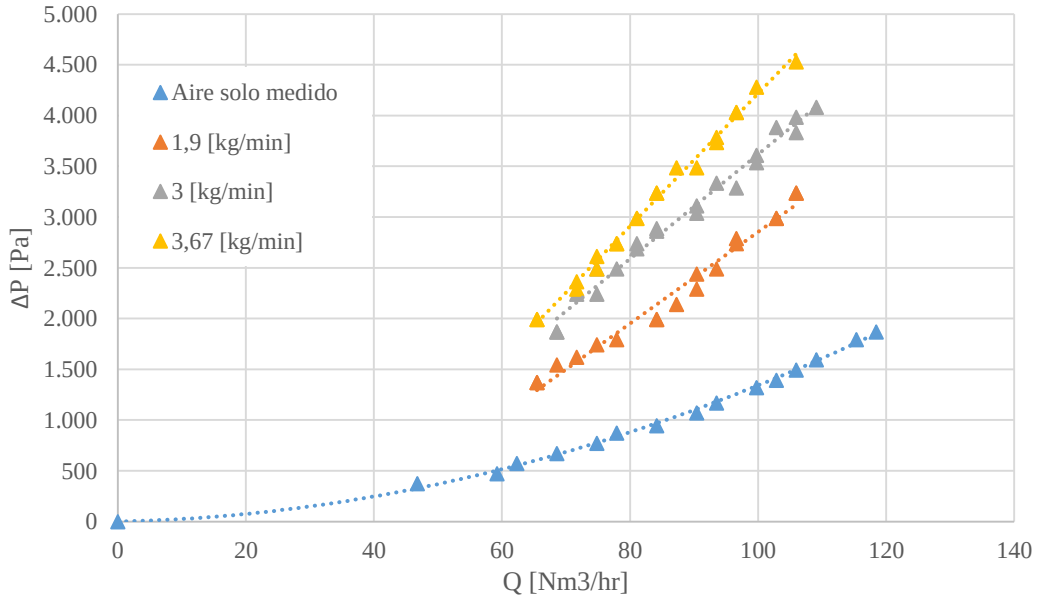


Figura 22: Diagrama de estado para configuración 4.

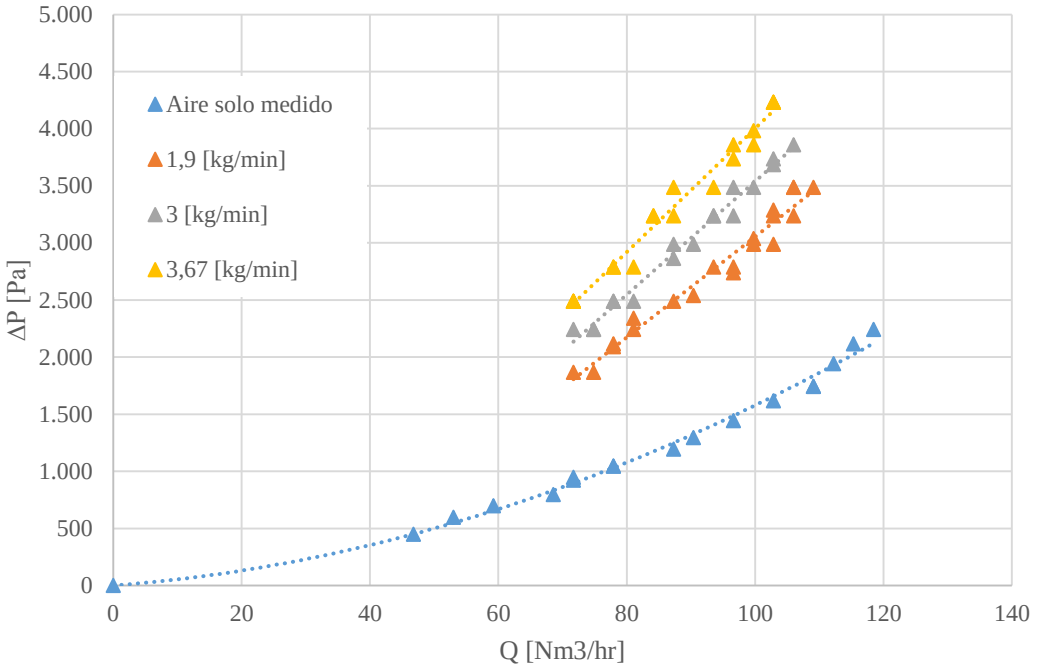


Figura 23: Diagrama de estado para configuración 5.

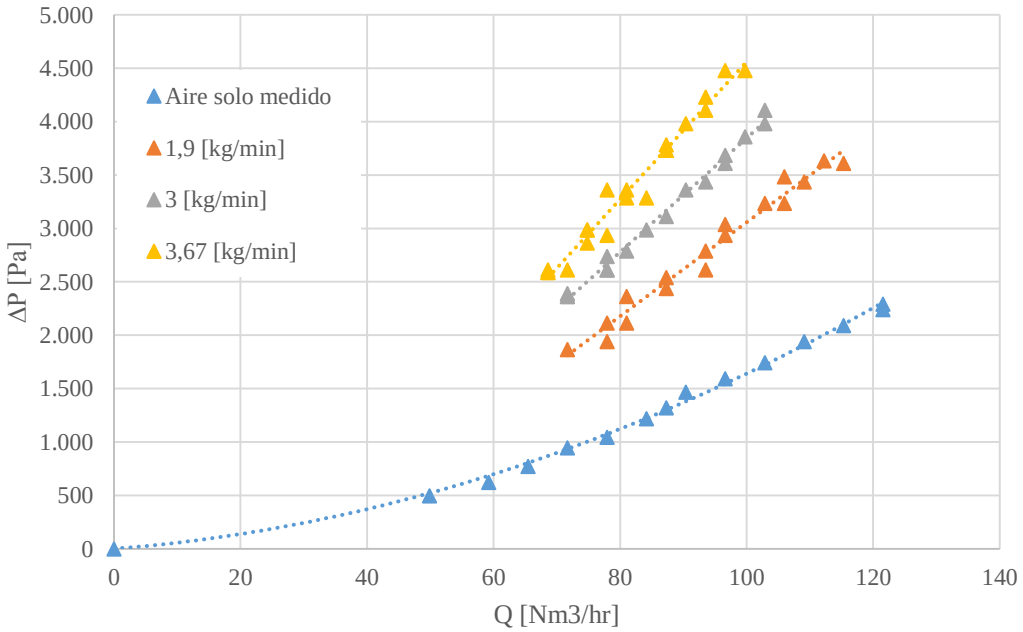


Figura 24: Diagrama de estado para configuración 6.

7 Análisis de resultados

Para lograr establecer los coeficientes, constantes y factores relevantes en el cálculo de la caída de presión para los componentes individuales, se presentan graficamente los puntos calculados mediante el modelo en función de los puntos medidos. Para este análisis en particular, los puntos medidos corresponden a los valores que toma la curva de ajuste de los puntos presentados en el apartado anterior de resultados. Para cada configuración, el primer gráfico corresponde al caso de aire solo, y el segundo, a los tres casos con presencia de sólidos. Se presenta un análisis para cada tramo componente estudiado. El procedimiento utilizado fue el siguiente: Con los valores medidos se construyeron líneas de tendencia para ajustar los resultados obtenidos, las que luego fueron evaluadas en distintos caudales y comparadas entre configuraciones.

7.1 Tramo horizontal

En la Figura 25 se muestran los puntos calculados para un tramo horizontal en función de los puntos medidos para el caso de aire solo.

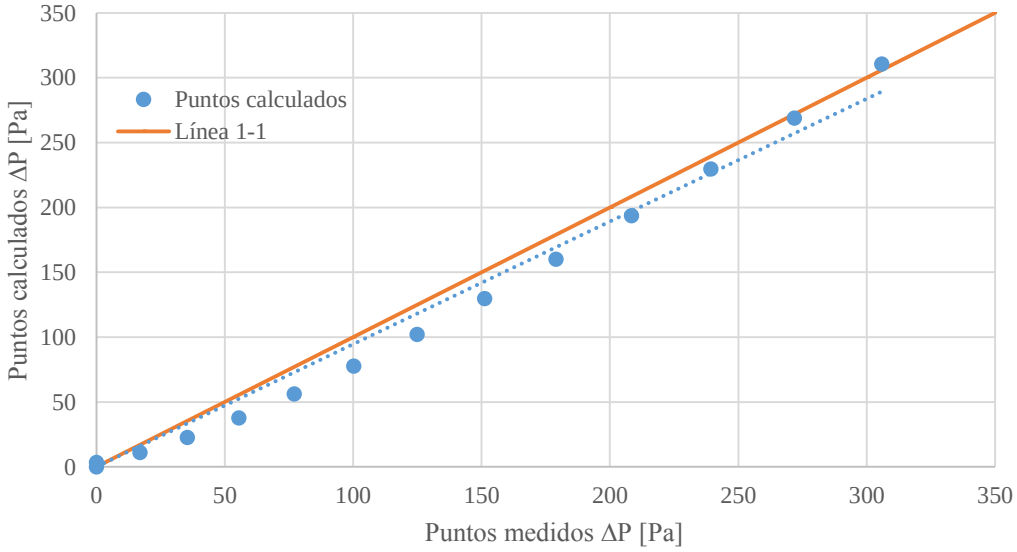


Figura 25: Análisis para aire solo en tramo horizontal.

Tal como se observa, la pendiente de la curva de puntos calculados en comparación con la recta de referencia presenta un error de 5,4%, encontrándose dentro de un margen más que aceptable, por lo que no se procede a hacer ningún ajuste para el cálculo de la caída de presión en tramos horizontales para aire solo.

A continuación, se presentan los puntos calculados en función de los puntos medidos para los tres casos con presencia de sólidos, con el objetivo de ajustar el valor de K_{sh}. Como se puede notar en la Figura 26, la pendiente de la recta de puntos calculados está bajo la línea de referencia 1-1, por lo que es necesario aumentar el coeficiente K_{sh}, pasando de un valor inicial de 0,39 a un valor final de 0,42. Con esto, el error se reduce a menos de un 1%.

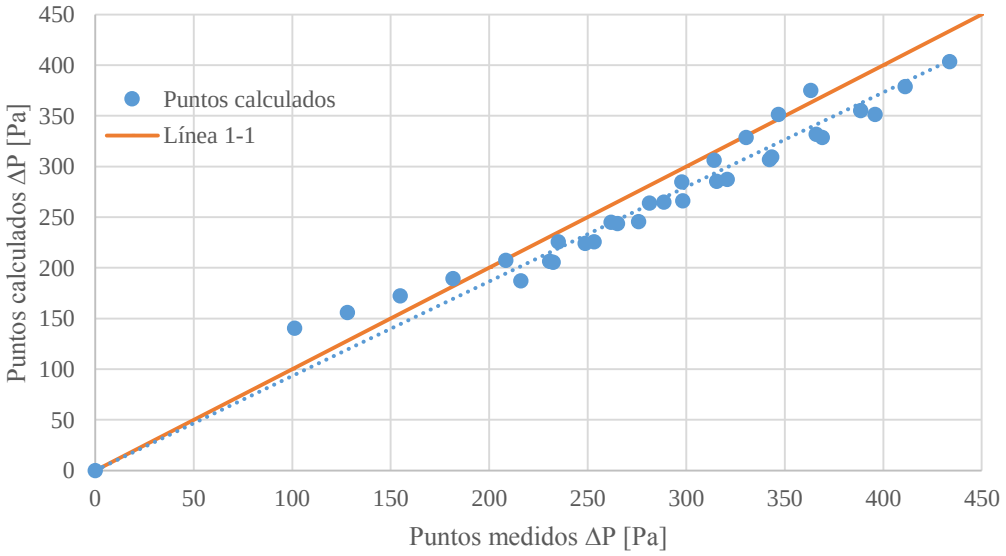


Figura 26: Análisis para flujo con presencia de sólidos en tramo horizontal.

7.2 Curva

En la Figura 27 se muestran los puntos calculados para la curva ensayada en función de los puntos medidos para el caso de aire solo. Como se puede apreciar, los valores calculados mediante el modelo se encuentran por debajo de los valores medidos, aproximadamente un 20% respecto a la línea de referencia 1-1, por lo que es necesario aumentar en este mismo porcentaje los valores que entregue el modelo. Para este propósito, el factor k de pérdidas en curva, pasa desde 0,3 a 0,36 en el modelo.

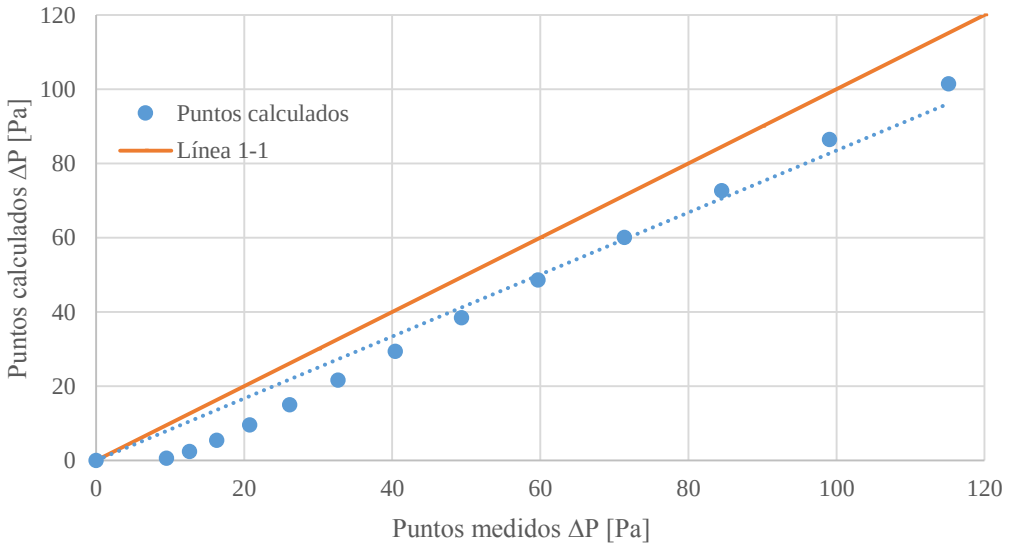


Figura 27: Análisis para aire solo en la curva de radio r = 0,15 [m].

A continuación, la Figura 28 muestra los puntos calculados en función de los puntos medidos para los tres casos con flujo de sólidos a través de la curva ensayada, aplicando en ellos los resultados obtenidos de los análisis anteriores (K_{sh} = 0,42 y k_{curva} = 0,36).

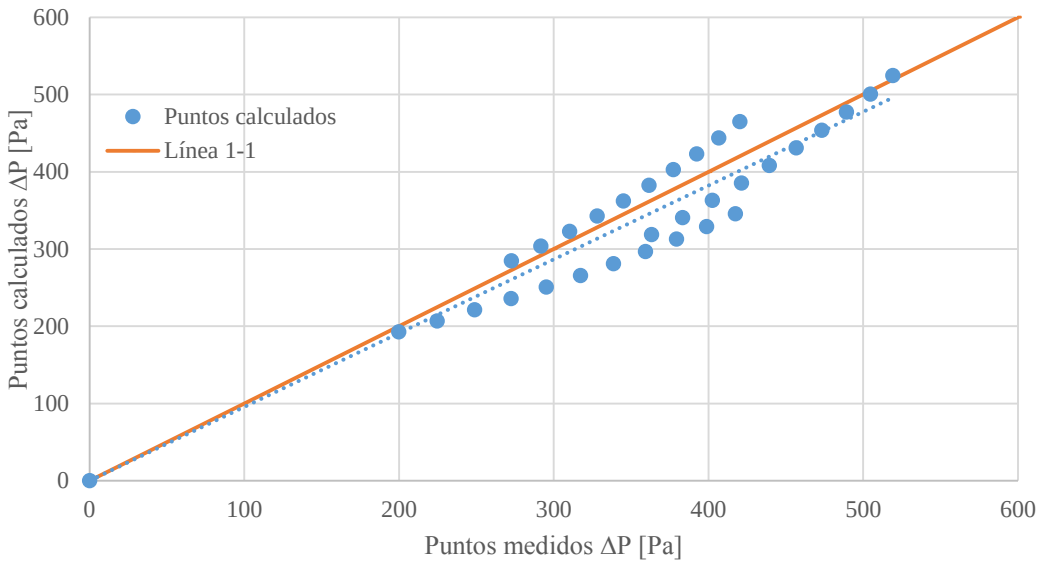


Figura 28: Análisis para flujo con presencia de sólidos en la curva ensayada.

Como se puede observar, respecto a la recta ideal de referencia (donde los puntos calculados son iguales a los puntos medidos) la recta real posee una pendiente menor, lo que significa que es necesario aumentar el valor del largo físico de la curva que se utiliza para calcular la pérdida por efecto de la fase sólida, pasando de $L_{físico}$ = 0,24 a $L_{físico}$ = 0.25.

7.3 Codo

En la Figura 29 se muestran los puntos calculados en función de los puntos medidos para aire solo en un codo, comparados con la recta de referencia. Tal como se observa en el gráfico, los valores calculados se encuentran por debajo de los medidos y deben aumentar en 21%. Para lograrlo, este porcentaje se incorpora en el factor k de pérdida en codos, aumentando desde 0,75 hasta 0,91.

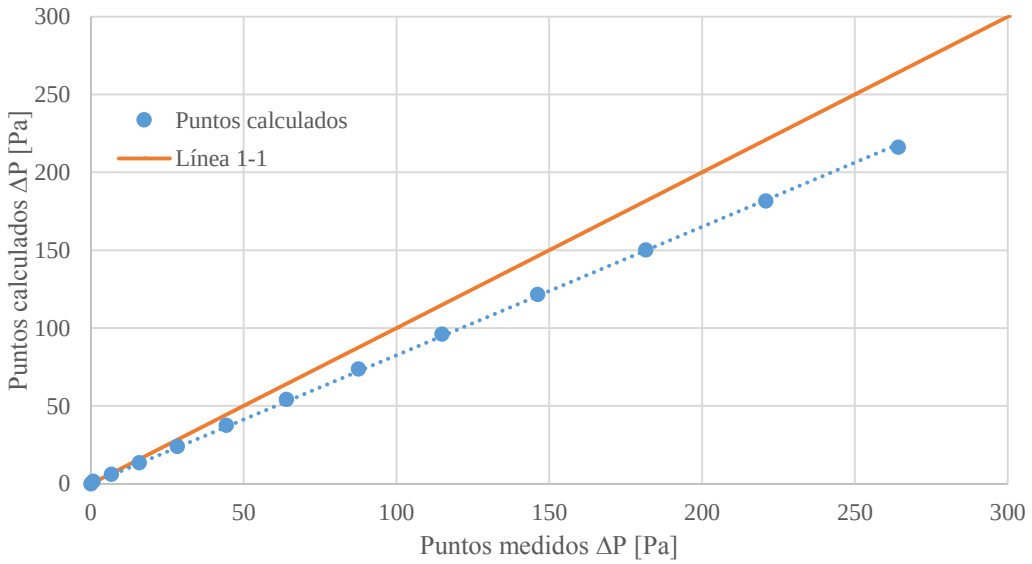


Figura 29: Análisis para aire solo en el codo utilizado.

La Figura 30 muestra los puntos calculados en función de los puntos medidos para los tres casos con flujo de sólidos en el codo utilizado, aplicando en ellos los resultados obtenidos de los análisis anteriores (K_{sh} = 0,42 y K_{codo} = 0,91).

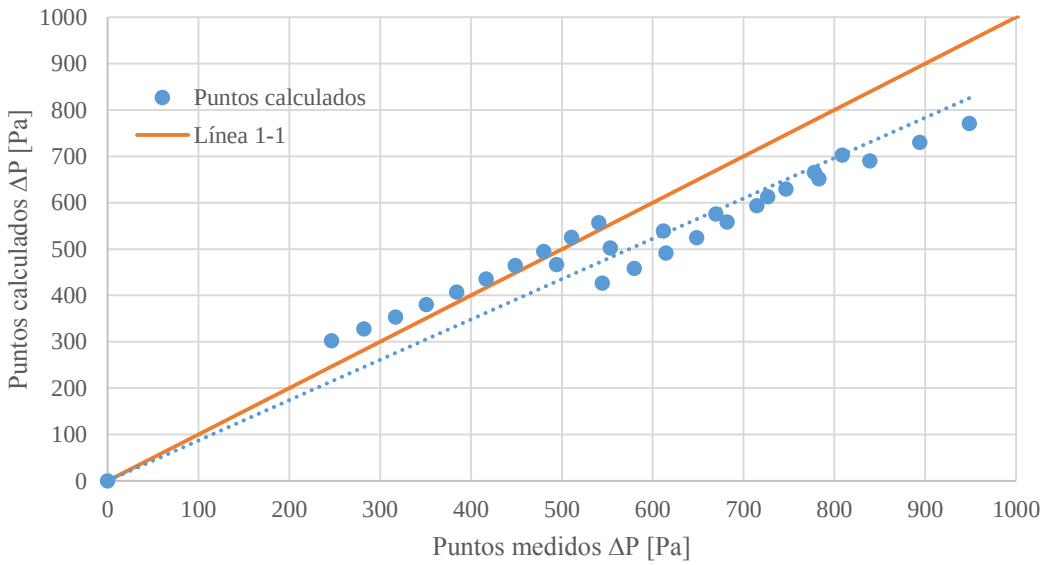


Figura 30: Análisis para flujo con presencia de sólidos en el codo utilizado.

Tal como se observa en el gráfico, al ajustar los puntos calculados mediante una línea de tendencia, los valores se encuentran por debajo de la recta ideal de referencia, por lo que los valores calculados vía modelo deben aumentar en un 15%. Para lograrlo, este porcentaje se le incorpora al valor del largo físico que se utiliza para calcular la pérdida por efecto de la fase sólida en el codo, aumentando este valor desde 0,031 [m] a 0,036 [m].

7.4 Tramo vertical posterior a curva

La Figura 31 muestra los valores calculados por el modelo para tramo vertical posterior a curva con aire solo en función de los valores medidos.

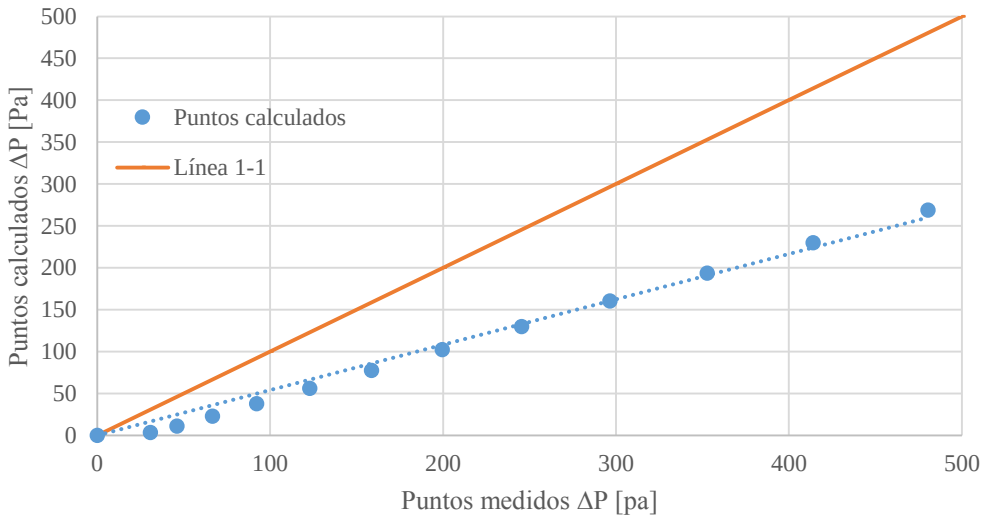


Figura 31: Análisis para aire solo en tramo vertical posterior a curva.

Se puede notar claramente lo distante que se encuentran los resultados calculados por el modelo respecto a los medidos, situación anómala, considerando que para efecto de aire solo, si el tramo es vertical u horizontal no es relevante, debido a que no se genera altura estática. Y si esto se compara con el análisis para tramo horizontal, se encuentra absolutamente lejano, con un error cercano al 50% en este caso contra un error en el aire de solo 5% para caso horizontal. En primera instancia, se establece que

la diferencia podría ser debida a efectos de difícil modelación, tal como uniones imperfectas entre las tuberías o en segundo caso, a errores propios de las mediciones en procesos experimentales. Debido a esto, se procede a realizar un ajuste para la diferencia en la caída de presión debido a efectos no modelables, que será denominado ΔP_{otros}, de la forma mostrada a continuación:

$$\Delta P_{otros} = k * \frac{{U_g}^2 * \rho_g}{2} \tag{36}$$

donde, para este caso particular, el factor k debe tomar un valor de 0,75 para ajustar de forma correcta la curva.

A continuación, la Figura 32 muestra los valores calculados vía modelo en función de los valores medidos para tramo vertical posterior a curva con presencia de sólidos.

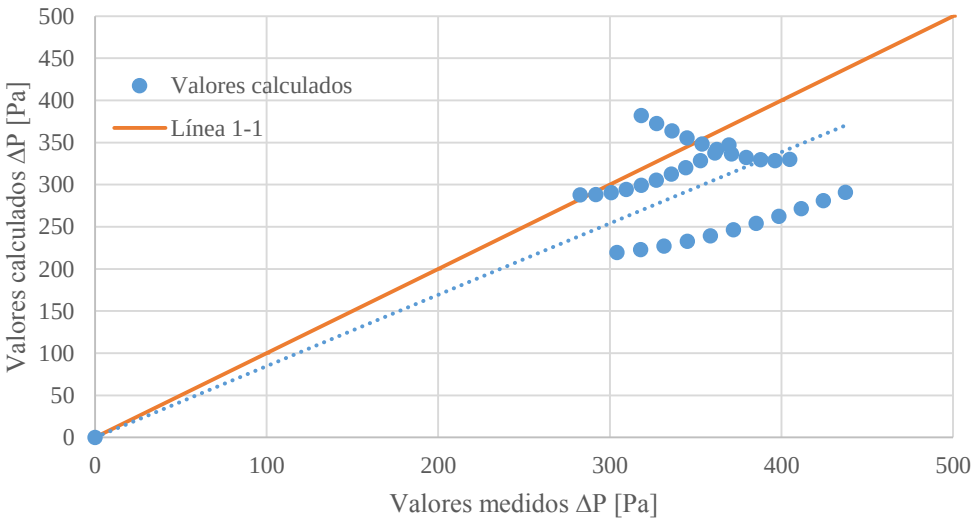


Figura 32: Análisis para flujo con presencia de sólidos en tramo vertical posterior a codo.

Aunque la línea de tendencia marca cierta similitud con la recta ideal de referencia, es sencillo notar que la distribución de los puntos no es del todo ordenada y

en algunos casos, dista bastante de la línea de tendencia misma, por lo que no se considera que los resultados marquen un buen precedente para ajustar el factor K_{sv}.

7.5 Tramo vertical posterior a codo

En la Figura 33 se muestran los puntos calculados en función de los puntos medidos para el flujo de aire solo en un tramo vertical posterior a un codo. Se espera que la línea de tendencia de los puntos calculados sea lo más similar a la recta ideal de referencia, donde los puntos calculados son iguales a los medidos.

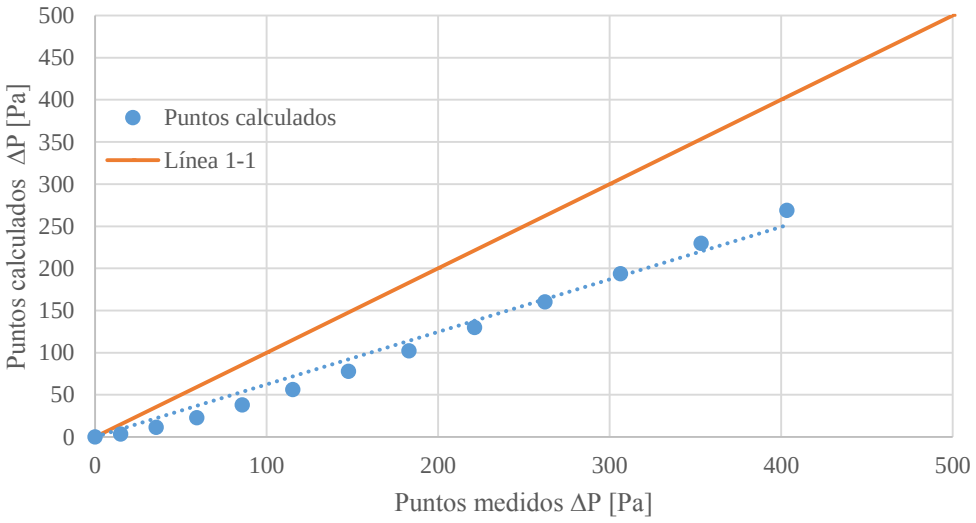


Figura 33: Análisis para aire solo en tramo vertical posterior a codo.

Evidentemente, y aún cuando la línea de tendencia de los puntos calculados se ve más cercana que para el caso anterior con aire solo, los valores calculados con el modelo se encuentran más lejanos de lo deseado con respecto a la recta ideal de referencia, mostrando un error de aproximadamente 38%. Al igual que en el caso anterior, la diferencia se puede deber, en primer lugar, a efectos difícilmente modelables, y en segundo, a errores propios de los procesos experimentales, por lo que se procede a ajustar los valores, sumándole una caída de presión ocasionada por todos los efectos no modelables, de la forma mostrada a continuación:

$$\Delta P_{otros} = k * \frac{{U_g}^2 * \rho_g}{2} \tag{37}$$

donde, el valor de k que ajusta mejor los puntos medidos, tiene un valor de 0,5.

En la Figura 34 se muestran los puntos calculados en función de los medidos, de la misma forma que en los análisis anteriores.

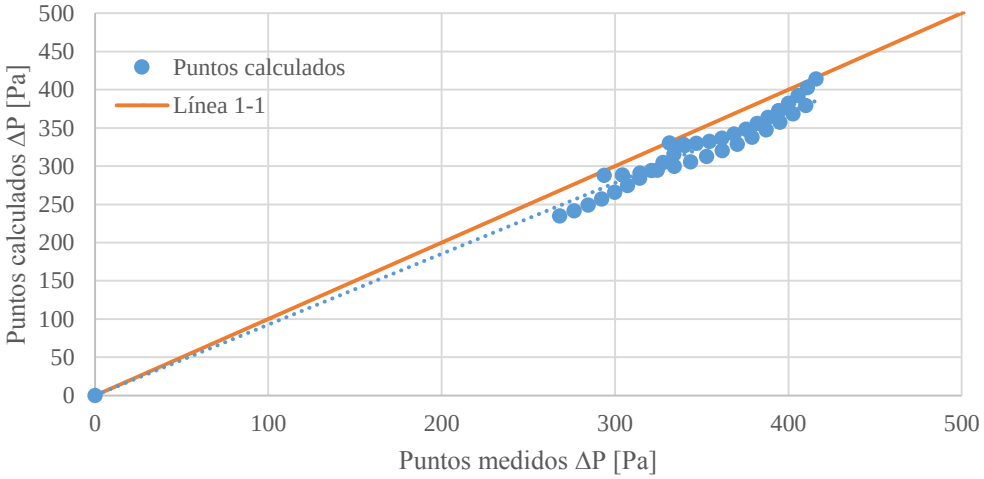


Figura 34: Análisis para flujo con presencia de sólidos en tramo vertical posterior a codo.

A diferencia del tramo vertical con flujo de sólidos posterior a curva, en este caso la línea de tendencia de los puntos calculados está considerablemente cercana a la recta ideal de referencia. Para que sean similares completamente, se procederá a aumentar el factor K_{sv} en un 8%, pasando de un valor calculado de 0,33 inicialmente a un valor final de 0,36. Finalmente, y dadas las diferencias existentes en el caso anterior (Tramo vertical posterior a curva), es que el valor de K_{sv} se ajusta finalmente tomando en consideración esta línea de tendencia.

7.6 Resumen general de resultados

A modo de resumen, en la Tabla 9 se presentan los valores ajustados y corregidos para las constantes que así lo requirieron, basado en la fase experimental de validación de los elementos individuales.

Tabla 9: Resumen del análisis de resultados.

Configuración	Factor	Valor inicial	Valor que mejor ajusta
Tramo horizontal	K_{sh}	0,39	0,42
Tramo vertical	K_{sv}	0,33	0,36
Curva	k $L_{físico}$	0,3 $L_{físico}$	0,36 1,05 * $L_{físico}$
Codo	k $L_{físico}$	0,75 $L_{físico}$	0,91 1,15 * $L_{físico}$

Del análisis se desprende que aunque los valores iniciales utilizados para cada uno de estos factores no fueron del todo exactos, las correcciones y los ajustes hechos arrojaron valores finales dentro de los rangos esperados, no aumentando ninguno de ellos más allá del 25% de su valor inicial.

Otro dato relevante que se obtiene del análisis para codos y curvas, es que la relación entre la pérdida de carga producida por una curva con flujo de sólidos y un codo con flujo de sólidos, fue de entre aproximadamente 1,5 y 2 veces. Es decir, la pérdida en un codo es entre 1,5 y 2 veces mayor a la pérdida de carga en una curva, variando este porcentaje en función del caudal de aire.

Es sumamente necesario destacar que para el caso de tubería vertical, el modelo no funcionó de la forma esperada, principalmente por la complejidad de los fenómenos físicos que suceden en zonas de aceleración posteriores a codos o curvas y la sencillez del modelo utilizado, por lo que si bien se obtuvo a partir de una de las figuras un valor para el coeficiente K_{sv}, se recomienda prestar más atención en futuros trabajos a los fenómenos ocurridos en tuberías verticales.

8 Conclusiones y recomendaciones

Al término del presente trabajo, son varios los conceptos e ideas que a modo de conclusión merecen ser destacados.

En primer lugar, en lo que al modelo mismo respecta, no son pocos los autores que han desarrollado relaciones para el cálculo de sistemas de transporte neumático, por lo que para cada uno de los distintos componentes que reconoce el programa, hay diversos modelos. La elección de los que finalmente fueron utilizados obedeció a diversos motivos, pero principalmente la sencillez de estos mismos y los trabajos previos de otros investigadores y alumnos memoristas que ya los habían puesto a prueba con buenos resultados. Después de todo, el objetivo principal de todo el trabajo es elaborar un modelo para el diseño de sistemas de transporte neumático, poniendo énfasis en la sencillez del modelo mismo.

Llegado el momento de probar el programa, esto se hizo en dos etapas, verificando primeramente con respecto a sistemas de largo considerable desarrollados por investigadores encontrados en la literatura, y luego respecto a un sistema propio ensayado en laboratorio, con el fin de validar el modelo a nivel de componentes individuales, ajustar algunas constantes relevantes y establecer los rangos óptimos de operación.

Los resultados de la comparación del modelo frente a los sistemas encontrados en la literatura fueron los esperados, todos con errores bajo el 10%, obteniendo un comportamiento muy similar en las zonas de fase diluida y flujo estable sin necesidad de realizar mayores modificaciones en el modelo, concluyendo de esta forma que el programa desarrollado es capaz de modelar correctamente la caída total de presión del sistema.

Durante la fase experimental, se midió la caída de presión de distintas configuraciones, y luego se contrastaron las diferencias entre ellas, para establecer así la caída de presión de cada elemento que se va agregando al sistema, y compararla con

la que el modelo predice. En este proceso, los primeros resultados mostraron cierto porcentaje de error, por lo que se procedió a ajustar los coeficientes K_{sh}, K_{sv}, k y $L_{físico}$ para curvas y codos.

Por lo tanto, el modelo funciona bien a nivel general, es decir, como predictor de la caída de presión total en sistemas de transporte neumático de fase diluida y flujo estable, y aunque existen diversas correlaciones empíricas de buen comportamiento para el cálculo de distintos elementos, siempre es conveniente ponerlas a prueba y corregirlas según lo que se obtenga del ensayo en laboratorio, con el fin de mejorarlas.

Cabe destacar que el trabajo experimental realizado, únicamente se enfocó en ensayos con gritz de maíz, por lo que si bien es posible concluir ciertos conceptos respecto a lo realizado, no alcanza para establecer una generalización. Por lo mismo, se abre la oportunidad de realizar trabajos similares pero con otros materiales de distintas características, considerando que mientras más información se obtenga en el amplio espectro de materiales sólidos a granel transportables, mejores serán las correlaciones y generalizaciones que se puedan hacer con el modelo.

Finalmente, se considera que los objetivos fueron cumplidos en forma satisfactoria, los resultados estuvieron en su mayoría en los rangos esperados (con errores menores al 10% en la fase de prueba con sistemas encontrados en literatura, y 15% para los resultados experimentales), y los que no, abren una oportunidad de seguir investigando, ensayando materiales y generando una base de datos cada vez más grande, que permita llegar a relaciones cada vez más certeras y confiables para el cálculo de sistemas de transporte neumático, campo en el cual queda mucho por hacer.

9 Referencias

1. **SHAMES, I.** *Mecánica de Fluidos.* 3a. s.l. : McGraw-Hill, 1995. pág. 335.

2. **CABREJOS, F.** *Transporte Neumático.* Valparaíso : Editorial USM, 2013. pág. 102.

3. **KLINZING, George E.** *Gas-Solid Transport.* s.l. : Mc-Graw Hill, 1981. pág. 103.

4. **KLINZING, G.E., y otros.** *Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical And Practical Approach.* 2. s.l. : Chapman & Hall book Co., 1997. pág. 110.

5. **KONNO, H. y SAITO, S.** *Pneumatic Conveying of Solids Through Straight Pipes.* s.l. : British Journal of Applied Physics, 1958. págs. 218-222. Vol. 9.

6. **MARCUS, R., y otros.** *Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach.* Londres : Chapman and Hall Book Co., 1990. págs. 58-60.

7. **SHAMES, I.** *Mecánica de Fluidos.* s.l. : McGraw Hill, 1995. pág. 329.

8. **GASTERSTADT, J.** *Die Experimentelle Untersuchung Des Pneumatischen Fordervorganges.* s.l. : VDI Zeitschrift, 1924. págs. 617-624. Vol. 68. 24.

9. **CABREJOS, F., y otros.** *Recent Developments in Pneumatic Conveying at the Universidad Técnica Federico Santa María.* Orlando : s.n., 2006.

10. **YANG, W.** *A correlation for Solid Friction Factor in Vertical Pneumatic Conveying Lines.* 1978.

11. **SCHUCHART, P.** *Widerstandsgesetze beim Pneumatischen Transport in Rohrkrümmern.* Berlin : Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Berlin, 1968.

12. **CABREJOS, F.** *Transporte Neumático.* Valparaíso : Editorial USM, 2013. pág. 167.

13. **SERGHIDES, T. K.** *Estimate Friction Factor Accurately.* s.l. : Chemical Engineering, 1984. págs. 63-64. Vol. 91.

14. **MILLER, A.** *Trabajo de Titulación para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico.* Valparaíso : Universidad Técnica Federico Santa María, 2009. pág. 18.

15. **CABREJOS, F. y KLINZING, G.** *Pickup and Saltation Mechanisms of Solid Particles in Horizontal Pneumatic Transport.* s.l. : Powder Technology, 1994. págs. 173-186. Vol. 79.

16. **SCHADE, B.** *Zum Ubergang Sprung-Strahnenforderung bei der Horizontalen Pneumatischen Festofforderung.* s.l. : Universitat Karlsruhe, 1987.

17. **CABREJOS, F.** *Transporte Neumático.* Valparaíso : Editorial USM, 2013. pág. 131.

18. **KLINZING, G.E., y otros.** *Pneumatic Conveying of Solids, a Theoretical and Practical Approach.* 3. Heidelberg : Springer, 2010.

19. **WYPYCH, P.** *Optimal Design of Long-Distance Pneumatic Conveying Pipelines Transporting Fly Ash and Other Related Products.* Wollongong : The University of Wollongong, 1990.

20. **CABREJOS, F.** *Experimental Investigation on the Fully Developed Pipe Flow of Dilute Gas-Solids Suspensions.* s.l. : University of Pittsburgh, 1994.

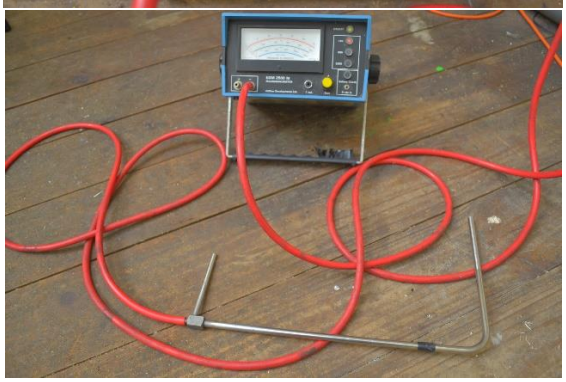
21. **TORRES, A.** *Modelación del Transporte Neumático y Validación de un Modelo Existente.* Valparaíso : Universidad Técnica Federico Santa María, 2006. págs. 59-61.

Anexo 1: Instrumentación

Se muestra a continuación la instrumentación utilizada en el proceso experimental del presente trabajo, con sus características relevantes e imágenes.

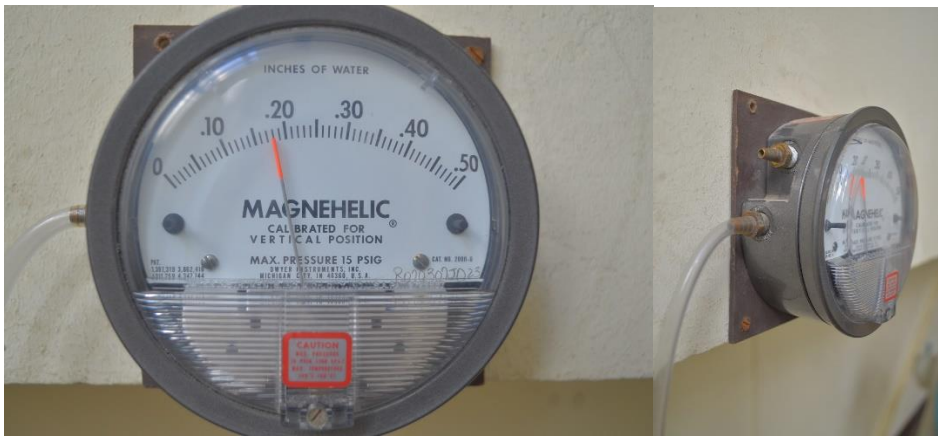
Tubo de Pitot

- Marca: Airflow Developments Ltd.
- Modelo: EDM 2500 M Micromanometer
- Rango: 0-2500 [Pa]; 0-30 [m/s]
- Resolución: 2 [Pa]; 0,5 [m/s]



Manómetro 1

- Marca: Dwyer Instruments
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0-0.5 [Inch] of water column
- Resolución: 0.01 [Inch] of water column

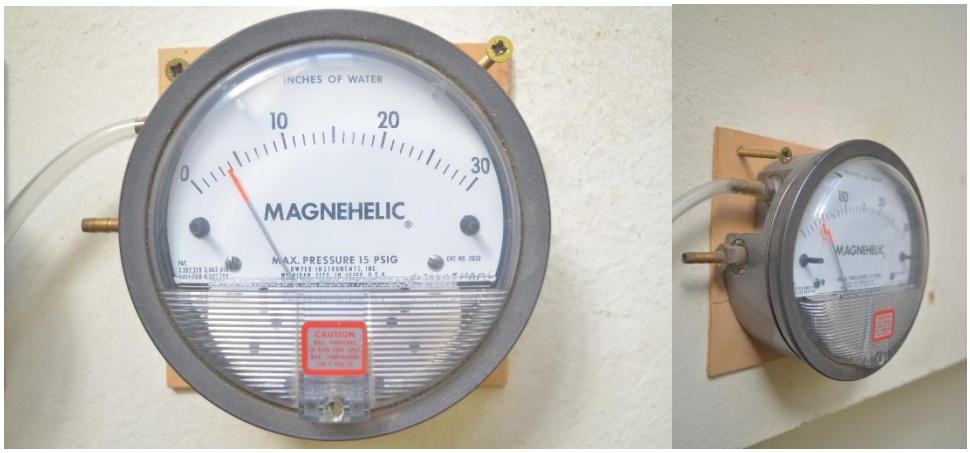


Manómetro 2

- Marca: Dwyer Instruments
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0-6 [Inch] of water column
- Resolución: 0,2 [Inch] of water column

Manómetro 3

- Marca: Dwyer Instruments
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0-30 [Inch] of water column
- Resolución: 1 [Inch] of water column



Balanza electrónica

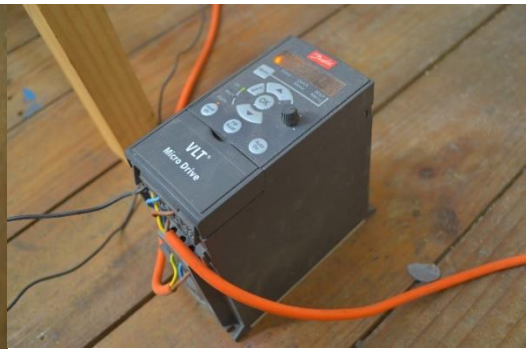
- Marca: FWE
- Modelo: Precision Electronic Weighing
- Rango: 0-6000 [g]
- Resolución: 0.1 [g]

Cronómetro

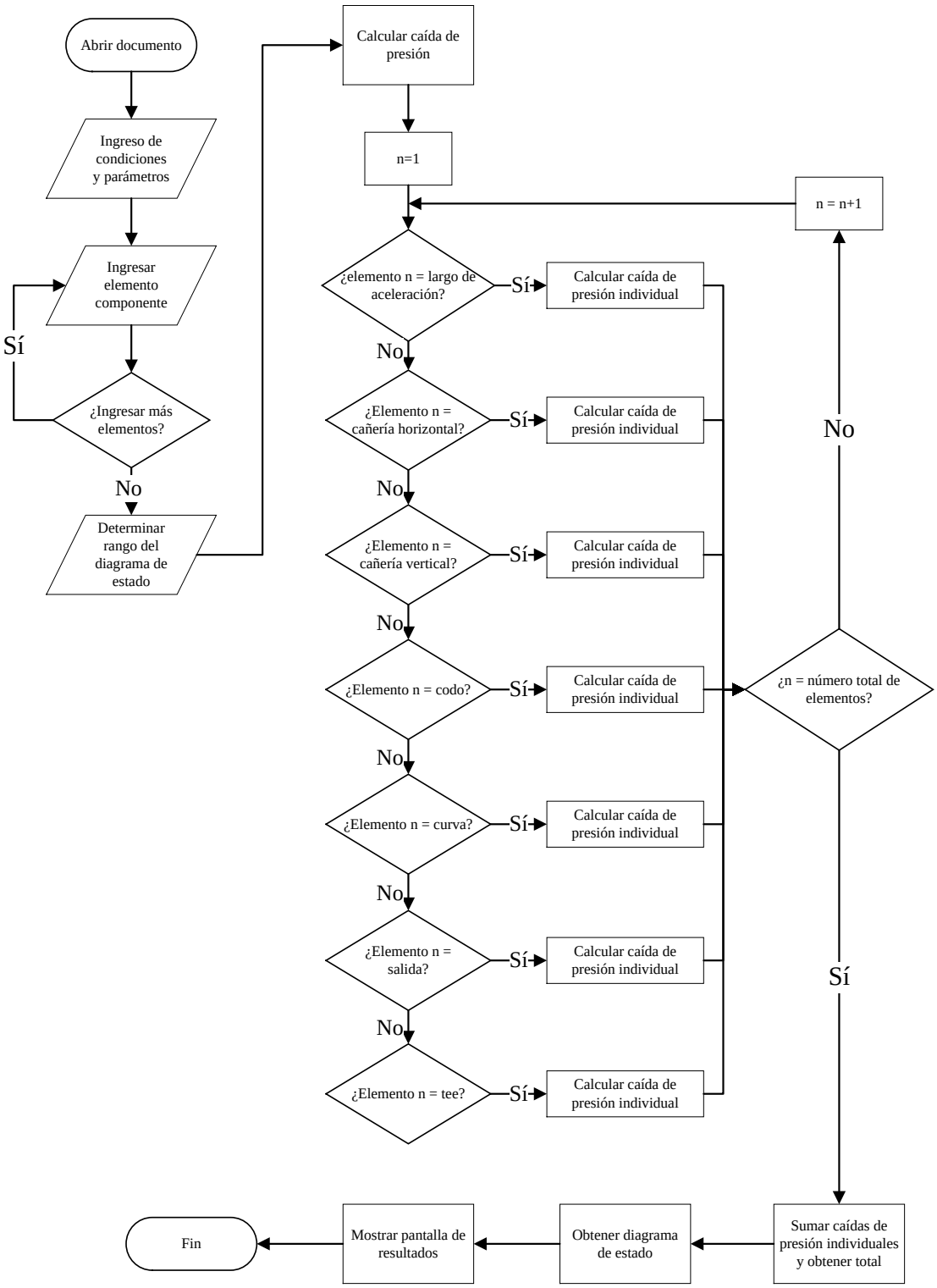
- Marca: Torpedo
- Modelo: JS-307
- Rango: 0:00:00-9:59:99 [min:seg:cent]
- Resolución: 0.01 [s]

Variador de frecuencia

- Marca: Danfoss
- Modelo: VLT Microdrive
- Rango: 10-52 [hz]
- Resolución: 0.1 [hz]



Anexo 2: Diagrama de bloques del modelo



Anexo 3: Mediciones

Valores medidos para configuración 1: 4,2 [m] horizontales

Aire solo		1,9 [kg/min]		3 [kg/min]		3,67 [kg/min]	
Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]
-	-	81	1.344	69	1.245	75	1.494
50	224	84	1.444	81	1.494	84	1.867
59	274	87	1.543	87	1.742	87	2.041
65	348	90	1.618	94	1.892	94	2.290
72	398	97	1.792	100	2.116	97	2.564
78	448	106	1.991	100	2.240	103	2.738
90	597	115	2.365	103	2.365	106	2.863
100	697	118	2.489	106	2.614	109	3.112
106	797	125	2.738	106	2.738	112	3.286
109	896	131	2.987	112	2.987	115	3.485
112	996	72	946	69	1.220	72	1.419
115	1.045	75	1.045	81	1.543	81	1.842
122	1.095	78	1.170	87	1.668	87	1.991
125	1.170	81	1.344	97	1.917	97	2.265
131	1.269	87	1.543	100	2.066	100	2.614
134	1.344	94	1.643	100	2.116	103	2.788
137	1.394	100	1.867	103	2.240	109	2.937
		106	2.091	106	2.489	112	3.112
		112	2.340	109	2.614	115	3.261
		115	2.539	115	2.838	118	3.609

Valores medidos para configuración 2: 6,2 [m] horizontales

Aire solo		1,9 [kg/min]		3 [kg/min]		3,67 [kg/min]	
Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]
-	-	69	1.045	72	1.444	69	1.543
37	199	78	1.294	78	1.593	78	1.942
47	249	81	1.444	81	1.767	84	2.116
56	299	87	1.693	84	1.991	90	2.489
62	373	90	1.867	90	2.290	94	2.738
69	448	94	1.991	97	2.365	100	2.788
75	523	97	2.116	100	2.489	103	2.987
78	597	106	2.365	106	2.738	106	3.236
81	672	112	2.489	112	2.987	106	3.485
87	747	118	2.738	115	3.236	112	3.858
90	821	72	1.120	72	1.444	69	1.369
94	896	75	1.245	78	1.618	75	1.867
97	971	78	1.369	84	1.867	81	2.041
103	1.045	84	1.618	87	2.116	90	2.439
112	1.145	90	1.817	90	2.315	97	2.788
115	1.245	97	2.041	97	2.365	100	2.863
118	1.319	103	2.240	103	2.564	103	3.037
125	1.444	106	2.365	109	2.863	106	3.186
131	1.568	109	2.489	112	3.112	109	3.609
		115	2.614	118	3.485	112	3.734

Valores medidos para configuración 3: 6,2 [m] horizontales + curva + 2 [m] horizontales

Aire solo		1,9 [kg/min]		3 [kg/min]		3,67 [kg/min]	
Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]
-	-	69	1.494	72	1.867	62	1.991
50	348	72	1.618	78	2.116	69	2.365
59	448	75	1.742	81	2.489	72	2.489
62	523	84	1.942	84	2.614	78	2.788
69	622	87	2.240	90	2.813	84	3.161
75	722	94	2.365	97	3.186	90	3.360
78	821	100	2.589	106	3.485	97	3.560
84	921	103	2.738	109	3.609	100	3.784
87	996	106	2.987	112	3.808	103	3.983
97	1.120	109	3.236	115	3.983	106	4.232
100	1.220	75	1.643	75	1.991	72	1.867
106	1.319	78	1.792	81	2.240	75	2.041
109	1.419	81	1.892	84	2.489	78	2.240
112	1.494	84	2.091	87	2.614	84	2.539
115	1.593	90	2.240	90	2.738	87	2.788
118	1.693	97	2.489	94	2.937	90	2.987
122	1.792	100	2.738	100	3.186	94	3.236
		106	2.987	106	3.435	97	3.485
		109	3.236	109	3.734	100	3.734
		112	3.485	112	3.983	103	3.983

Valores medidos para configuración 4: 6,2 [m] horizontales + codo + 2 [m] horizontales

Aire solo		1,9 [kg/min]		3 [kg/min]		3,67 [kg/min]	
Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]
-	-	65	1.369	69	1.867	65	1.991
47	373	72	1.618	72	2.240	72	2.290
59	473	78	1.792	75	2.489	75	2.489
62	573	84	1.991	81	2.738	78	2.738
69	672	90	2.290	84	2.863	81	2.987
75	772	94	2.489	90	3.037	84	3.236
78	871	97	2.788	97	3.286	90	3.485
84	946	103	2.987	100	3.535	94	3.734
90	1.070	106	3.236	106	3.833	97	4.033
94	1.170	65	1.369	109	4.082	100	4.281
100	1.319	69	1.543	69	1.867	65	1.991
103	1.394	75	1.742	75	2.240	72	2.365
106	1.494	84	1.991	78	2.489	75	2.614
109	1.593	87	2.141	81	2.688	78	2.738
115	1.792	90	2.439	84	2.887	81	2.987
118	1.867	97	2.738	90	3.112	84	3.236
		103	2.987	94	3.336	87	3.485
		106	3.236	100	3.609	94	3.784
				103	3.883	97	4.033
				106	3.983	106	4.530

Valores medidos para configuración 5: 6,2 [m] horizontales + curva + 2 [m] verticales

Aire solo		1,9 [kg/min]		3 [kg/min]		3,67 [kg/min]	
Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]
47	448	75	1.867	75	2.240	72	2.489
53	597	78	2.091	78	2.489	78	2.788
59	697	81	2.240	90	2.987	87	3.236
69	797	87	2.489	97	3.236	97	3.734
72	946	94	2.788	103	3.684	100	3.983
78	1.045	100	3.037	106	3.858	103	4.232
109	1.742	103	3.236	72	2.240	72	2.489
112	1.942	106	3.485	78	2.489	81	2.788
115	2.116	72	1.867	87	2.987	84	3.236
118	2.240	78	2.116	94	3.236	94	3.485
72	921	81	2.340	97	3.485	100	3.858
78	1.045	90	2.539	103	3.734	103	4.232
87	1.195	97	2.788	75	2.240	72	2.489
90	1.294	103	2.987	81	2.489	78	2.788
97	1.444	106	3.236	87	2.863	84	3.236
103	1.618	109	3.485	94	3.236	87	3.485
109	1.742	97	2.738	100	3.485	97	3.858
-	-	100	2.987	106	3.858	103	4.232
		103	3.286	87	2.887	72	2.489
		106	3.485	94	3.236		

Valores medidos para configuración 6: 6,2 [m] horizontales + codo + 2 [m] verticales

Aire solo		1,9 [kg/min]		3 [kg/min]		3,67 [kg/min]	
Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]	Q [Nm^3/hr]	ΔP [Pa]
50	498	78	1.942	72	2.365	72	2.614
59	622	81	2.116	78	2.614	78	2.937
65	772	87	2.439	81	2.788	81	3.360
72	946	94	2.614	87	3.112	87	3.784
78	1.045	97	2.937	94	3.435	94	4.107
84	1.220	106	3.236	97	3.609	69	2.589
87	1.319	109	3.435	103	3.983	75	2.863
90	1.469	115	3.609	72	2.365	81	3.286
97	1.593	72	1.867	78	2.738	87	3.734
103	1.742	78	2.116	84	2.987	94	4.232
109	1.942	81	2.365	90	3.360	97	4.481
115	2.091	87	2.539	97	3.684	69	2.589
122	2.240	94	2.788	100	3.858	75	2.987
122	2.290	97	3.037	103	4.107	84	3.286
-	-	103	3.236	72	2.390	87	3.734
		106	3.485	78	2.614	90	3.983
		112	3.634	87	3.087	100	4.481
				94	3.360	69	2.614
				97	3.684	75	2.987
				103	3.983	78	3.360

Anexo 4: Comparación entre diferencias medidas y modelo para tramos individuales

	Aire solo					1,9 [kg/min]					3 [kg/min]					3,67 [kg/min]				
	C1	C2	Dif.	Mod. T H			C1	C2	Dif.	Mod. T H		C1	C2	Dif.	Mod. T H		C1	C2	Dif.	Mod. T H
Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP		Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP
0	0	0	0	0		65	762	863	101	140	70	1125	1342	216	187	70	1266	1496	231	206
10	18	18	0	3		70	927	1055	128	156	75	1313	1545	232	205	75	1492	1745	253	226
20	41	58	17	11		75	1092	1247	155	172	80	1501	1749	249	224	80	1719	1995	276	246
30	78	114	35	23		80	1257	1438	182	189	85	1688	1953	265	244	85	1945	2244	298	266
40	131	186	55	38		85	1422	1630	208	207	90	1876	2157	281	264	90	2172	2493	321	287
50	198	275	77	56		90	1587	1822	235	226	95	2063	2361	298	285	95	2398	2742	343	309
60	279	380	100	78		95	1752	2014	262	245	100	2251	2565	314	306	100	2625	2991	366	332
70	376	501	125	102		100	1917	2206	289	265	105	2438	2769	330	329	105	2852	3240	389	355
80	487	638	151	130		105	2082	2398	315	285	110	2626	2973	347	351	110	3078	3489	411	379
90	612	791	179	160		110	2247	2590	342	307	115	2813	3177	363	375	115	3305	3738	434	403
100	753	961	208	194		115	2412	2781	369	329										
110	907	1147	239	230		120	2577	2973	396	351										
120	1077	1349	272	269																
130	1261	1567	306	311																

Aire solo						1,9 [kg/min]						3 [kg/min]						3,67 [kg/min]					
	C2	C3	T H	Dif.	Mod. Curva		C2	C3	T H	Dif.	Mod. Curva		C2	C3	T H	Dif.	Mod. Curva		C2	C3	T H	Dif.	Mod. Curva
Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP
0	0	0		0	0	70	1097	1453	156	200	193	70	1342	1801	187	273	284	65	1330	1881	188	363	319
10	18	31	3	10	1	75	1271	1668	172	225	207	75	1545	2043	205	292	304	70	1555	2144	206	383	341
20	58	82	11	13	2	80	1444	1883	189	249	221	80	1749	2284	224	310	323	75	1780	2408	226	403	363
30	114	153	23	16	5	85	1618	2098	207	272	236	85	1953	2525	244	328	342	80	2005	2671	246	421	385
40	186	245	38	21	10	90	1792	2313	226	295	250	90	2157	2766	264	345	362	85	2230	2935	266	439	408
50	275	357	56	26	15	95	1966	2528	245	317	266	95	2361	3007	285	362	382	90	2454	3198	287	457	431
60	380	490	78	33	22	100	2140	2743	265	339	281	100	2565	3249	306	377	403	95	2679	3462	309	473	454
70	501	643	102	40	29	105	2313	2958	285	359	297	105	2769	3490	329	392	423	100	2904	3725	332	489	477
80	638	817	130	49	38	110	2487	3173	307	379	313	110	2973	3731	351	407	444	105	3129	3989	355	505	501
90	791	1011	160	60	49	115	2661	3388	329	399	329	115	3177	3972	375	420	465	110	3354	4252	379	519	524
100	961	1226	194	71	60	120	2835	3604	351	417	346												
110	1147	1461	230	84	73																		
120	1349	1717	269	99	87																		
130	1567	1993	311	115	102																		

Aire solo						1,9 [kg/min]						3 [kg/min]						3,67 [kg/min]					
	C2	C4	T H	Dif.	Mod. Codo		C2	C4	T H	Dif.	Mod. Codo		C2	C4	T H	Dif.	Mod. Codo		C2	C4	T H	Dif.	Mod. Codo
Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP
0	0	0	0	0	0	70	1097	1500	156	247	302	70	1342	2073	187	544	426	65	1247	1929	188	494	467
10	21	26	3	1	2	75	1271	1725	172	282	327	75	1545	2331	205	580	458	70	1496	2256	206	553	503
20	58	76	11	7	6	80	1444	1951	189	317	353	80	1749	2588	224	615	491	75	1745	2583	226	612	539
30	111	149	23	16	14	85	1618	2176	207	351	380	85	1953	2846	244	649	525	80	1995	2910	246	670	576
40	181	247	38	28	24	90	1792	2402	226	384	407	90	2157	3103	264	682	559	85	2244	3236	266	727	613
50	269	370	56	44	38	95	1966	2628	245	417	436	95	2361	3360	285	715	594	90	2493	3563	287	783	652
60	374	516	78	64	54	100	2140	2853	265	449	465	100	2565	3618	306	747	629	95	2742	3890	309	839	691
70	496	686	102	88	74	105	2313	3079	285	480	495	105	2769	3875	329	778	666	100	2991	4217	332	894	730
80	636	880	130	115	96	110	2487	3305	307	511	525	110	2973	4133	351	809	703	105	3240	4544	355	949	771
90	792	1099	160	146	122	115	2661	3530	329	541	557												
100	966	1342	194	182	150																		
110	1157	1608	230	221	182																		
120	1366	1899	269	264	216																		

Aire solo							1,9 [kg/min]							3 [kg/min]							3,67 [kg/min]						
	C2	C5	Curva	Filtro	Dif.	Mod. T V		C2	C5	Curva	Filtro	Dif.	Mod. T V		C2	C5	Curva	Filtro	Dif.	Mod. T V		C2	C5	Curva	Filtro	Dif.	Mod. T V
Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP
0	0	0	0	0	0	0	70	1097	1732	200	130,1	304	220	70	1342	2051	296	130	283	288	70	1487	2378	355	130	405	330
10	21	72	1	19	31	3	73	1201	1864	209	135,7	318	223	73	1464	2199	308	136	292	288	73	1639	2540	369	136	396	329
20	58	144	3	37	46	11	76	1305	1996	218	141,2	332	227	76	1586	2348	320	141	301	291	76	1790	2702	383	141	388	330
30	111	240	6	56	67	23	79	1410	2128	227	146,8	345	233	79	1709	2497	332	147	310	295	79	1942	2865	397	147	380	332
40	181	359	12	74	92	38	82	1514	2260	235	152,4	359	239	82	1831	2646	344	152	318	300	82	2093	3027	411	152	371	337
50	269	503	18	93	123	56	85	1618	2393	244	158,0	372	246	85	1953	2795	356	158	327	306	85	2244	3190	425	158	362	342
60	374	670	26	111	159	78	88	1723	2525	254	163,5	385	254	88	2076	2943	369	164	336	313	88	2396	3352	439	164	354	348
70	496	861	35	130	199	102	91	1827	2657	263	169,1	398	263	91	2198	3092	381	169	344	320	91	2547	3515	453	169	345	356
80	636	1076	46	149	245	130	94	1931	2789	272	174,7	412	272	94	2320	3241	393	175	353	329	94	2699	3677	468	175	336	364
90	792	1315	58	167	297	160	97	2035	2921	281	180,3	424	281	97	2443	3390	406	180	361	338	97	2850	3840	482	180	327	373
100	966	1577	72	186	353	194	100	2140	3054	291	185,8	437	291	100	2565	3539	418,3	186	370	347	100	3002	4002	496	186	318	382
110	1157	1863	87	204	414	230																					
120	1366	2173	104	223	480	269																					

Aire solo							1,9 [kg/min]							3 [kg/min]							3,67 [kg/min]						
	C2	C6	Codo	Filtro	Dif.	Mod. T V		C2	C6	Codo	Filtro	Dif.	Mod. T V		C2	C6	Codo	Filtro	Dif.	Mod. T V		C2	C6	Codo	Filtro	Dif.	Mod. T V
Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	Q	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP	ΔP
0	0	0	0	0	0	0	80	1444	2177	316	149	268	235	70	1342	2240	475	130	294	288	70	1487	2628	562	248	331	330
10	21	57	2	19	15	3	83	1549	2309	330	154	276	242	73	1464	2399	495	136	304	288	73	1639	2821	585	258	339	329
20	58	138	7	37	36	11	86	1653	2441	344	160	284	249	76	1586	2558	516	141	314	291	76	1790	3015	609	268	347	330
30	111	242	16	56	59	23	89	1757	2573	358	165	292	257	79	1709	2717	537	147	324	295	79	1942	3208	633	279	354	332
40	181	371	29	74	86	38	92	1862	2705	373	171	300	266	82	1831	2876	559	152	334	300	82	2093	3401	657	289	362	337
50	269	523	46	93	115	56	95	1966	2837	387	177	307	275	85	1953	3035	581	158	344	306	85	2244	3595	682	299	369	342
60	374	699	66	111	148	78	98	2070	2969	402	182	314	284	88	2076	3195	603	164	353	313	88	2396	3788	707	310	376	348
70	496	899	89	130	183	102	101	2174	3101	418	188	321	294	91	2198	3354	625	169	362	320	91	2547	3981	732	320	382	356
80	636	1122	117	149	221	130	104	2279	3233	433	193	328	305	94	2320	3513	647	175	371	329	94	2699	4175	757	330	388	364
90	792	1370	148	167	262	160	107	2383	3365	449	199	334	316	97	2443	3672	670	180	379	338	97	2850	4368	783	341	394	373
100	966	1641	182	186	306	194	110	2487	3497	465	204	340	327	100	2565	3831	693	186	387	347	100	3002	4561	809	351	400	382
110	1157	1936	220	204	353	230								103	2687	3990	716	191	395	358	103	3153	4755	835	361	406	392
120	1366	2254	262	223	403	269								106	2810	4149	740	197	403	368	106	3304	4948	861	372	411	403
														109	2932	4308	764	203	410	379	109	3456	5141	887	382	416	414

Anexo 5: Código del programa

```
Sub caida_presión()
   'Desnivel total
   desniveltotal = 0
   horizontaltotal = 0
   'Definir pi
   Pi = Application.WorksheetFunction.Pi
      'Activar sheet1
   Sheet1.Activate
      'Seleccionar a1
   Cells(1, 1).Select
      ultimodato = WorksheetFunction.CountA(Range("A:A")) - 1
      contador = 1
looppresion:
      If contador <= ultimodato Then
         'Presión de salida (entrada)
         If contador = "1" Then Cells(contador + 1, 10).Value = 101325 * (Cells(5,
22).Value / 760) + Cells(5, 23).Value
         If contador > "1" Then Cells(contador + 1, 10).Value = Cells(contador,
11).Value
         'Densidad de salida (entrada)
         densidadsalida = ((Cells(contador + 1, 10).Value)) / ((Cells(5, 17).Value) *
(Cells(5, 18).Value))
         Cells(contador + 1, 8).Value = densidadsalida
         'Velocidad de salida
         Ugs = (Cells(2, 19).Value * (Cells(5, 18).Value / 293) * (101325 /
Cells(contador + 1, 10).Value)) / (3600 * (Pi * ((Cells(contador + 1, 3).Value / 1000)
^ (2)) / 4))
         Cells(contador + 1, 13).Value = Ugs
         'Cálculos dP para elementos
         'Tee recta
         If Cells(contador + 1, 2).Value = "Tee recta" Then
            Pout = Sheet1.Cells(contador + 1, 10).Value
            K = Sheet2.Cells(5, 2).Value
            V = Sheet1.Cells(contador + 1, 13).Value
            rho = Sheet1.Cells(contador + 1, 8).Value
            dPteer = (K * ((V) ^ (2)) * rho) / 2
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then Sheet1.Cells(contador + 1,
11).Value = dPteer + Pout
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then Sheet1.Cells(contador + 1,
11).Value = Pout - dPteer
         End If
```

```
        'Tee desviado
        If Cells(contador + 1, 2).Value = "Tee desviada" Then
            Pout = Sheet1.Cells(contador + 1, 10).Value
            K = Sheet2.Cells(6, 2).Value
            V = Sheet1.Cells(contador + 1, 13).Value
            rho = Sheet1.Cells(contador + 1, 8).Value
            dPteed = (K * ((V) ^ (2)) * rho) / 2
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then Sheet1.Cells(contador + 1,
11).Value = dPteed + Pout
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then Sheet1.Cells(contador + 1,
11).Value = Pout + dPteed
        End If
        'Salida
        If Cells(contador + 1, 2).Value = "Salida" Then
            Pout = Sheet1.Cells(contador + 1, 10).Value
            K = Sheet2.Cells(9, 2).Value
            V = Sheet1.Cells(contador + 1, 13).Value
            rho = Sheet1.Cells(contador + 1, 8).Value
            dPsalidaaccesorio = (K * ((V) ^ (2)) * rho) / 2
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then Sheet1.Cells(contador + 1,
11).Value = dPsalidaaccesorio + Pout
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then Sheet1.Cells(contador + 1,
11).Value = Pout - dPsalidaaccesorio
        End If
        'Largo de aceleración
        If Cells(contador + 1, 2).Value = "Largo de aceleración" Then
            'Sin flujo de sólidos (Cañería horizontal estándar)
            If Cells(2, 20).Value = 0 Then
                Pout = Sheet1.Cells(contador + 1, 10).Value
                dPgacel = 0
                Cells(contador + 1, 11).Value = dPgacel + Pout
            End If
            'Con flujo de sólidos
            If Not Cells(2, 20).Value = 0 Then
                rhog = Cells(contador + 1, 8).Value
                miu = Cells(2, 21).Value
                dpart = Cells(2, 18).Value / 1000
                rhop = Cells(2, 16).Value
                D = Cells(contador + 1, 3).Value / 1000
                Pout = Cells(contador + 1, 10).Value
                T = Cells(5, 18).Value
                Ug = (Cells(2, 19).Value * (T / 293) * (101325 / Pout)) / (3600 * (Pi *
((D) ^ (2)) / 4))
                Up = Ug * (1 - 0.0637 * ((dpart) ^ (0.3)) * ((rhop) ^ (0.5)))
                If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
```

```
                dPacel = rhog * Ug * Up * miu + Pout
            End If
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
                dPacel = Pout - rhog * Ug * Up * miu
            End If
            Cells(contador + 1, 11).Value = dPacel
        End If
    End If
    'Tubería horizontal
    If Cells(contador + 1, 2).Value = "Cañería" And Cells(contador + 1, 6).Value
= "Horizontal" Then
        Pout = Cells(contador + 1, 10).Value
        f = Cells(2, 22).Value
        L = Cells(contador + 1, 5).Value
        D = (Cells(contador + 1, 3).Value) / 1000
        Wg = (Cells(2, 19).Value) * 1.203 / 3600
        R = Cells(5, 17).Value
        T = Cells(5, 18).Value
        Alpha = 1 + Cells(2, 21).Value * Cells(11, 16).Value
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
            dPgh = (((Pout) ^ (2)) + (16 * (f) * (L / ((D) ^ (5))) * (((Wg) ^ (2)) / ((Pi)
^ (2))) * (R) * (T))) ^ (1 / 2) - Pout
        End If
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
            dPgh = Pout - (((Pout) ^ (2)) - (16 * (f) * (L / ((D) ^ (5))) * (((Wg) ^ (2))
/ ((Pi) ^ (2))) * (R) * (T))) ^ (1 / 2)
        End If
        dPth = Alpha * dPgh
        dPsalidah = dPth + Pout
        Cells(contador + 1, 11).Value = dPsalidah
    End If
        'Tubería vertical
    If Cells(contador + 1, 2).Value = "Cañería" And Cells(contador + 1, 6).Value
= "Vertical" Then
        'Pérdida por fricción
        Pout = Cells(contador + 1, 10).Value
        f = Cells(2, 22).Value
        L = Cells(contador + 1, 5).Value
        D = (Cells(contador + 1, 3).Value) / (1000)
        Wg = (Cells(2, 19).Value) * (1.203 / 3600)
        R = Cells(5, 17).Value
        T = Cells(5, 18).Value
        Alpha = 1 + Cells(2, 21).Value * Cells(11, 17).Value
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
```

```
            dPgv = (((Pout) ^ (2)) + (16 * (f) * (L / ((D) ^ (5))) * (((Wg) ^ (2)) / ((Pi)
^ (2))) * (R) * (T))) ^ (1 / 2) - Pout
         End If
         If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
            dPgv = Pout - (((Pout) ^ (2)) - (16 * (f) * (L / ((D) ^ (5))) * (((Wg) ^ (2))
/ ((Pi) ^ (2))) * (R) * (T))) ^ (1 / 2)
         End If
         dPv = Alpha * dPgv
         'Pérdida por altura estática
         rhog = Cells(contador + 1, 8).Value
         miu = Cells(2, 21).Value
         H = Cells(contador + 1, 5).Value
         g = Cells(5, 16).Value
         dpart = Cells(2, 18).Value / 1000
         rhop = Cells(2, 16).Value
         visc = Sheet1.Cells(5, 19).Value
         Ug = Sheet1.Cells(contador + 1, 13).Value
         Rep = (Ug * rhog * dpart) / visc
         Cd = (24 / Rep) + (4 / ((Rep) ^ (0.5))) + 0.4
         Ug = (Cells(2, 19).Value * (T / 293) * (101325 / Pout)) / (3600 * (Pi * ((D)
^ (2)) / 4))
         raiz = ((4 / 3) * (dpart * g / Cd) * ((rhop - rhog) / rhog)) ^ (1 / 2)
         dPest = rhog * Ug * miu * H * g / (Ug - raiz)
         If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
            dPtv = dPv + dPest + Pout
         End If
         If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
            dPtv = Pout + dPv - dPest
         End If
         Cells(contador + 1, 11).Value = dPtv
         Cells(contador + 1, 15).Value = Ug - raiz
      End If
      'Codos y curvas
      If Cells(contador + 1, 2).Value = "Codo" Or Cells(contador + 1, 2).Value =
"Curva" Then
         'Pérdida por gas en el codo
         If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
            Pout = Cells(contador + 1, 10).Value
            If Cells(contador + 1, 2).Value = "Codo" Then K = Sheet2.Cells(3,
2).Value
            If Cells(contador + 1, 2).Value = "Curva" Then K = Sheet2.Cells(10,
2).Value
            D = Cells(contador + 1, 3).Value / 1000
            Wg = (Cells(2, 19).Value) * (1.203 / 3600)
            R = Cells(5, 17).Value
```

```
            T = Cells(5, 18).Value
            dPgc = ((Pout) ^ (2) + 16 * (K / ((D) ^ (4))) * ((Wg) ^ (2) / (Pi) ^ (2)) * R
* T) ^ (1 / 2) - Pout
        End If
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
            rhog = Sheet1.Cells(contador + 1, 8).Value
            V = Sheet1.Cells(contador + 1, 13).Value
            If Cells(contador + 1, 2).Value = "Codo" Then K = Sheet2.Cells(3,
2).Value
            If Cells(contador + 1, 2).Value = "Curva" Then K = Sheet2.Cells(10,
2).Value
            dPgc = K * rhog * ((V) ^ (2)) / 2
        End If
        'Pérdida por sólidos en el codo
        rcurv = Cells(contador + 1, 7).Value
        f = Cells(2, 22).Value
        Lfisico = Pi * rcurv / 2
        Rel = 210 * (2 * rcurv / D) ^ (-1.15)
        Ksh = Sheet1.Cells(11, 16).Value
        miu = Sheet1.Cells(2, 21).Value
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
            dPscr = (((Pout) ^ (2)) + 16 * f * (Lfisico / (D) ^ (5)) * ((Wg) ^ (2) / (Pi)
^ (2)) * R * T) ^ (1 / 2) - Pout
        End If
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
            dPscr = Pout - (((Pout) ^ (2)) - 16 * f * (Lfisico / (D) ^ (5)) * ((Wg) ^ (2)
/ (Pi) ^ (2)) * R * T) ^ (1 / 2)
        End If
        dPsct = dPscr * Rel * Ksh * miu
        'Verificar que existe flujo de sólidos
        If Cells(2, 20).Value = "0" Then
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
                dpcodo = dPgc + Cells(contador + 1, 10).Value
                Cells(contador + 1, 11).Value = dpcodo
            End If
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
                dpcodo = Pout - dPgc
                Cells(contador + 1, 11).Value = dpcodo
            End If
        End If
        If Not Cells(2, 20).Value = "0" Then
            If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
                dpcodo = dPgc + dPsct + Cells(contador + 1, 10).Value
                Cells(contador + 1, 11).Value = dpcodo
            End If
```

```
                If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
                    dpcodo = Cells(contador + 1, 10).Value - dPgc + dPsct
                    Cells(contador + 1, 11).Value = dpcodo
                End If
            End If
        End If
        'Calcular dP
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Positiva" Then
            dpindividual = Cells(contador + 1, 11).Value - Cells(contador + 1,
10).Value
        End If
        If Sheet2.Cells(8, 6).Value = "Negativa" Then
            dpindividual = Cells(contador + 1, 10).Value - Cells(contador + 1,
11).Value
        End If
        Cells(contador + 1, 12).Value = dpindividual
        'Densidad de entrada (salida)
        densidadentrada = Cells(contador + 1, 11).Value / (Cells(5, 17).Value *
Cells(5, 18).Value)
        Cells(contador + 1, 9).Value = densidadentrada
        'Velocidad de entrada
        Uge = (Cells(2, 19).Value * (Cells(5, 18).Value / 293) * (101325 /
Cells(contador + 1, 11).Value)) / (3600 * (Pi * ((Cells(contador + 1, 3).Value / 1000)
^ (2)) / 4))
        Cells(contador + 1, 14).Value = Uge
        'Sumar desniveles para establecer desnivel total
        If Cells(contador + 1, 2).Value = "Cañería" And Cells(contador + 1, 6).Value
= "Vertical" Then
            desniveltotal = desniveltotal + Cells(contador + 1, 5).Value
        End If
        'Sumar Largo horizontal total
        If Cells(contador + 1, 2).Value = "Cañería" And Cells(contador + 1, 6).Value
= "Horizontal" Then
            horizontaltotal = horizontaltotal + Cells(contador + 1, 5).Value
        End If
        contador = contador + 1
        GoTo looppresion
    End If
    Sheet4.Cells(26, 3).Value = horizontaltotal
    Sheet4.Cells(27, 3).Value = desniveltotal
    Cells(contador + 1, 10).Value = "dP total"
    dptotal = Cells(contador, 11).Value - 101325 * (Cells(5, 22).Value / 760)
    Cells(contador + 1, 11).Value = dptotal
    Cells(8, 16).Value = dptotal
```

```
End Sub
Sub diagrama_de_estado()
'Borrar datos anteriores
Sheet3.Range("A2:D22").ClearContents
'Remarcar punto de operación
Sheet3.Cells(2, 3).Value = Sheet1.Cells(2, 19).Value
Sheet3.Cells(2, 4).Value = Sheet1.Cells(8, 16).Value
'Remarcar velocidad de desprendimiento y velocidad mínima de transporte
Dim Pi As Double
Pi = 3.14
Dim dpm As Double
dpm = Sheet1.Cells(2, 18).Value
Dim g As Double
g = 9.81
Dim rhop As Double
rhop = Sheet1.Cells(2, 16).Value
Dim rhog As Double
rhog = Sheet1.Cells(2, 8).Value
Dim D As Double
D = Sheet1.Cells(2, 3).Value
Rep = Sheet1.Cells(2, 8).Value * Sheet1.Cells(2, 13).Value * (dp / 1000) /
Sheet1.Cells(5, 19).Value
Dim miu As Double
miu = Sheet1.Cells(2, 21).Value
Dim Us As Double
Us = ((g * (D / 1000)) ^ (1 / 2)) * ((D / dpm) ^ (0.025)) * ((rhop / rhog) ^ (0.34)) *
((miu) ^ (0.11))
Dim Qs As Double
Qs = (Us * ((D / 1000) ^ (2) * Pi / 4)) * 3600 * 1.2
qoriginal = Sheet1.Cells(2, 19).Value
Sheet1.Cells(2, 19).Value = Qs
Call caida_presión
dPQs = Sheet1.Cells(8, 16).Value
Sheet3.Cells(4, 3).Value = Qs
Sheet3.Cells(4, 4).Value = dPQs
Sheet1.Cells(2, 19).Value = qoriginal
'Seleccionar sheet1
Sheet1.Select
'Guardar caudal original
qoriginal = Sheet1.Cells(2, 19).Value
a:
    puntooperacion = Sheet1.Cells(2, 19).Value
    paso = (puntooperacion) / 20
    For o = 1 To 20
```

```
        Cells(2, 19).Value = paso * o
        Call caida_presión
            Sheet1.Activate
            ultimo = WorksheetFunction.CountA(Range("A:A")) - 1
            For p = 1 To ultimo
                If Cells(p + 1, 15).Value < 0 Then
                    GoTo b
                End If
            Next p
            GoTo c
b:
    Next o
c:
    partida = Sheet1.Cells(2, 19).Value
    limitesuperior = Sheet1.Cells(17, 16).Value
    paso2 = (limitesuperior - Cells(2, 19).Value) / 20
    For q = 1 To 21
        Cells(2, 19).Value = partida + paso2 * q - paso2
        Call caida_presión
        caida = Cells(8, 16).Value
        Sheet3.Cells(q + 1, 1).Value = partida + paso2 * q - paso2
        Sheet3.Cells(q + 1, 2).Value = caida
    Next q
'Devolver valor original a Q
Cells(2, 19).Value = qoriginal
Call caida_presión
Sheet3.Select
End Sub
Sub gráfico_diagrama()
'Activar hoja 3
Sheet3.Activate
    Range("B2:B21").Select
    ActiveSheet.Shapes.AddChart2(240, xlXYScatter).Select
    ActiveChart.SetSourceData Source:=Range("Sheet3!$B$2:$B$21")
    ActiveChart.FullSeriesCollection(1).XValues = "=Sheet3!$A$2:$A$21"
    ActiveChart.ChartTitle.Text = "Diagrama de estado"
End Sub
Sub borrar()
'Borrar elementos
Sheet1.Range("A2:N1000").ClearContents
Sheet1.Range("P11:Q11").ClearContents
Sheet1.Range("P2:T2").ClearContents
Sheet1.Range("P5:U5").ClearContents
Sheet1.Range("W5").ClearContents
Sheet1.Range("W2:X2").ClearContents
```

```
Sheet3.Range("A2:B22").ClearContents
End Sub
Sub borrar_elementos()
'Borrar elementos del sistema
Sheet1.Range("A2:O1000").ClearContents
End Sub
Sub prueba_rapida()
Dim m As Integer
m = 1
a:
If Not Sheet5.Cells(m + 1, 1).Value = Empty Then
   Sheet1.Cells(2, 19).Value = Sheet5.Cells(m + 1, 1).Value
   Call caida_presión
   Sheet5.Cells(m + 1, 2).Value = Sheet1.Cells(8, 16).Value
   m = m + 1
   GoTo a
End If
End Sub
```