



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

**Metodología automatizada para el
mantenimiento de un sistema de ventilación
industrial**

Autor:

García Hernández, Carlos

Tutor:

**Sierra Pallares, José Benito
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, febrero de 2018

Resumen—El presente documento pretende dar solución a un problema muy común en la industria química: el deterioro de los circuitos de aspiración.

En esta industria, cuando hay mezclas, parte de los productos se difumina en el ambiente, con su consecuente pérdida. De este modo, hay sistemas dedicados a aspirar y recuperar producto, por medio de filtros. Los costes de instalación y de funcionamiento de estos sistemas son elevados, por lo que un mantenimiento no adecuado puede suponer pérdidas económicas importantes.

Existe un problema muy engorroso en estas instalaciones: la obstrucción de los conductos de aspiración. Esto supone que pierdan eficacia y tengan que ser reemplazadas periódicamente.

Con este proyecto, se busca dar solución a este inconveniente, a fin de alargar la vida útil de estos sistemas y mantener su eficacia a lo largo de ésta.

Ha sido elaborado en la fábrica Michelin de Valladolid, por lo que el problema se ha enmarcado en la parte de industria química de esta factoría.

Palabras clave—Aspiración, conducto, filtro, ventilador, pérdidas de carga.

Abstract—The present document aims to give solution for a problem very common in chemistry industry: the deterioration of the aspiration pipes.

In this industry, when there are mixtures, part of the products is dissolved in the atmosphere, with herself resultant loss. Therefore, there are systems dedicated at to aspirate and to recover product, through filters. The costs of installation and working of these systems are high, so that maintenance no suitable can suppose important economic losses.

There is a problem very hard in these installations: the obstruction of the aspiration pipes. It supposes that they lose effectiveness and have to be replaced periodically.

With this project, it is looked to give solution for this difficulty, in order to extend the useful life of these systems and to keep their effectiveness along of this.

It has been made in Valladolid Michelin factory, so that the problem has been squared in the part of chemistry industry of this plant.

Keywords—Aspiration, pipe, filter, fan, charge losses.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento hacia el personal de MAT/SF de Michelin Valladolid, por su trato cordial e intachable. Muy especialmente, quiero agradecer al departamento de GTA la acogida recibida; todos y cada uno de ellos han hecho de mi estancia en Michelin algo sensacional. Especial atención hacia José Luis Romero Alonso, mi mentor en todo este proceso. Sin su trato amable y su paciencia, desde el primer y hasta el último día, no habría sido posible elaborar este proyecto.

Mando también un recuerdo con cariño a todos los becarios con los que he compartido esta experiencia. Seguro que esas risas en el comedor serán recordadas con nostalgia en un futuro no muy lejano.

Miércoles, 26 de julio de 2017.

Valladolid, España.

Carlos García Hernández

Índice de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Aspiración industrial. Generalidades	1
1.2. Aspiraciones en Michelin	2
1.3. Mantenimiento actual de las aspiraciones en Michelin ..	8
1.4. Justificación del mantenimiento de las aspiraciones	15
2. Objetivos del presente proyecto	19
3. Metodología	21
3.1. Estudio de solución por velocidades	21
3.2. Estudio de solución por presiones	25
3.3. Modelo EPANET	26
4. Resultados	29
4.1. Simulaciones EPANET	29
4.2. Validación del modelo. Pruebas a nivel de campo	35
4.3. Prueba piloto	38
4.4. Prototipo de solución de control	49
5. Presupuesto	55
6. Conclusiones	59
Referencias	61

1. Introducción

1.1. Aspiración industrial. Generalidades

Los procesos de producción pueden ir acompañados de emisión de gases, vapores, polvo o calor, lo cual puede ser nocivo para la salud y bienestar de los trabajadores. Asimismo, las necesidades técnicas de los procesos de fabricación, almacenamiento y acondicionamiento de los productos, así como la conservación de los equipos, pueden verse afectados [1].

En cuanto a la emisión de calor, el bienestar de trabajo se obtiene mediante una combinación de condiciones ambientales, como la humedad relativa y la temperatura del aire.

Por su parte, los contaminantes en forma de gases, vapores o polvo no deben sobrepasar una concentración máxima admisible, dependiente de varios factores, como la exposición del trabajador, la toxicidad del contaminante y la dureza del trabajo.

La ventilación industrial tiene por objeto mantener esas condiciones de trabajo saludables, asegurando los requisitos prescritos en el aire de una nave. El aire viciado se extrae mediante **aspiración** y el aire limpio lo reemplaza, mediante impulsión o naturalmente.

La ventilación puede ser general o localizada. La **ventilación localizada**, particularmente eficaz para la extracción de humos y polvo, aspira el aire polucionado en el mismo sitio en que se ha producido, impidiéndose su propagación. Si la ventilación localizada no alcanza a mantener la limpieza requerida en el aire, se ha de recurrir también a la ventilación general.

Los **aspiradores localizados** pueden clasificarse en aspiradores cerrados, en los que el foco de polución está situado en el interior del colector de aspiración; en aspiradores abiertos, en los que el colector está localizado a cierta distancia del foco de polución; y en aspiradores semiabiertos, en los que el colector se sitúa sobre el foco de polución.

Para resolver los problemas de ventilación, hay que saber qué cantidad de aire hay que extraer, qué cantidad hay que suministrar y cómo deben llevarse a cabo estas operaciones, es decir, dónde han de situarse las entradas y salidas de aire y cómo deben diseñarse los elementos que determinarán la tasa de renovación.

En la mayoría de los casos, el aire es transportado por tuberías. El cálculo de la red de conductos que asegure su correcta distribución constituye un tema central. En esto, entran en juego conceptos de aerodinámica de flujo interno, como velocidad del aire, diferencia de presión y pérdidas de carga.

También resulta conveniente tener algunos conocimientos de la ingeniería de producción, ya que ello permite coordinar las soluciones generales de los problemas de ventilación con las condiciones específicas de los procesos de fabricación.

1.2. Aspiraciones en Michelin

En la fábrica Michelin de Valladolid existe una actividad denominada *mezclas*, encargada de realizar la goma para las ruedas, que se enmarca como industria química. Es parte fundamental del proceso global, pues dotará al neumático de las propiedades químicas y físicas idóneas. La **Figura 1-2-1**, a modo esquemático, enmarca esta actividad dentro de todo el proceso.

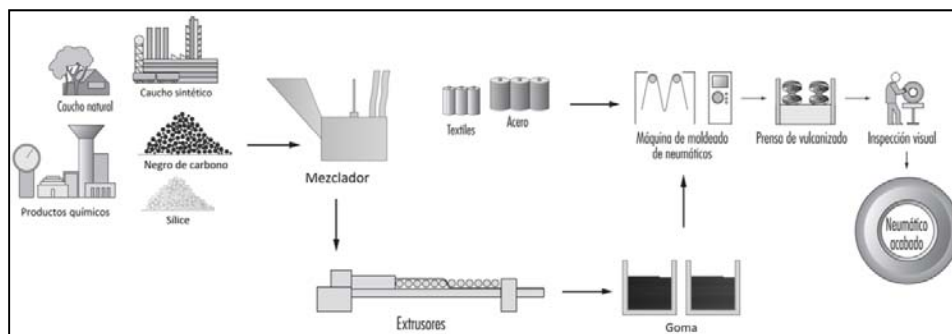


Figura 1-2-1. Actividad *mezclas* dentro del proceso global

Las actividades *textil* y *de acero* no se detallan. La actividad *mezclas*, grosso modo, consiste en una unión de materias primas que es llevada a máquinas extrusoras. El moldeo de los neumáticos y su vulcanización son etapas posteriores.

Mezclas es una actividad sucia. La manipulación de los productos que se usan en ella genera un ambiente contaminante. En consecuencia, es necesario aspirar en diversos puntos del proceso, a fin de extraer la suciedad y recuperar, cuando es posible, productos que se han difuminado en el ambiente.

Por tanto, la aspiración es parte fundamental de esta actividad. Su mal funcionamiento puede suponer pérdidas económicas importantes, ya sea por pérdida de producto o por mal desarrollo de la producción.

En las **Figuras 1-2-2 y 1-2-3**, se muestran campanas de aspiración sobre máquinas extrusoras antiguas; las aspiraciones han sido de gran importancia desde los comienzos de esta industria [2].

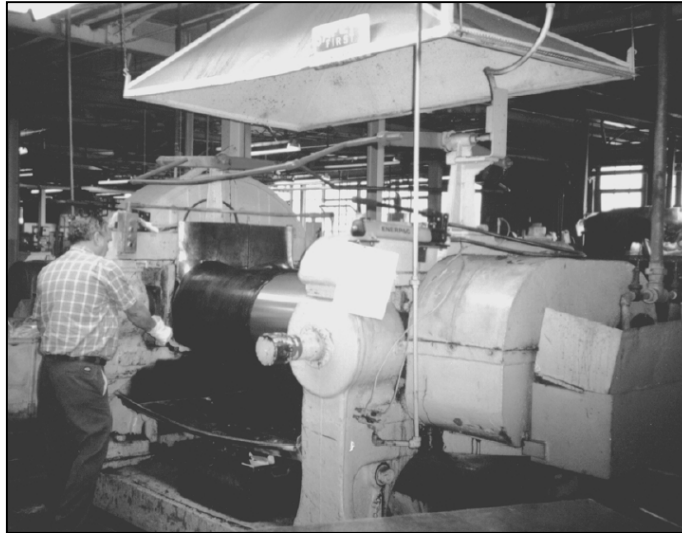


Figura 1-2-2. Campana de aspiración sobre máquina extrusora antigua (1)

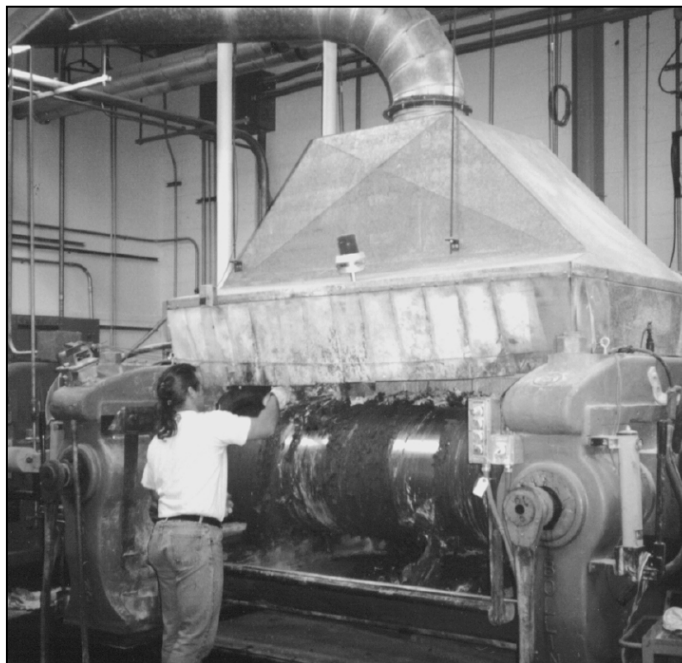


Figura 1-2-3. Campana de aspiración sobre máquina extrusora antigua (2)

En *mezclas*, hay gran variedad de sistemas de aspiración. Algunos de ellos, de elevada potencia, prestan servicio a varias máquinas, con tuberías de gran sección que transportan el producto aspirado. Otros son menos críticos y recuperan menos producto, con tuberías más pequeñas.

A modo esquemático, la **Figura 1-2-4** muestra un sistema de aspiración tipo. El sistema de tuberías se reparte entre distintas máquinas del proceso, llevando succión a los lugares oportunos. Antes del ventilador, hay un filtro que retiene buena parte de los productos succionados.

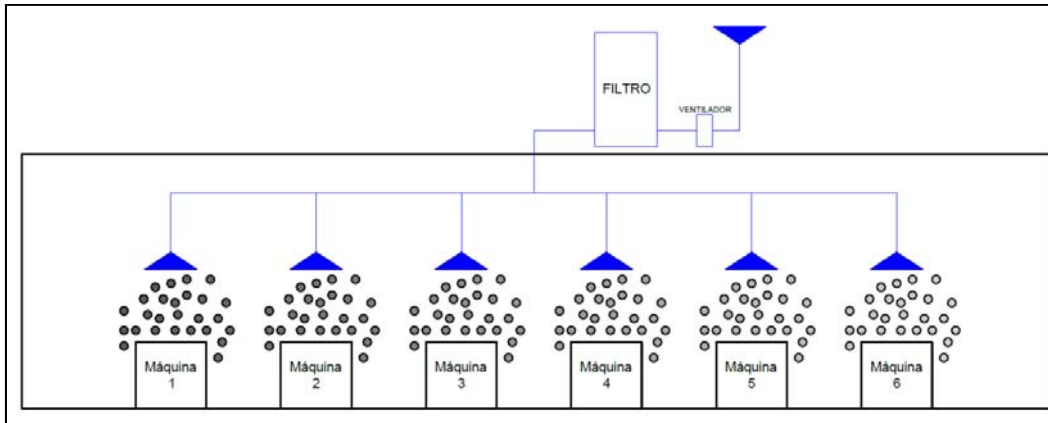


Figura 1-2-4. Aspiración tipo

En muchas ocasiones, los circuitos son un poco más complejos, con más de un ventilador y un filtro. El sistema de la **Figura 1-2-5**, con dos ventiladores, dos filtros y una válvula de paso, ilustra esta posibilidad.

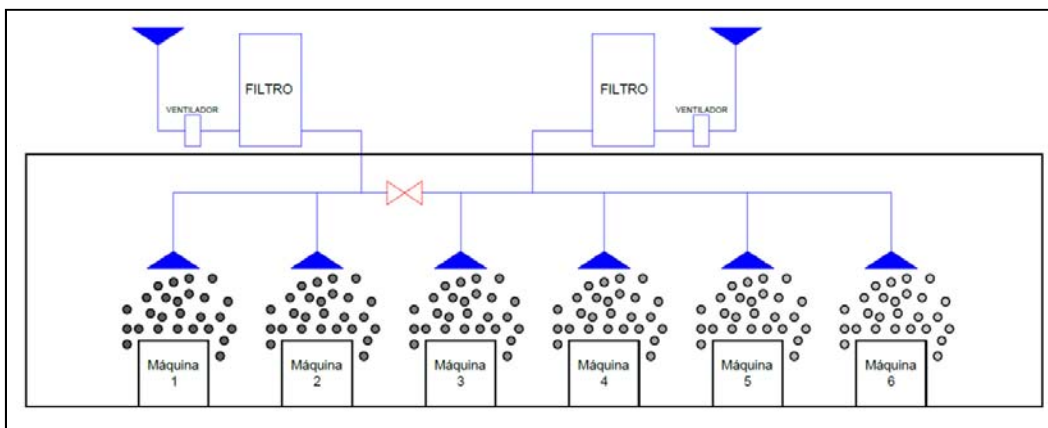


Figura 1-2-5. Aspiración tipo con más de un ventilador y un filtro

El número de ventiladores en funcionamiento y la posición de la válvula de paso determinan la configuración del sistema. Las válvulas suelen ser de tipo guillotina, como las mostradas en la **Figura 1-2-6**.

En los filtros, normalmente, el producto retenido puede ser reincorporado al proceso, manual o automáticamente. En el filtro de la **Figura 1-2-7**, la recuperación es manual, mediante una saca; en el de la **Figura 1-2-8**, es automática, mediante un tornillo sin fin en el interior de un conducto.

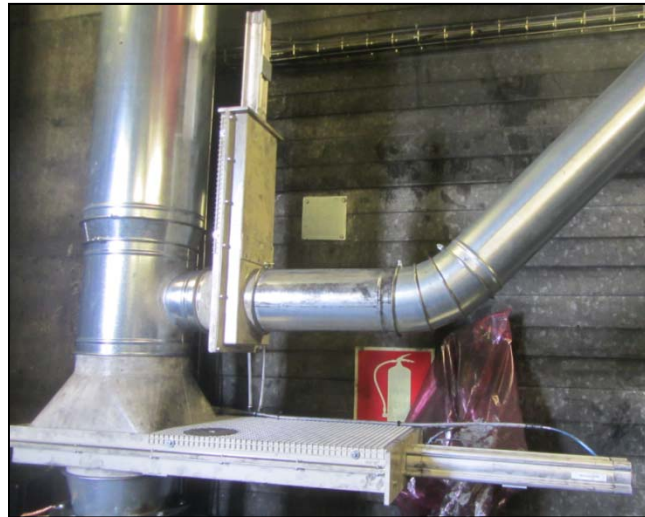


Figura 1-2-6. Válvulas guillotina



Figura 1-2-7. Recuperación manual de producto en caída de filtro



Figura 1-2-8. Recuperación automática de producto en caída de filtro

Interiormente, los filtros están constituidos por mangas que cuelgan y retienen el producto succionado. Mediante sopladors de aire, automáticos, las mangas se limpian y el producto retenido se deposita en la caída del filtro. La **Figura 1-2-9** corresponde a un filtro listo para montar. En él, se pueden observar los orificios bajo los que cuelgan las mangas.



Figura 1-2-9. Filtro sin montar con zoom en los orificios bajo los que cuelgan las mangas

Los ventiladores se accionan mediante motores eléctricos, y funcionan de continuo durante el desarrollo de la producción. En la **Figura 1-2-10**, se muestran dos ventiladores, uno montado y otro sin montar, y los motores eléctricos que los accionan.



Figura 1-2-10. Ventiladores accionados por motores eléctricos

El plano de la **Figura 1-2-11** es el diseño completo de una determinada aspiración. Se señalan los diámetros de las tuberías y las características del motor que mueve el ventilador. En *mezclas*, hay varios sistemas de aspiración como éste. En la **Figura 1-2-12**, se muestra parte de la instalación de este diseño.

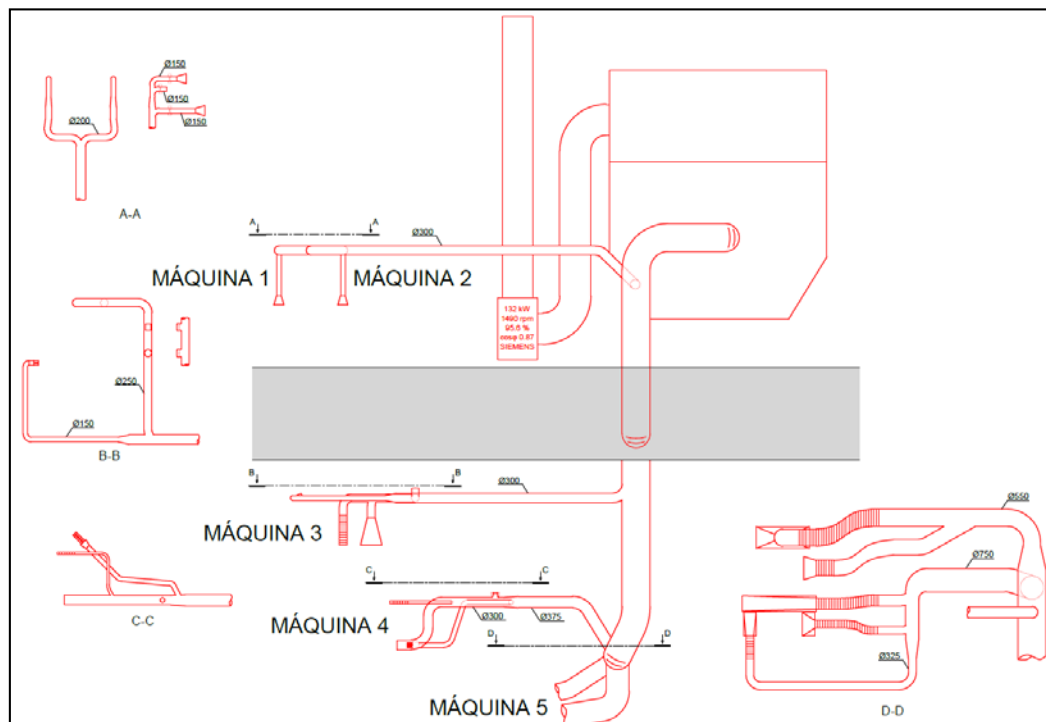


Figura 1-2-11. Diseño completo de una determinada aspiración



Figura 1-2-12. Parte de la instalación del diseño de la *Figura 2-11*

En prácticamente cualquier industria se pueden encontrar circuitos de aspiración. No obstante, en la industria química la aspiración cobra una función determinante, y en Michelin, la recuperación de producto que se lleva a cabo en la actividad *mezclas* con estos sistemas, es vital para el correcto funcionamiento de la factoría.

1.3. Mantenimiento actual de las aspiraciones en Michelin

Las aspiraciones requieren un seguimiento continuo para su correcto funcionamiento. Disponen de consignas, automáticas, que indican el estado del sistema. Tres son los problemas más acusados: **colmatación de mangas, apelmazamiento en la caída y obstrucción de conductos.**

Colmatación de mangas

Pese a la limpieza automática por soplados, con el tiempo, las mangas terminan colmatándose. Es necesario, entonces, parar la aspiración y abrir el filtro para cambiarlas por otras nuevas. Se coloca un sensor de presión diferencial que envía una consigna cuando es necesario realizar este mantenimiento. La *Figura 1-3-1* muestra el funcionamiento de este sistema.

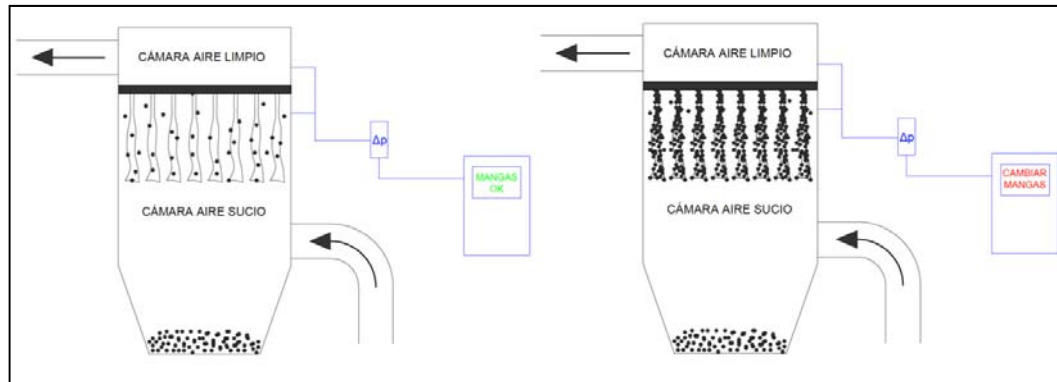


Figura 1-3-1. Colmatación de mangas

El sensor determina la diferencia de presión entre la cámara de aire sucio y la de limpio. Según se ensucian las mangas, la diferencia aumenta. Cuando el valor supera un cierto límite, el automático muestra la orden de cambiar mangas.

Apelmazamiento en la caída

Otro problema típico es el apelmazamiento en la caída. Cuando hay mucho producto almacenado en el fondo, puede que se apelmace y se haga difícil su evacuación. Cuando esto ocurre, el motor que mueve el mecanismo que evacúa el producto realiza mucho esfuerzo. Cuando el consumo de este motor supera un cierto límite, se hace saltar una consigna y se corta la alimentación. Se realiza, entonces, limpieza manual, mediante aberturas preparadas a tal fin, sin tener que parar la aspiración. La **Figura 1-3-2** ilustra este procedimiento.

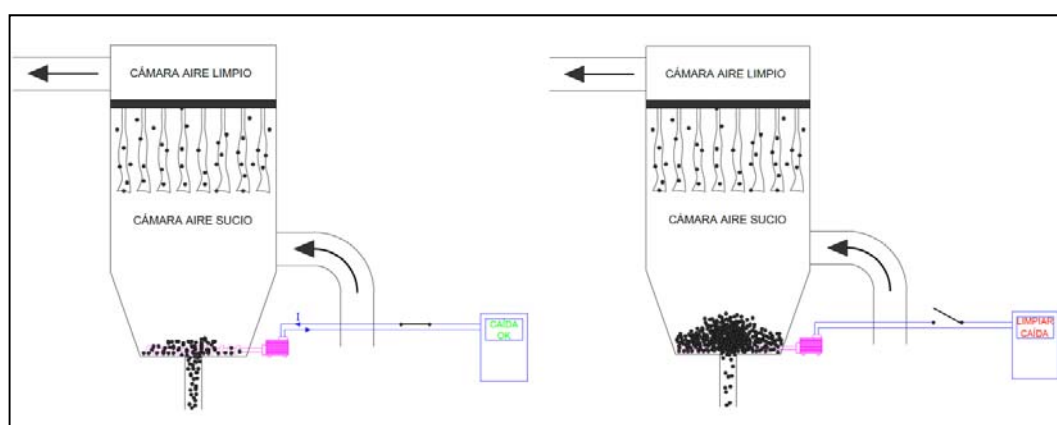


Figura 1-3-2. Apelmazamiento en la caída

Una vez se ha retirado el exceso de producto, se vuelve a poner en marcha el mecanismo de evacuación. Normalmente es un interruptor térmico el que corta la alimentación del motor.

Obstrucción de conductos

La obstrucción de conductos es el problema más engorroso en los sistemas de aspiración. Con el tiempo, las tuberías ven disminuida su sección, debido a la acumulación de sedimentos, como se muestra en las **Figuras 1-3-3 y 1-3-4**.

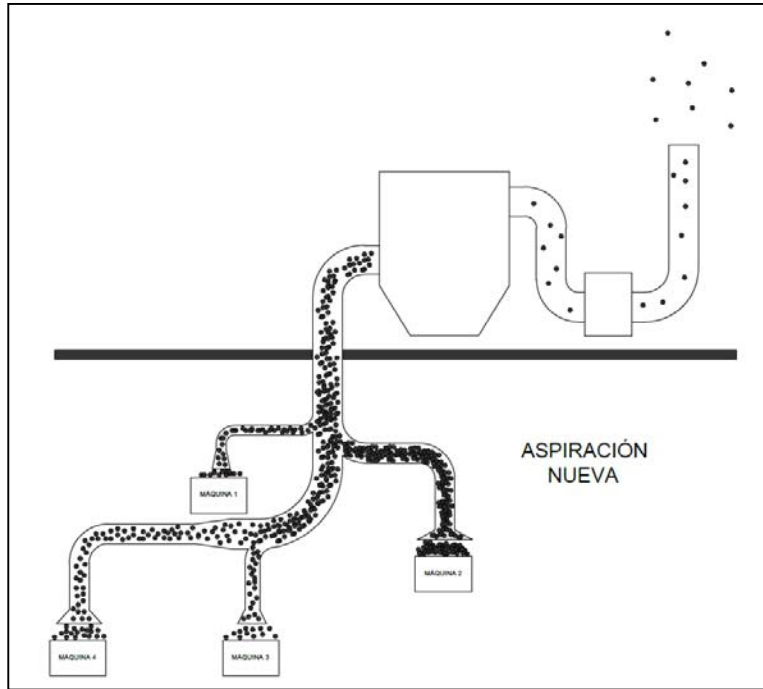


Figura 1-3-3. Obstrucción de conductos aspiración nueva

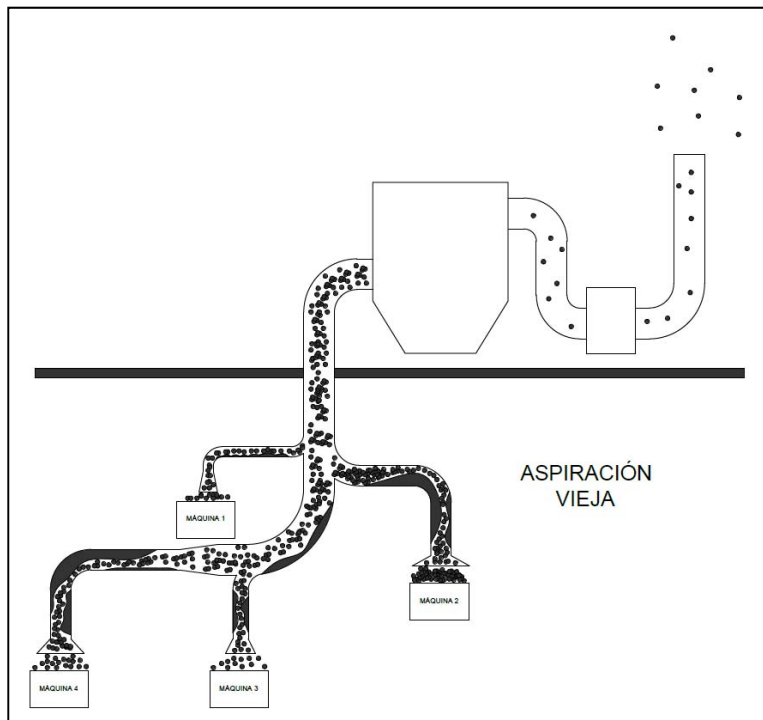


Figura 1-3-4. Obstrucción de conductos aspiración vieja

La experiencia dicta que las obstrucciones más severas tienen lugar en las cercanías de las zonas de captación, ya que es, en estas zonas, donde el producto está más caliente y húmedo.

Este problema tiene difícil solución. Actualmente, se lleva a cabo el siguiente mantenimiento: se realizan mediciones de velocidad, con un tubo de Pitot, y se determina dónde puede haber una obstrucción. Para ilustrar el procedimiento, considérense los conductos mostrados en la **Figura 1-3-5**, correspondientes a un par de puntos de captación de una aspiración.

Las pérdidas de carga en una tubería responden a la siguiente ecuación:

$$h_L = f \frac{L v^2}{D 2g} + K \frac{v^2}{2g}$$

Y es sabido que en tuberías en paralelo las pérdidas de carga se igualan:

$$h_{L1} = h_{L2}$$

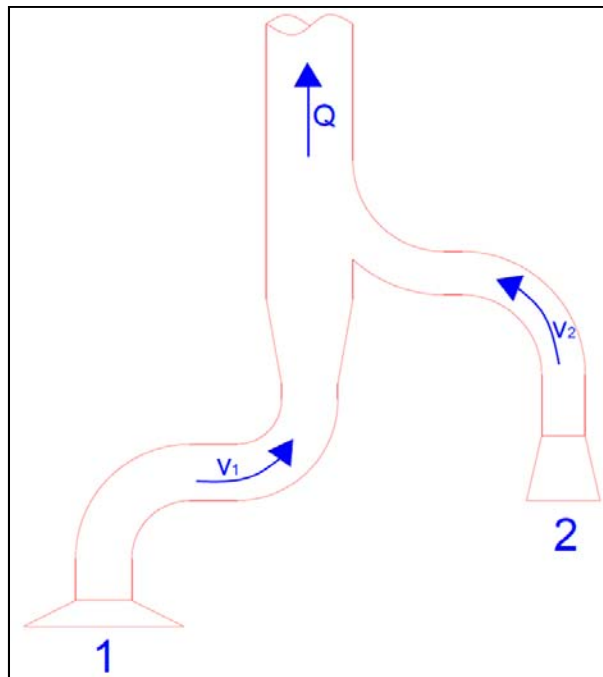


Figura 1-3-5. Dos puntos de captación de una aspiración

Si se realiza una medición de v_1 y v_2 recién instalado el sistema, se obtienen las velocidades con la aspiración limpia, $v_{1limpia}$ y $v_{2limpia}$, que son las velocidades de referencia.

Con el tiempo, los conductos se van obstruyendo, y estas velocidades cambian para igualar las pérdidas de carga. Si se ignoran las pérdidas locales (segundo factor), y se considera que el efecto de una obstrucción es una disminución de la sección de la tubería y un aumento del factor de fricción, hay dos posibilidades:

$$h_{L1limpia} = h_{L2limpia}$$

$$f_{1limpia} \frac{L_1}{D_{1limpia}} \frac{v_{1limpia}^2}{2g} = f_{2limpia} \frac{L_2}{D_{2limpia}} \frac{v_{2limpia}^2}{2g}$$

$$\left(\frac{v_{1limpia}}{v_{2limpia}} \right)^2 = \frac{L_2}{L_1} \frac{D_{1limpia}}{f_{1limpia}} \frac{f_{2limpia}}{D_{2limpia}} = k \frac{D_{1limpia}}{f_{1limpia}} \frac{f_{2limpia}}{D_{2limpia}}$$

Obstrucción en 1

$$\frac{D_{1obstrucción\ en\ 1}}{f_{1obstrucción\ en\ 1}} < \frac{D_{1limpia}}{f_{1limpia}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_{1obstrucción\ en\ 1} < v_{1limpia} \\ v_{2obstrucción\ en\ 1} > v_{2limpia} \end{array} \right\}$$

Obstrucción en 2

$$\frac{f_{2obstrucción\ en\ 2}}{D_{2obstrucción\ en\ 2}} < \frac{f_{2limpia}}{D_{2limpia}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_{1obstrucción\ en\ 2} > v_{1limpia} \\ v_{2obstrucción\ en\ 2} < v_{2limpia} \end{array} \right\}$$

Es decir, en el ramal en el que hay una obstrucción, la velocidad baja, aumentando en el otro. Este resultado es generalizable a un número cualquiera de ramales: **la velocidad baja en los ramales obstruidos y aumenta en el resto.**

Por tanto, si se miden las velocidades y se comparan con $v_{1limpia}$ y $v_{2limpia}$, se puede determinar dónde hay una obstrucción. **En la práctica, el descenso de velocidad en el ramal obstruido es más notable que el aumento de velocidad en los otros ramales.**

No se ha tenido en cuenta que un aumento de las pérdidas de carga hace que el caudal global disminuya. Es decir, se ha considerado:

$$Q_{obstrucción} = Q_{limpia}$$

Puesto que lo explicado es extrapolable a un número cualquiera de ramales, es extrapolable a todo un circuito de aspiración. El mantenimiento que se lleva a cabo actualmente, consiste en comparar, **cada 6 meses**, la velocidad actual en los ramales con la velocidad en ellos recién instalada la aspiración. En la **Figura 1-3-6**, se muestran los datos obtenidos para un determinado sistema.

(en m/s)

FECHA	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5
12/09/2016*	16.9	20.8	16.9	19	20
03/04/2017	5.5	22.3	14.3	14	20

* Recién instalada la aspiración

Figura 1-3-6. Mantenimiento actual obstrucciones conductos (1)

Con estos datos, la conclusión a 03/04/2017 fue que el ramal de **PT1** tenía algún problema, por lo que se generó una consigna de limpieza de esa zona. El correspondiente a **PT4** también parecía tener algún inconveniente, pero la experiencia dicta que las consignas de limpieza deben enviarse de mayor a menor magnitud de obstrucción.

La **Figura 1-3-7** recoge los datos obtenidos para otro determinado sistema de aspiración.

(en m/s)

FECHA	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6	PT7	PT8
02/12/2016	4.5	26.4	24.8	22.4	9	5.2	16.8	18.5
23/02/2017	4.2	25.1	24.4	17	13.1	13.3	14.1	16.2

Figura 1-3-7. Mantenimiento actual obstrucciones conductos (2)

En este caso, no se disponía de valores de referencia. En diciembre, se mandó limpiar el ramal correspondiente al punto **PT6**; las medidas posteriores parecieron indicar que los problemas habían desaparecido en esa zona. El ramal del punto **PT1** se mandó limpiar en febrero. La siguiente recogida de datos determinaría el efecto de esa acción, y si había que realizar alguna otra.

Para determinar la velocidad en los ramales, se utiliza un medidor de presión diferencial, marca **TESTO**, al que se acopla un tubo de Pitot, **Figura 1-3-8**. El tubo se introduce por taladros hechos en los ramales y se posiciona enfrente al aire, **Figura 1-3-9**, procurando mantener la perpendicularidad durante el proceso de medición.

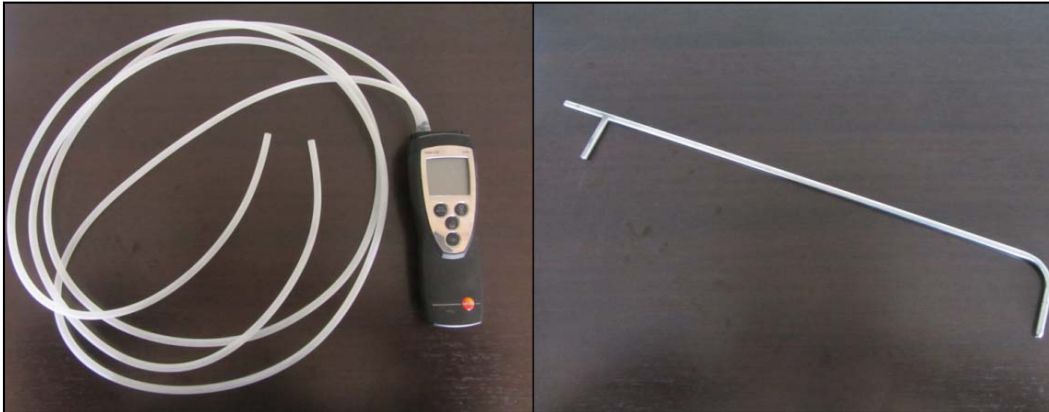


Figura 1-3-8. Medidor **TESTO** y tubo de Pitot



Figura 1-3-9. Medición con tubo de Pitot enfrente al aire

En función del diámetro de la tubería, se toman 3 ó 4 valores de velocidad, a diferente distancia radial del centro. Se hace la media y el valor resultante es el que se anota.

1.4. Justificación del mantenimiento de las aspiraciones

El mal estado de las aspiraciones empeora la calidad del proceso. Además, el gasto de estos sistemas entre instalación, funcionamiento y mantenimiento es elevado. Por todo ello, su seguimiento periódico es de gran importancia.

El problema de obstrucción de conductos es el más difícil de atajar. Normalmente, las aspiraciones se cambian cada cierto tiempo debido a que, con el paso de los años, quedan muy deterioradas. **Su mantenimiento hace que alarguen su vida útil, disminuyendo, de este modo, los costes de instalación.** En la **Figura 1-4-1**, se muestra un conducto de aspiración de un sistema viejo.



Figura 1-4-1. Conducto de aspiración de sistema viejo

Los sistemas se proyectan para que funcionen en la región de máximo rendimiento. En la **Figura 1-4-2**, se muestran las curvas características de un ventilador y su punto de funcionamiento.

El punto de funcionamiento lo determina la intersección entre la curva de trabajo del ventilador y la curva de la instalación. Como en la figura, debe hallarse en la zona de máximo rendimiento.

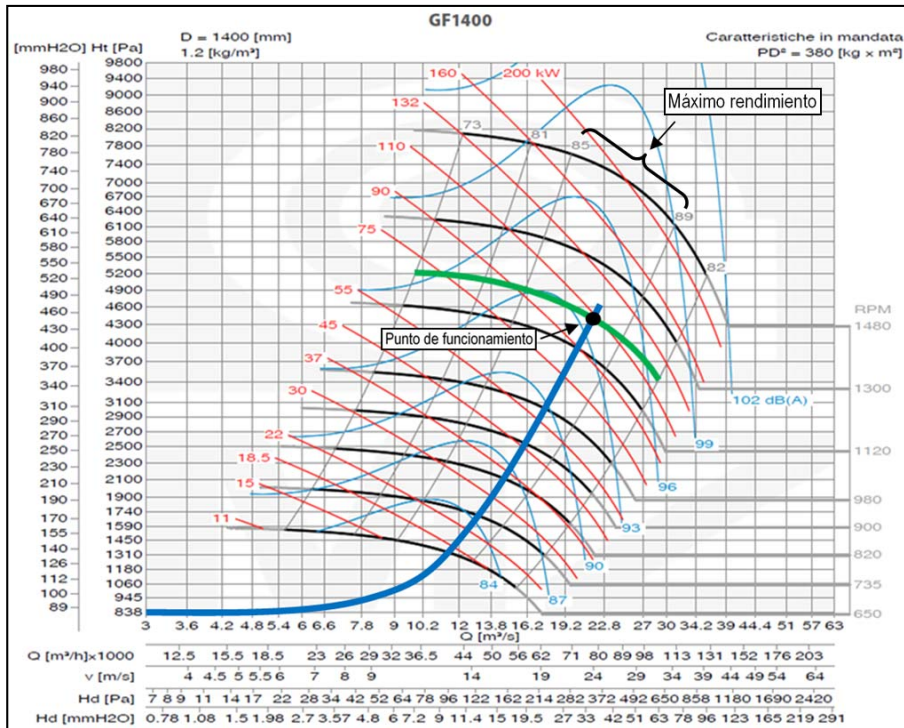


Figura 1-4-2. Punto de funcionamiento ventilador

A medida que los conductos se obstruyen, aumentan las pérdidas de carga del sistema, y la curva de la instalación se desplaza hacia la izquierda, tal y como se muestra en la **Figura 1-4-3**.

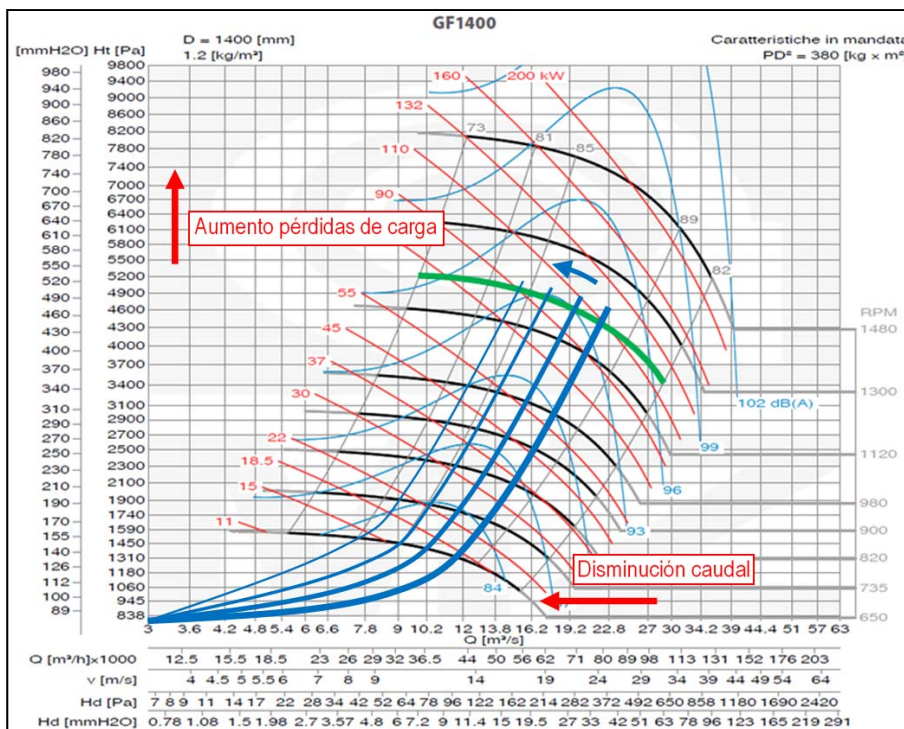


Figura 1-4-3. Consecuencias de la obstrucción de conductos

De este modo, el punto de funcionamiento se desplaza hacia zonas de bajo rendimiento. Esto, además, se traduce en una disminución del caudal, lo que implica una menor recuperación de producto. **Con el mantenimiento de los conductos de aspiración, se pretende que el punto de funcionamiento se mantenga en la región de máximo rendimiento y el caudal no disminuya.**

2. Objetivos del presente proyecto

El método actual para el mantenimiento de los conductos de aspiración funciona con suficiencia. Se trata de un método sencillo, barato y eficaz. En él, juega un papel muy importante la pericia del usuario, pues los datos deben ser interpretados, pero esto es algo intrínseco al problema de obstrucción de conductos.

Sin embargo, **la toma de datos es tediosa**. En *mezclas*, existe un gran número de sistemas de aspiración, con un gran número de ramales en casi todos ellos. Tomar medidas en todos los puntos puede resultar una tarea muy pesada.

Además, muchos de los conductos están en altura, **Figura 2-1**, por lo que es necesario el uso de escaleras o de carretillas elevadoras para la toma de datos. A esto se le suma la obligación del uso de arnés, cuando se realizan trabajos a partir de metro y medio del suelo.

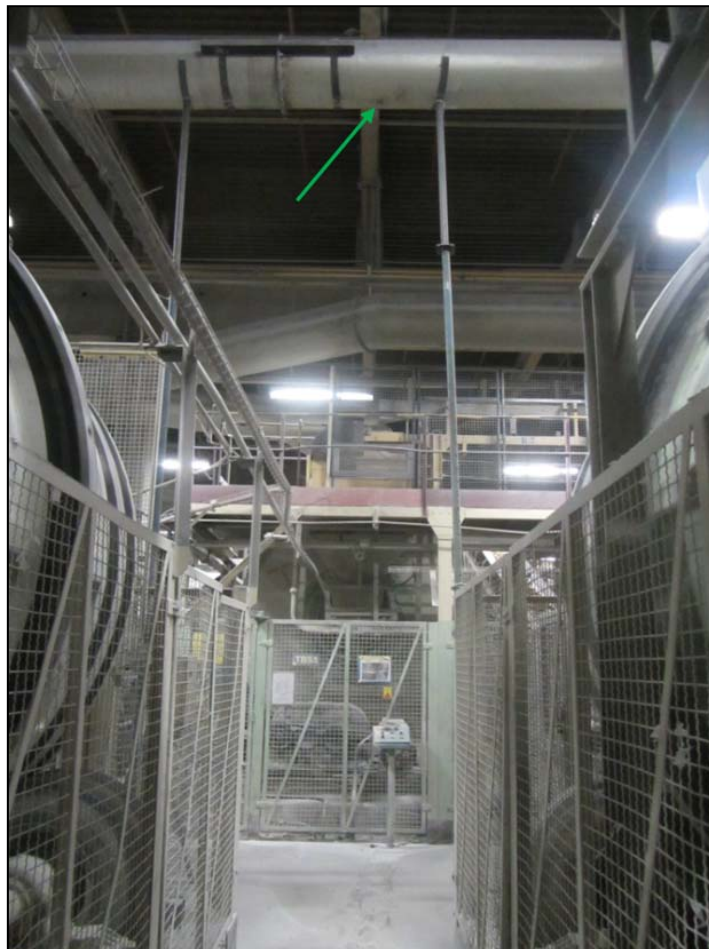


Figura 2-1. Punto de medición en altura

La toma de datos es, en consecuencia, un proceso engorroso, mecánico, que quita mucho tiempo al operario para realizar otras tareas.

Más importante aún, es que **el periodo entre muestreos es de 6 meses**. En este intervalo, pueden surgir muchos problemas en la aspiración, por lo que no se está recopilando toda la información que se debiera. **Esto demanda un sistema que permita recopilar datos en tiempo real, y conocer, de este modo, el estado de la aspiración en todo momento.**

El propósito principal del presente proyecto es diseñar un método automatizado que permita realizar un mantenimiento predictivo de los sistemas de aspiración, determinando dónde puede haber conductos obstruidos.

Con ello, también se pretende realizar un estudio exhaustivo de los circuitos de aspiración de la actividad *mezclas*, llegando a comprender en profundidad los fenómenos físicos que intervienen en este tipo de sistemas.

No se tiene constancia de ninguna aplicación que dé solución a la cuestión planteada.

3. Metodología

3.1. Estudio de solución por velocidades

La opción más natural fue la que se consideró inicialmente: colocar unos velocímetros en los puntos de medición que permitan conocer las velocidades en tiempo real.

El concepto sería el mismo que el utilizado en el mantenimiento actual, luego el trabajo radicaría en encontrar el velocímetro idóneo. Se realizó, de este modo, una revisión de los sensores existentes en el mercado, a fin de encontrar el adecuado en cuanto a características y precio [3, 4 y 5].

En general, los velocímetros que se estudiaron pueden dividirse en dos grupos: convencionales y no convencionales. A continuación, se detallan y valoran los aspectos fundamentales de todos ellos.

VELOCÍMETROS CONVENCIONALES

Tubo de Pitot

La mayoría de aparatos para determinar la velocidad de un fluido hace uso del tubo de Pitot. Con él, por ejemplo, los aviones calculan su marcha, determinando la velocidad relativa del aire que atraviesan.

Según la aplicación, el tubo de Pitot se usa de diferente manera. Para un gas que circula por una tubería, la **Figura 3-1-1** muestra el montaje requerido [6].

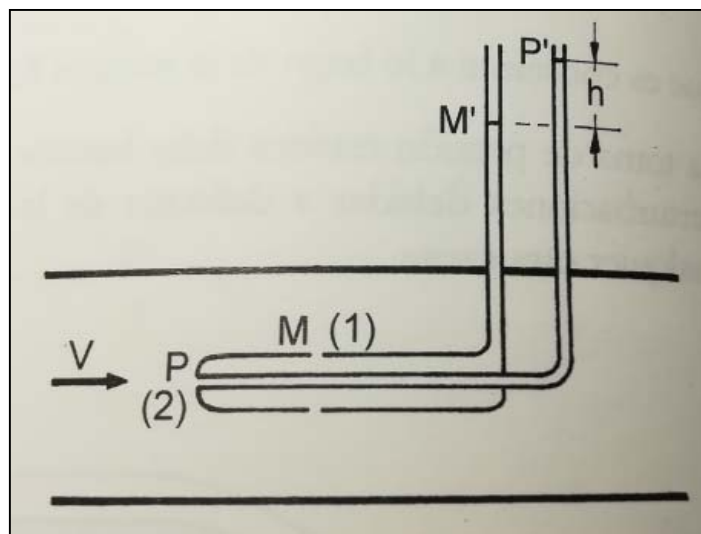


Figura 3-1-1. Tubo de Pitot para gas en una tubería

En el punto de remanso (2) la velocidad se hace nula. Si se aplica la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + U_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + U_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_2 = 0 \\ U_1 = U_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho}$$

$$v_1 = v = \sqrt{2 \frac{p_2 - p_1}{\rho}}$$

La diferencia de presión entre los puntos (2) y (1) puede determinarse conectando un sensor de presión diferencial a los puntos M' y P'. Efectivamente, el medidor **TESTO** utilizado en el mantenimiento actual utiliza este principio.

En cualquier caso, este método tiene el mismo problema que tienen las aspiraciones: **la obstrucción del tubo de Pitot**. Se trata de un tubo calibrado, luego si entra suciedad dentro de él, termina marcando erróneamente. La experiencia dicta que esto sucede, ya que, en muchas ocasiones, es necesario limpiar el tubo del medidor **TESTO** durante un proceso de toma de datos.

Velocímetros de noria

Los velocímetros de noria han sido ampliamente usados en la industria. Son velocímetros sencillos, que utilizan un concepto físico básico. La **Figura 3-1-2** muestra un instrumento de este tipo.

El aire, a su paso, hace mover un eje. Con las conversiones matemáticas oportunas, se determina fácilmente la velocidad lineal del fluido.

Lo cierto, es que esta clase de velocímetro tampoco es adecuada para las aspiraciones. En su día, se realizaron pruebas con un aparato de este tipo y los resultados fueron negativos, pues **el eje rápidamente se ensuciaba y el sensor marcaba valores erróneos**.

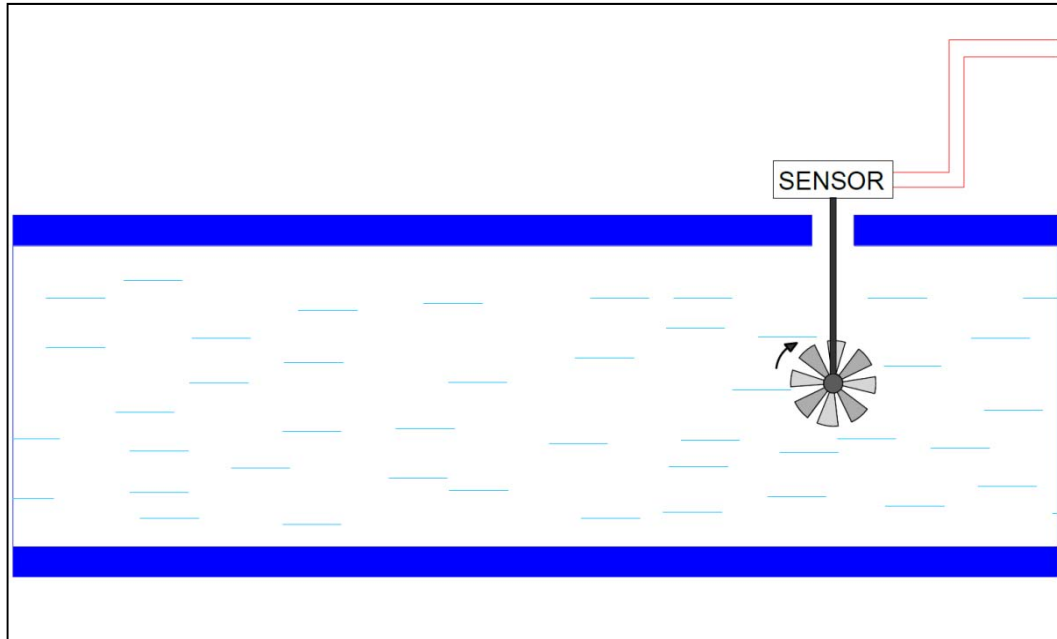


Figura 3-1-2. Velocímetros de noria

Velocímetros de diafragma

En los velocímetros de diafragma, se hace pasar el fluido por una zona estrechada, el diafragma. El sensor se calibra, entonces, estableciendo una relación lineal entre la pérdida de presión en esta zona y la velocidad del fluido. Se lee, de este modo, el Δp , y con esta relación se determina la velocidad. La **Figura 3-1-3** trata de ilustrar este concepto.

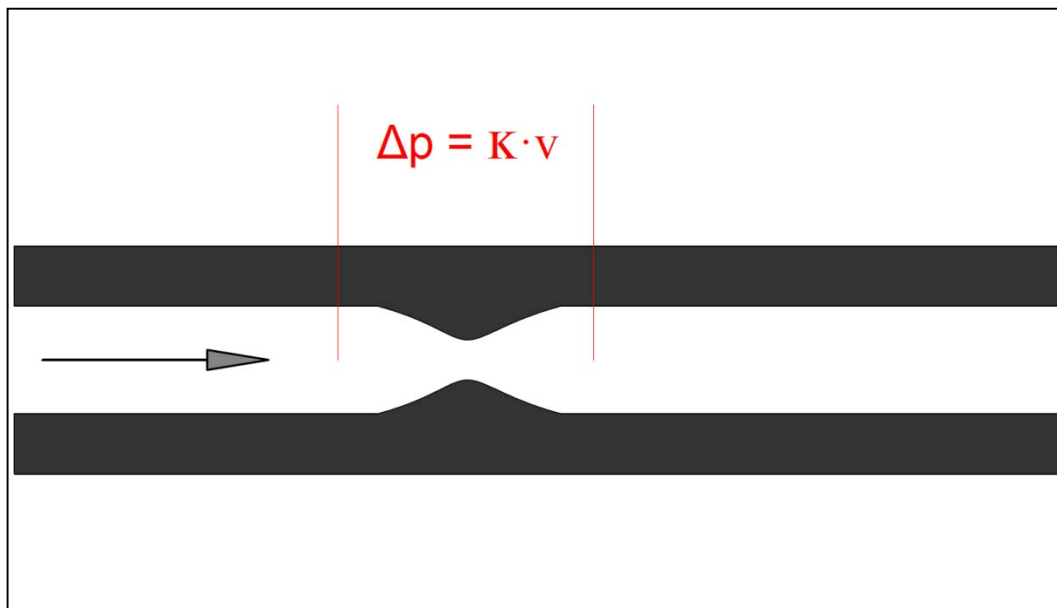


Figura 3-1-3. Velocímetros de diafragma

Estos instrumentos tampoco son los adecuados para los conductos de las aspiraciones. El problema es el mismo que el del tubo de Pitot, **la obstrucción del diafragma**. Con el tiempo, esta zona cogerá suciedad, haciendo errónea la relación lineal que se estableció cuando el aparato fue calibrado.

Velocímetros de hilo caliente

Los velocímetros de hilo caliente determinan la velocidad del fluido en función de la temperatura de un hilo metálico caliente inmerso en el medio, que se enfría por la convección que el fluido ejerce sobre él, tal y como muestra la **Figura 3-1-4**.

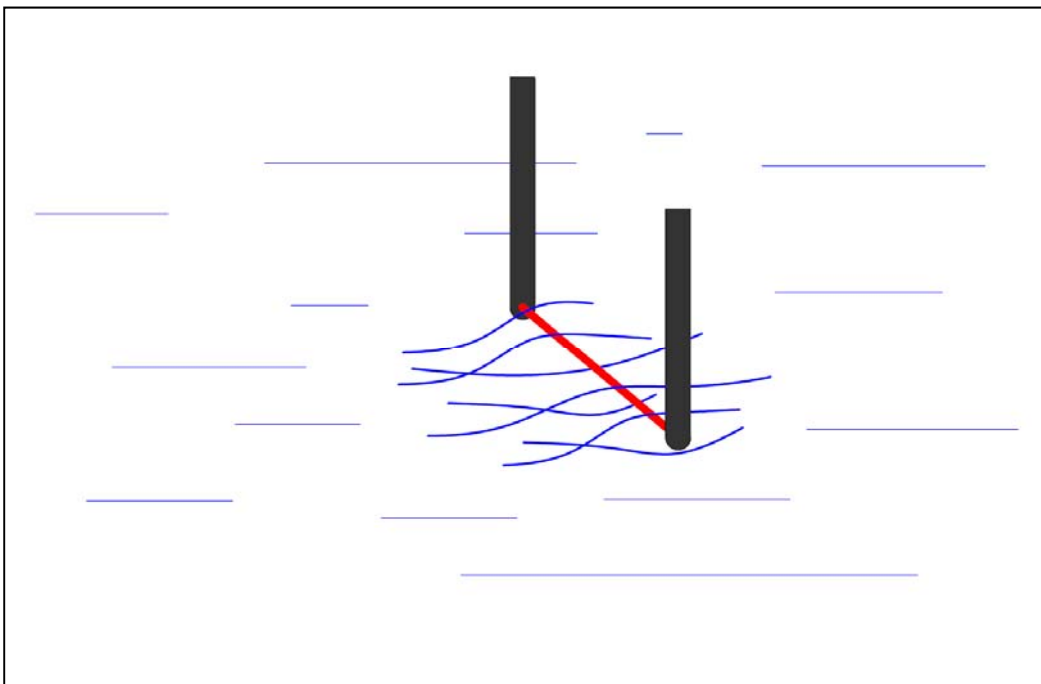


Figura 3-1-4. Velocímetros de hilo caliente

Estos sensores tampoco son adecuados para las aspiraciones, pues **el hilo se cubre de suciedad y la convección pierde su efecto**. Ya se ha realizado alguna prueba al respecto.

VELOCÍMETROS NO CONVENCIONALES

Existen velocímetros muy sofisticados capaces de funcionar con normalidad en cualquier medio. Por ejemplo, los velocímetros usados en tubos de escape de coches.

Muchos de estos instrumentos utilizan ondas que hacen rebotar en el fluido, como se muestra en la **Figura 3-1-5**.

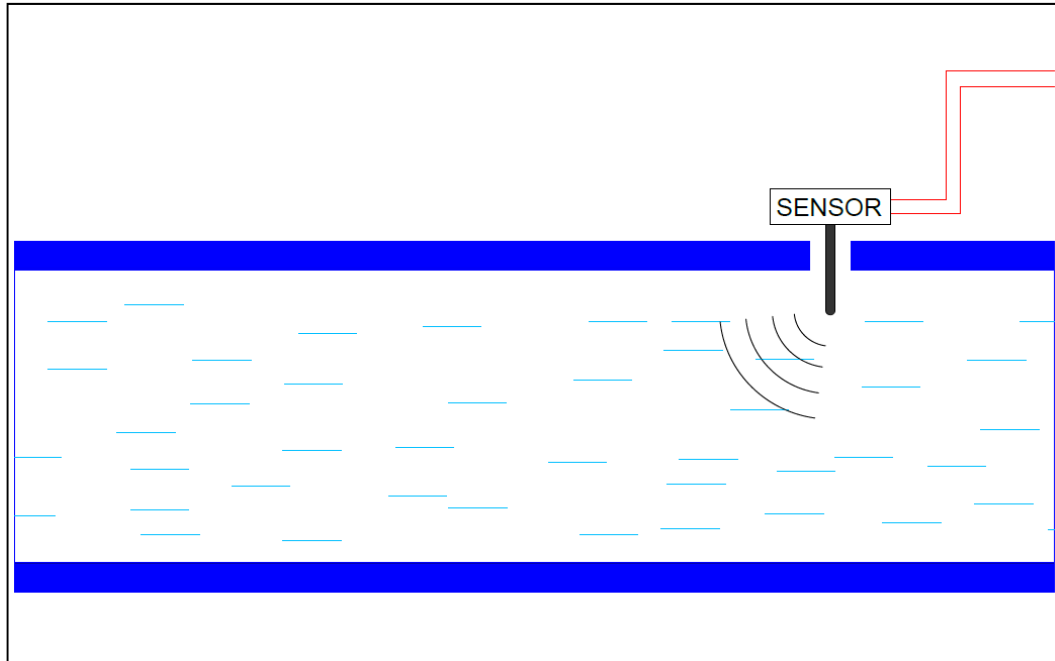


Figura 3-1-5. Velocímetros no convencionales

En función de cómo regresa la onda al sensor, el aparato es capaz de determinar la velocidad del fluido, bien sea por la energía de la señal, por el efecto Doppler o por algún otro principio ingenioso.

En cualquier caso, **estos velocímetros son caros para el propósito que se plantea en este proyecto. Por ello, su utilización queda descartada.**

Tras analizar toda la serie de velocímetros expuesta, la conclusión fue que **la solución por velocidades no es posible, pues no parecen existir velocímetros, económicamente viables, que tengan las funcionalidades requeridas.**

3.2. Estudio de solución por presiones

Se empezó a considerar una solución por presiones, que vino motivada por los sensores de presión diferencial que controlan la colmatación de las mangas en los filtros, pues funcionan correctamente pese a que una de sus tomas va a aire sucio.

Con presiones, sin embargo, no existe un concepto tan intuitivo como el utilizado con velocidades. Resulta difícil imaginar qué variaciones pueden darse, a causa de una obstrucción, en las presiones de una aspiración.

Se decidió realizar una simulación, a fin de localizar un patrón en la repartición de presiones que diera lugar a una solución.

Las tomas de aspiración se simulan por medio de reservorios. Como se ve en la figura, en cada máquina, se suele aspirar en varias partes. El reservorio situado junto al ventilador es la salida del aire aspirado.

En el modelo, los diámetros introducidos para las tuberías son reales, no así las longitudes, que son aproximadas, al igual que las alturas de captación. En cualquier caso, la reproducción exacta del sistema no es lo interesante, sino las conclusiones que se pueden sacar del modelo.

EPANET resuelve el balance clásico de masa y energía de la mecánica de fluidos:

Masa

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho dV + \int_S \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0$$

Energía mecánica

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + u \right) dV + \int_S \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + u \right) (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_S -p \vec{n} \cdot \vec{v} dS + \Phi_V + \dot{W}$$

4. Resultados

4.1. Simulaciones EPANET

El programa calcula velocidades y presiones, entre otros, en todos los puntos del sistema, mediante la resolución del balance de masa y energía de la mecánica de fluidos. La **Figura 4-1-1** muestra esta circunstancia, con sendas leyendas.

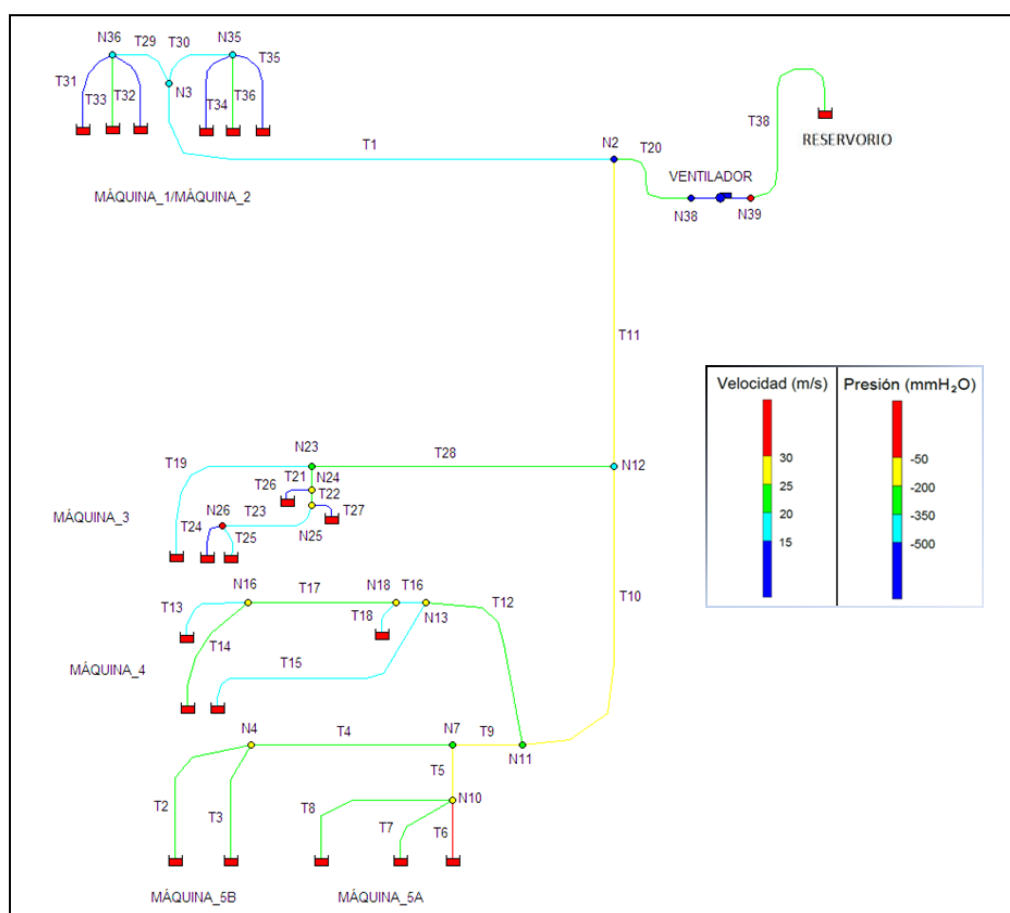


Figura 4-1-1. Velocidades y presiones en modelo EPANET

Las presiones son manométricas. Puesto que se succiona, el ventilador genera una depresión en su entrada, nodo **N38**, que se reparte por los distintos ramales, proporcionalmente a la sección, longitud y altura de cada uno de ellos.

Las campanas de aspiración toman el aire a presión atmosférica, de ahí que todos los reservorios se marquen en rojo. El ventilador también devuelve el aire a la atmósfera.

Cuantitativamente, las presiones en los diferentes nodos son las indicadas en la *Figura 4-1-2*.

NODO	PRESIÓN (mmH ₂ O)	RAMAL
N4	-146,38	MÁQUINAS_5A/B
N7	-226,68	
N10	-146,81	
N11	-254,68	MÁQUINA_4
N13	-206,77	
N16	-143,75	
N18	-204,14	
N12	-480,92	MÁQUINA_3
N23	-319,89	
N24	-106,77	
N25	-101,96	
N26	-42,23	
N2	-632,99	MÁQUINAS_1/2
N3	-493,39	
N35	-473,48	
N36	-473,48	
N38	-607,61	VENTILADOR
N39	192,33	

Figura 4-1-2. Presiones modelo EPANET

Es posible incluir, en el modelo, obstrucciones hipotéticas, disminuyendo la sección de las tuberías o aumentando mucho su longitud, por ejemplo. En la *Figura 4-1-3*, se muestran, de nuevo, las presiones en los nodos, pero esta vez con obstrucciones hipotéticas en las tuberías *T14* y *T23*.

La repartición de presiones ha cambiado, como cabía esperar. Si se comparan los valores de la *Figura 4-1-2* con los de la *Figura 4-1-3*, los resultados son los mostrados en la *Figura 4-1-4*.

En los nodos cercanos a las tuberías obstruidas, las presiones cambian notablemente, no siendo así en el resto. Se observa, en más detalle, que los cambios en *N16* y *N25* son los más acusados. El de *N16* indica que hay problemas en *T13* o *T14*, y el de *N25*, que los hay en *T23*, si se considera la diferencia positiva en *N26*.

NODO	PRESIÓN (mmH ₂ O)	RAMAL
N4	-155,79	MÁQUINAS_5A/B
N7	-239,59	
N10	-156,22	
N11	-269,56	MÁQUINA_4
N13	-279,19	
N16	-263,65	
N18	-278,31	
N12	-494,05	MÁQUINA_3
N23	-366,71	
N24	-217,49	
N25	-215,08	
N26	-23,85	
N2	-644,15	MÁQUINAS_1/2
N3	-502,15	
N35	-481,80	
N36	-481,80	
N38	-617,67	VENTILADOR
N39	191,23	

Figura 4-1-3. Presiones modelo EPANET con obstrucciones hipotéticas en T14 y T23

NODO	Figura 4-1-2	Figura 4-1-3	DIFERENCIA (%)	RAMAL
N4	-146,38	-155,79	-6,43	MÁQUINAS_5A/B
N7	-226,68	-239,59	-5,70	
N10	-146,81	-156,22	-6,41	
N11	-254,68	-269,56	-5,84	MÁQUINA_4
N13	-206,77	-279,19	-35,02	
N16	-143,75	-263,65	-83,41	
N18	-204,14	-278,31	-36,33	
N12	-480,92	-494,05	-2,73	MÁQUINA_3
N23	-319,89	-366,71	-14,64	
N24	-106,77	-217,49	-103,70	
N25	-101,96	-215,08	-110,95	
N26	-42,23	-23,85	43,52	
N2	-632,99	-644,15	-1,76	MÁQUINAS_1/2
N3	-493,39	-502,15	-1,78	
N35	-473,48	-481,80	-1,76	
N36	-473,48	-481,80	-1,76	
N38	-607,61	-617,67	-1,66	VENTILADOR
N39	192,33	191,23	0,57	

Figura 4-1-4. Comparación presiones modelo EPANET

En la práctica, no es necesaria tanta precisión. Basta con determinar si un ramal tiene problemas, no la tubería en que hay una obstrucción. Por ello, con un valor por ramal puede ser suficiente. La **Figura 4-1-5** muestra el modelo **EPANET** con los puntos de medición que se consideran oportunos, referenciados en él como **PTM**.

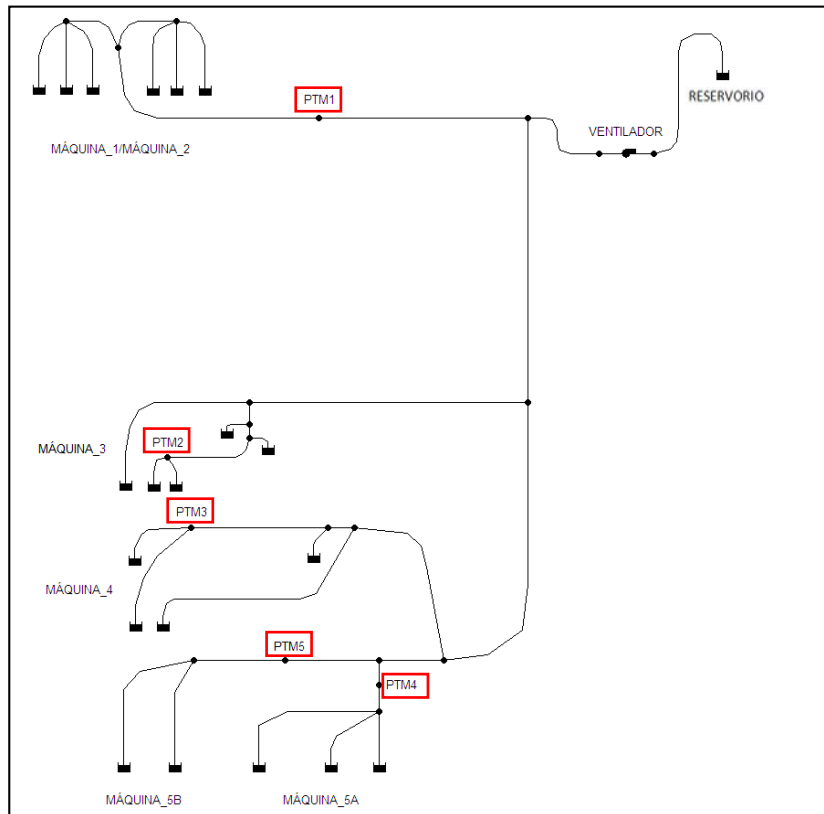


Figura 4-1-5. Modelo EPANET con puntos de medición reales

En la realidad, los puntos de medición deben situarse en tramos rectos, alejados de codos o zonas de confluencia. En el modelo, no es necesario tener esto en cuenta.

Sin obstrucciones, las presiones en los puntos **PTM** son las indicadas en la **Figura 4-1-6**.

NODO	PRESIÓN (mmH ₂ O)	RAMAL
PTM5	-186,64	MÁQUINAS_5A/B
PTM4	-186,86	
PTM3	-143,75	MÁQUINA_4
PTM2	-42,23	MÁQUINA_3
PTM1	-563,19	MÁQUINAS_1/2

Figura 4-1-6. Presiones en puntos **PTM** modelo EPANET

Con una obstrucción hipotética en una tubería cualquiera del ramal MÁQUINA_4, se tiene la repartición de presiones mostrada en la *Figura 4-1-7*.

NODO	PRESIÓN (mmH ₂ O)	RAMAL
PTM5	-195,83	MÁQUINAS_5A/B
PTM4	-196,04	
PTM3	-261,68	MÁQUINA_4
PTM2	-42,88	MÁQUINA_3
PTM1	-570,63	MÁQUINAS_1/2

Figura 4-1-7. Presiones en puntos *PTM* modelo EPANET con obstrucción hipotética en ramal MÁQUINA_4

Al comparar las presiones de las *Figuras 4-1-6* y *4-1-7*, se obtienen los resultados de la *Figura 4-1-8*.

NODO	<i>Figura 4-1-6</i>	<i>Figura 4-1-7</i>	DIFERENCIA (%)	RAMAL
PTM5	-186,64	-195,83	-4,92	MÁQUINAS_5A/B
PTM4	-186,86	-196,04	-4,91	
PTM3	-143,75	-261,68	-82,04	MÁQUINA_4
PTM2	-42,23	-42,88	-1,54	MÁQUINA_3
PTM1	-563,19	-570,63	-1,32	MÁQUINAS_1/2

Figura 4-1-8. Comparación presiones en puntos *PTM* modelo EPANET (1)

La comparación es positiva, pues la diferencia observada en *PTM3* indica que hay algún problema en el ramal MÁQUINA_4. La obstrucción se había generado en *T17*.

Para una obstrucción hipotética en el ramal MÁQUINAS_5A/B, las presiones son las mostradas en la *Figura 4-1-9*.

NODO	PRESIÓN (mmH ₂ O)	RAMAL
PTM5	-229,74	MÁQUINAS_5A/B
PTM4	-212,02	
PTM3	-153,82	MÁQUINA_4
PTM2	-43,54	MÁQUINA_3
PTM1	-579,16	MÁQUINAS_1/2

Figura 4-1-9. Presiones en puntos *PTM* modelo EPANET con obstrucción hipotética en ramal MÁQUINAS_5A/B

La *Figura 4-1-10* muestra el resultado de comparar las presiones de las *Figuras 4-1-6* y *4-1-9*.

NODO	<i>Figura 4-1-6</i>	<i>Figura 4-1-9</i>	DIFERENCIA (%)	RAMAL
PTM5	-186,64	-229,74	-23,09	MÁQUINAS_5A/B
PTM4	-186,86	-212,02	-13,46	
PTM3	-143,75	-153,82	-7,01	MÁQUINA_4
PTM2	-42,23	-43,54	-3,10	MÁQUINA_3
PTM1	-563,19	-579,16	-2,84	MÁQUINAS_1/2

Figura 4-1-10. Comparación presiones en puntos *PTM* modelo EPANET (2)

La diferencia en *PTM5* indica que hay una obstrucción en el ramal *MÁQUINAS_5A/B*, más cercana a *MÁQUINA_5B*, en este caso. Efectivamente, la obstrucción se había generado en *T3*.

La *Figura 4-1-11* corresponde a las presiones con una nueva obstrucción hipotética, esta vez en el ramal *MÁQUINAS_1/2*.

NODO	PRESIÓN (mmH ₂ O)	RAMAL
PTM5	-188,61	MÁQUINAS_5A/B
PTM4	-188,82	
PTM3	-144,85	MÁQUINA_4
PTM2	-42,45	MÁQUINA_3
PTM1	-599,95	MÁQUINAS_1/2

Figura 4-1-11. Presiones en puntos *PTM* modelo EPANET con obstrucción hipotética en ramal *MÁQUINAS_1/2*

En la *Figura 4-1-12*, se muestra el resultado de comparar las presiones de las *Figuras 4-1-6* y *4-1-11*.

NODO	<i>Figura 4-1-6</i>	<i>Figura 4-1-11</i>	DIFERENCIA (%)	RAMAL
PTM5	-186,64	-188,61	-1,06	MÁQUINAS_5A/B
PTM4	-186,86	-188,82	-1,05	
PTM3	-143,75	-144,85	-0,77	MÁQUINA_4
PTM2	-42,23	-42,45	-0,52	MÁQUINA_3
PTM1	-563,19	-599,95	-6,53	MÁQUINAS_1/2

Figura 4-1-12. Comparación presiones en puntos *PTM* modelo EPANET (3)

Aunque la mayor diferencia se encuentra en el lugar conveniente, esta vez no es de gran magnitud. **Esto dio lugar a pensar que los resultados deben ser interpretados con cautela, pero no se considera que sea un inconveniente.** En realidad, en ese ramal las bocanetas están muy capadas, mediante llaves de paso manuales, por lo que las velocidades son bajas y las diferencias menores. En consecuencia, es algo que el operario puede prever.

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones, se concluyó que la solución por presiones era interesante. Las pruebas posteriores, dieron lugar a un conocimiento más profundo de este sistema.

4.3. Validación del modelo. Pruebas a nivel de campo

El siguiente paso lógico fue realizar pruebas a nivel de campo para verificar los resultados de las simulaciones. Se llevaron a cabo mediciones, en una determinada aspiración, a fin de comprobar el patrón observado en los cambios de presión.

Se aprovecharon los agujeros hechos para el mantenimiento actual de las aspiraciones, y se usó el mismo aparato utilizado para medir la velocidad, el medidor **TESTO**.

Se había de medir la presión manométrica en los conductos. El **TESTO**, es un sensor de presión diferencial, con dos entradas, mostradas en la **Figura 4-3-1**.



Figura 4-3-1. Entradas medidor TESTO

Si se quiere que el valor visualizado en la pantalla aparezca en valor absoluto, se ha de conectar a la tubería el terminal negativo, dejando libre el positivo. De este modo, el Δp leído por el sensor corresponde a la depresión existente en el conducto, y se muestra en valor absoluto en la pantalla. La **Figura 4-3-2** muestra este procedimiento.



Figura 4-3-2. Δp con el medidor TESTO

La aspiración en que se realizaron las pruebas cuenta con 7 ramales. En primer lugar, se determinaron las velocidades en todos ellos, y se compararon con las de referencia, que fueron determinadas tras la instalación del sistema. De este modo, se tendría una idea del estado actual de la aspiración. La **Figura 4-3-3** muestra los resultados que se obtuvieron.

Velocidades (m/s)	PT7	PT6	PT5	PT4	PT3	PT2	PT1
REFERENCIA	13,25	14,1	13,07	17,07	24,8	26	30
03/05/2017	14,1	16,75	30,1	15,77	21,25	22,75	13

PT1 parece tener algún problema
Demasiada aspiración en PT5

Figura 4-3-3. Velocidades en pruebas a nivel de campo

Después se determinó la presión en todos los puntos, **Figura 4-3-4**. Las depresiones se situaron en el rango $-50/-100 \text{ mmH}_2\text{O}$, entendidas como presiones manométricas.

Presiones (mmH ₂ O)	PT7	PT6	PT5	PT4	PT3	PT2	PT1
03/05/2017	-59	-60,3	-95,2	-53,1	-83,1	-71,4	-66,3

Figura 4-3-4. Presiones en pruebas a nivel de campo

Se generó, primero, una obstrucción hipotética en el ramal de **PT4**, tapando parcialmente la bocana de aspiración con una chapa de acero, **Figura 4-3-5**. Nótese que esta captación no cuenta con campana; a veces, no es necesaria. Se volvieron a determinar todas las presiones y se recogieron en una tabla, mostrada en la **Figura 4-3-6**.

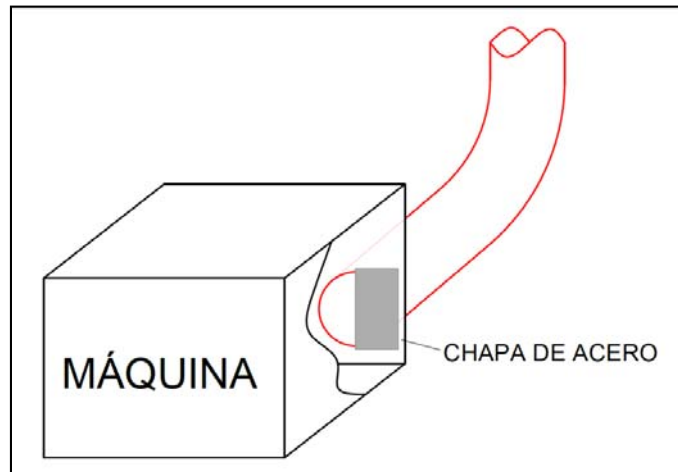


Figura 4-3-5. Obstrucción hipotética con chapa de acero

Presiones (mmH ₂ O)	PT7	PT6	PT5	PT4	PT3	PT2	PT1
Obstrucción chapa	-67,8	-70,6	-95,4	-76,6	-86,8	-80,7	-74,7

Figura 4-3-6. Presiones con obstrucción chapa

Tras restablecer el funcionamiento normal de la aspiración, se generó otra obstrucción, esta vez cerrando parcialmente, en el ramal de **PT1**, una llave de paso manual, mostrada en la **Figura 4-3-7**. Se determinaron nuevamente todas las presiones y se recogieron en la tabla de la **Figura 4-3-8**.



Figura 4-3-7. Llave de paso manual para obstrucción hipotética

Presiones (mmH ₂ O)	PT7	PT6	PT5	PT4	PT3	PT2	PT1
Obstrucción llave	-65,2	-69	-93,6	-52,3	-107,2	-96,8	-98

Figura 4-3-8. Presiones con obstrucción llave

En la **Figura 4-3-9**, se muestra el resultado de comparar las presiones sin obstrucciones con las presiones con obstrucción.

Presiones (mmH ₂ O)	PT7	PT6	PT5	PT4	PT3	PT2	PT1
03/05/2017	-59	-60,3	-95,2	-53,1	-83,1	-71,4	-66,3
Obstrucción chapa	-67,8	-70,6	-95,4	-76,6	-86,8	-80,7	-74,7
DIFERENCIA (%)	-14,92	-17,08	-0,21	-44,26	-4,45	-13,03	-12,67

Presiones (mmH ₂ O)	PT7	PT6	PT5	PT4	PT3	PT2	PT1
03/05/2017	-59	-60,3	-95,2	-53,1	-83,1	-71,4	-66,3
Obstrucción llave	-65,2	-69	-93,6	-52,3	-107,2	-96,8	-98
DIFERENCIA (%)	-10,51	-14,43	1,68	1,51	-29,00	-35,57	-47,81

Figura 4-3-9. Comparación presiones en pruebas a nivel de campo

Se observa un cambio significativo en las presiones de los ramales obstruidos, no habiendo grandes variaciones en el resto. En el segundo caso, sí se observan cambios de presión notables en los ramales, sin obstruir, de los puntos **PT2** y **PT3**; se debe a que están muy próximos al ramal obstruido, el de **PT1**. En cualquier caso, lo importante es que el mayor cambio se halla en el que tiene problemas.

En base a estas pruebas, se determinó que los resultados de las simulaciones eran correctos, por lo que se decidió continuar desarrollando la solución por presiones.

4.4. Prueba piloto

Tras realizar las pruebas a nivel de campo, se consideró que el siguiente paso debía ser instalar un solo sensor y comprobar su funcionamiento. Esta prueba fue llamada **prueba piloto**.

Mediante la **prueba piloto**, se podría conocer si el sensor resiste las condiciones adversas de los conductos, durante un periodo de tiempo razonable. La prueba transcurrió a lo largo de tres semanas.

Se eligió colocar el mismo sensor que determina la diferencia de presión en los filtros. En primer lugar, porque este sensor funciona sin problemas en esta situación, y en segundo lugar, porque sus prestaciones eran las adecuadas. En la **Figura 4-4-1**, se muestran las características de este aparato, el **DPF 20 de aeautel**, cuyo **PVP** aproximado es de 1000 €.

MISURATORI PRESSIONE



DPF20

Versatilità e prestazioni superiori nel controllo dell'intasamento filtri: display, 3 relè, contaore e uscita analogica.

L'indicatore digitale DPF20 è uno strumento di misura, visualizzazione e controllo di pressione differenziale. Lo strumento è dotato di un'uscita analogica isolata 0-20 mA / 4-20 mA o 0_5V / 0_10V (da indicare in fase di ordine) per cui può funzionare come trasmettitore per un controllore di processo remoto. Sono presenti 3 uscite a relè (contatto in scambio pulito) impostabili a piacere e visualizzabili tramite altrettanti LED presenti sul pannello frontale dello strumento. Il DPF20 può essere inoltre dotato (su richiesta in fase di ordine) di una interfaccia di comunicazione digitale per lo scambio di dati con apparecchiature remote come PC o PLC.

Viene prodotto sia in versione da esterno (DPF 20) che da incasso nel quadro elettrico (DPF 25).

▼ SPECIFICHE TECNICHE

Macro Caratteristiche	Caratteristiche	Valori
Dimensioni	Dimensioni Esterne (L x H x W mm)	195x148x80
Protezione	Grado di Protezione (standard)	IP56
Temperatura	Temperatura di Esercizio (°C)	-3... +50
Alimentazione	Range Alimentazione (standard)	115/230Vac 50-60Hz
	Range Alimentazione (optional)	24Vac/24Vdc
	Potenza Assorbita	10VA
	Tipologia Display	7-segment display
Display	Risoluzione	3 digit
	Colore Display (standard)	red
	Led	7
Ingressi	Ingresso Pressione	ok
	Range di Pressione	-999/+9999mmH2O
	Uscite Relé (nr)	3
Uscite	Potenza Uscita Relé	3A/115Vac
	Uscita di Tensione	optional
	Uscita 4-20mA	optional
Porte Seriali	RS485	ok
Controlli	Tasti (nr)	3

Figura 4-4-1. Sensor DPF 20 de aeautel

Para recoger datos, era necesario que el aparato tuviese salida analógica. Se decidió que la salida 4-20 mA era la mejor opción. Por otro lado, el sensor debía marcar con exactitud en el rango aproximado 0/+150 mmH₂O, en base a los resultados de las pruebas a nivel de campo. Sus características indican que, en este rango, el instrumento tiene una precisión de tres dígitos, más que suficiente para esta aplicación.

El sensor determina la diferencia de presión entre dos puntos. Tiene, por tanto, dos mangas, que deben situarse en los puntos en cuestión. En la **Figura 4-4-2**, se muestra la disposición física del aparato en los filtros de las aspiraciones.



Figura 4-4-2. Configuración física del DPF 20 de aeautel en los filtros

Se observan las dos mangas, de color azul, saliendo del aparato y situándose en los lugares oportunos, a fin de determinar la caída de presión en el filtro. Para determinar la presión manométrica en los conductos, bastará con dejar libre una de las entradas y conectar la otra a la tubería. Si se busca que sea positivo el valor que aparece en la pantalla, debe ser el terminal negativo el que se conecte al conducto.

Se decidió colocar el sensor en un conducto que dispone de una llave de paso manual aguas abajo, que se muestra en la **Figura 4-4-3**. De este modo, se podrían generar obstrucciones hipotéticas, cerrando la llave, y comprobar el funcionamiento del aparato. La **Figura 4-4-4** muestra el sensor instalado. El punto de medida se encuentra a unos pocos metros de la campana de aspiración de este ramal, mostrada en la **Figura 4-4-5**.



Figura 4-4-3. Llave de paso manual ramal prueba piloto



Figura 4-4-4. Sensor en prueba piloto



Figura 4-4-5. Campana de aspiración ramal prueba piloto

La conexión de la manga con la tubería se realizó mediante el acoplamiento mostrado en la *Figura 4-4-6*, donde se indica también cómo se dispuso: a favor del flujo, no enfrentado a él. **De este modo, la succión tiende a sacar la suciedad de la manga.** Además, en esa zona, no existe posibilidad de depósito de sedimentos por gravedad.



Figura 4-4-6. Conexión manga en prueba piloto

Para registrar la salida, se llevó a un registrador de papel la señal de 4-20 mA, que marcaba ininterrumpidamente el Δp suministrado por el sensor. Dicho registrador, marcando la presión, se muestra en la *Figura 4-4-7*.



Figura 4-4-7. Registrador de papel en prueba piloto

A continuación, se analizan los valores recogidos, en el periodo indicado de tres semanas. El papel del registrador avanzaba a razón de 5 mm/h, y los datos han de leerse de derecha a izquierda.

Semana 1

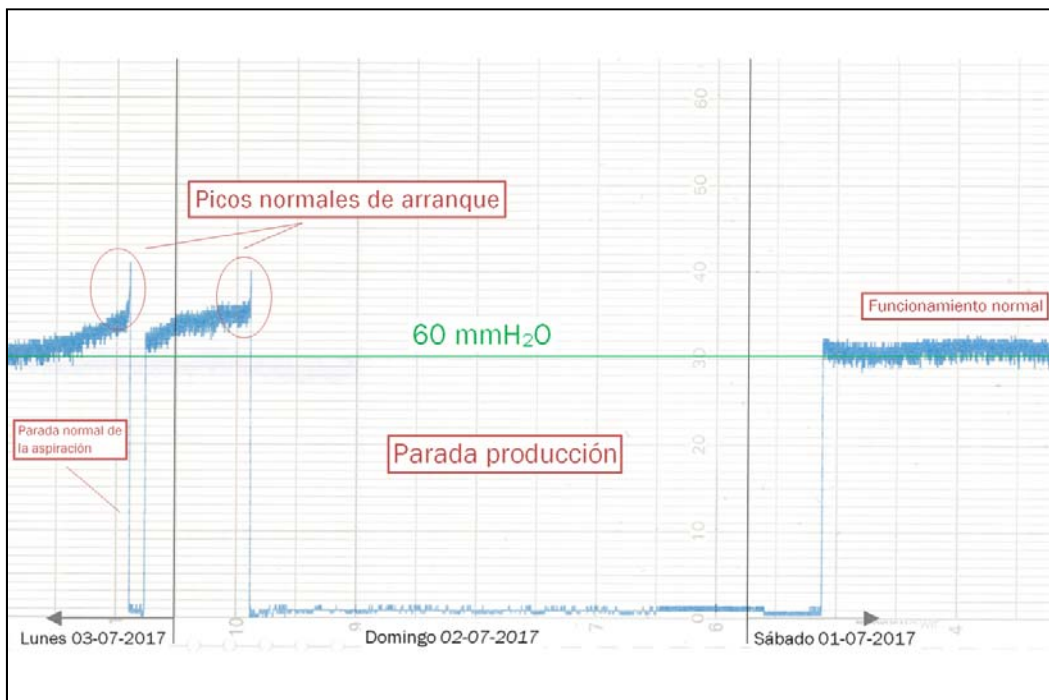


Figura 4-4-8. Prueba piloto semana 1 del 01-07-2017 al 03-07-2017

Los datos de la **Figura 4-4-8** corresponden a **los días 1, 2 y 3 de julio**. Cuando se realizó la prueba piloto, **la presión en ese punto de ese ramal se situaba en torno a 60 mmH₂O, en funcionamiento normal**.

Se observa, en los datos, una parada de la producción de aproximadamente 24 horas, y una pequeña parada de la aspiración, posterior, que pudo deberse a cualquier circunstancia, como la reparación de alguna máquina con campana o campanas de aspiración.

Cuando el ventilador está parado, no hay succión en el circuito de aspiración, luego, en el interior de la tubería del sensor, la presión es la atmosférica. En consecuencia, no hay Δp entre una entrada y otra del sensor, y de ahí que marque 0.

Por otro lado, también se observan picos de arranque significativos en la puesta en marcha de la aspiración. Se deben al propio arranque del motor eléctrico que mueve el ventilador, luego son totalmente normales.

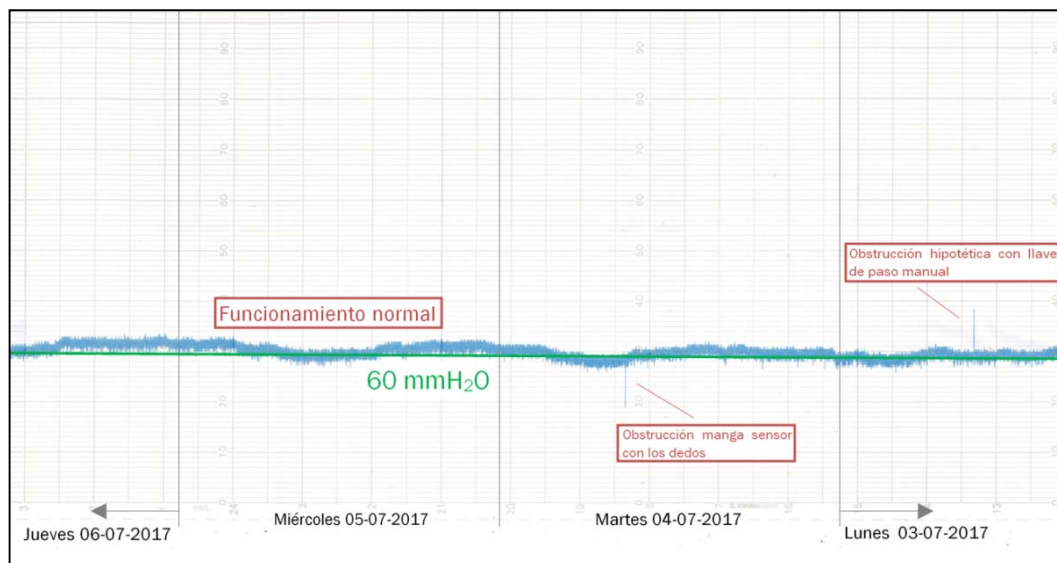


Figura 4-4-9. Prueba piloto **semana 1** del 03-07-2017 al 06-07-2017

La **Figura 4-4-9** corresponde a **los días 3, 4, 5 y 6 de julio**. Como puede verse, el funcionamiento fue el normal en este periodo.

Únicamente, se generó **el día 3**, mediante la llave de paso manual, una obstrucción hipotética instantánea aguas abajo, para comprobar el aumento de presión, que efectivamente se produjo. También, **el día 4**, se obstruyó instantáneamente la manga del sensor con los dedos; el efecto fue una disminución del Δp .

La obstrucción que se hizo de la manga del sensor fue severa; se hizo mucha fuerza con los dedos. Si no se hace verdadera fuerza, el sensor sigue marcando bien, luego es robusto, lo que es buen indicativo.

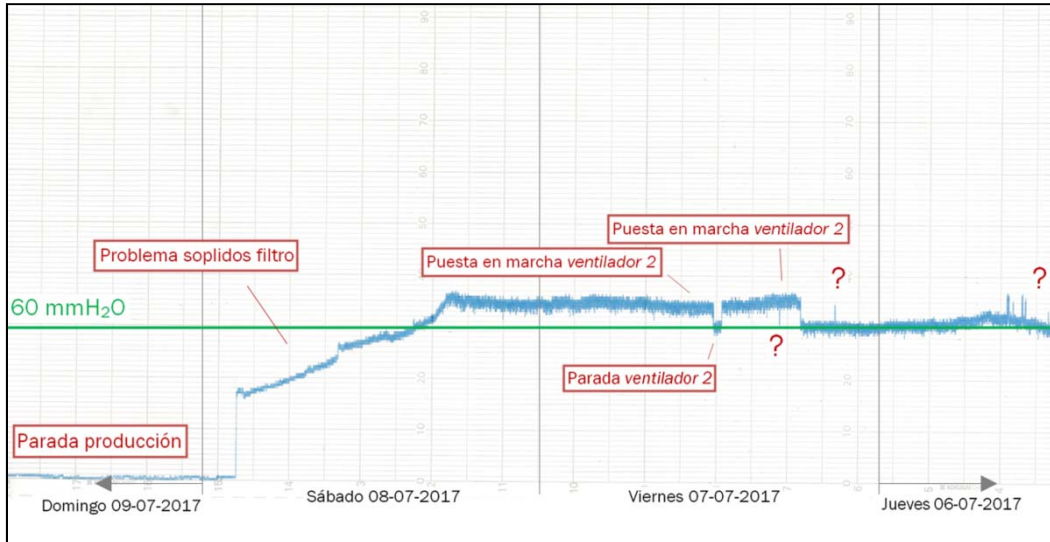


Figura 4-4-10. Prueba piloto *semana 1* del 06-07-2017 al 09-07-2017

La **Figura 4-4-10** corresponde a los días 6, 7, 8 y 9 de julio. En este periodo, hubo varias circunstancias en la aspiración.

El día 7, se puso en marcha un segundo ventilador, cambiando la configuración del sistema. Se puede apreciar el cambio instantáneo en la presión cuando esto ocurre.

Se dieron, los días 6 y 7, unos picos anómalos, marcados con un signo de interrogación en la figura. Probablemente, se debieron a pruebas de arranque y parada del segundo ventilador, por lo que no constituyen ningún inconveniente.

Por otro lado, no se observan picos de presión en los arranques de este ventilador, como sí ocurría con el ventilador principal. El *ventilador 2* es de baja potencia, y quizás su arranque no tenga mayor repercusión en el sistema, o quizás su motor tenga incorporado un arrancador electrónico que evita este efecto. En cualquier caso, no tiene mayor importancia.

Se produjo un mal funcionamiento en la aspiración el día 8. Se cortó, por error, el aire de los soplados automáticos de limpieza de los filtros, por lo que la presión comenzó a descender, como si fuese una obstrucción aguas arriba. Paró la producción y el problema no quedó solucionado, como se ve a continuación en los datos de la *semana 2*.

Semana 2

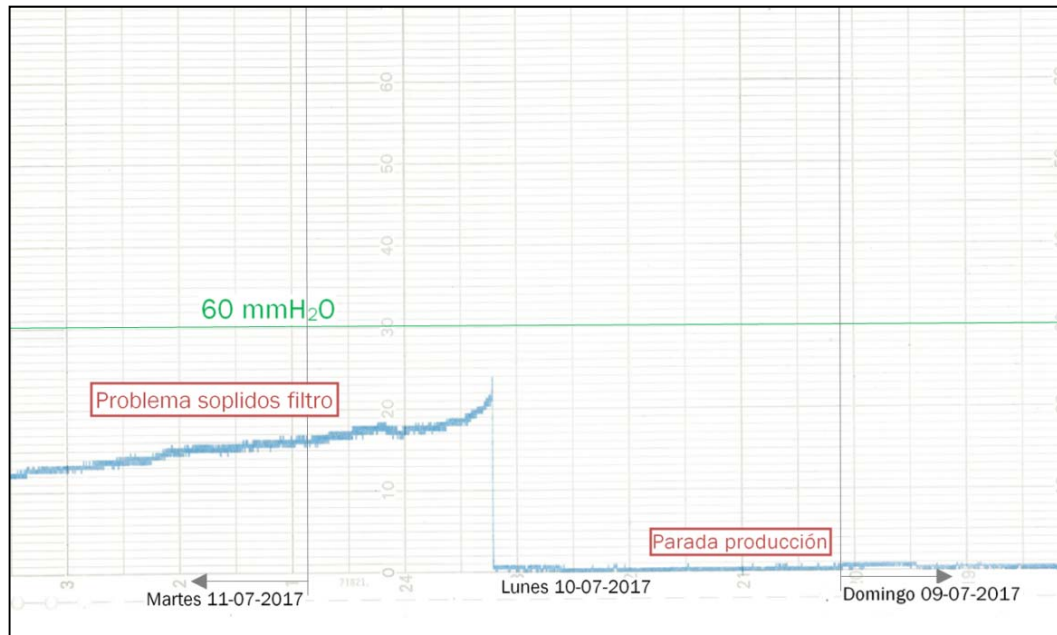


Figura 4-4-11. Prueba piloto *semana 2* del 09-07-2017 al 11-07-2017

Los datos de la **Figura 4-4-11** corresponden a los días 9, 10 y 11 de julio. Como puede verse en ellos, el problema del aire de los soplados de limpieza de los filtros, originado en la *semana 1*, seguía sin resolverse, pues la presión continuaba bajando tras la parada de producción.

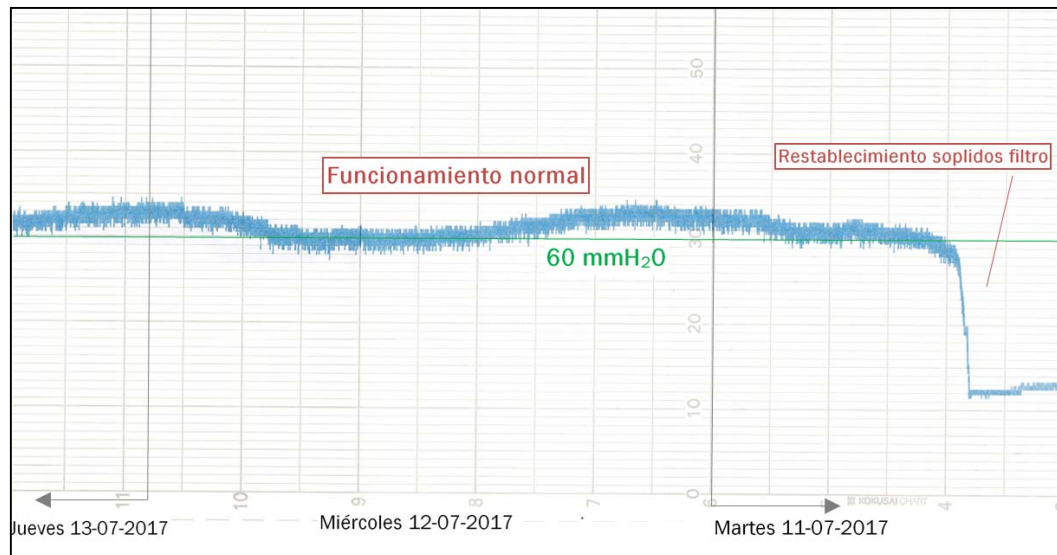


Figura 4-4-12. Prueba piloto *semana 2* del 11-07-2017 al 13-07-2017

La **Figura 4-4-12** corresponde a los días 11, 12 y 13 de julio. Finalmente, el día 11, se arregló el problema del aire de los soplados, restableciéndose el funcionamiento normal de la aspiración.

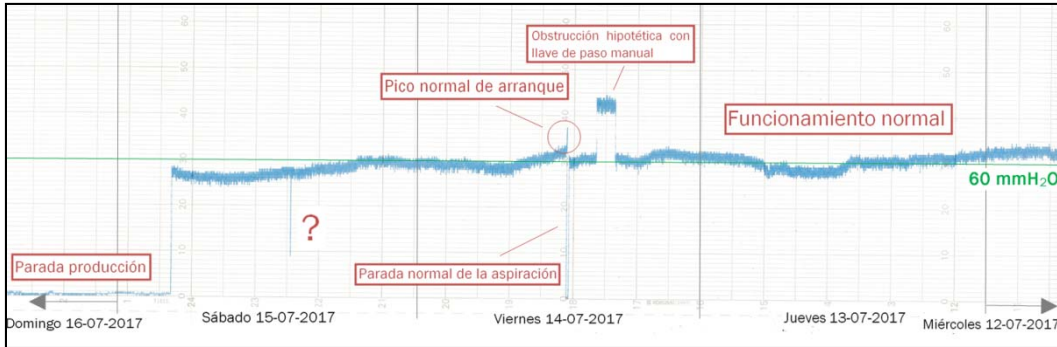


Figura 4-4-13. Prueba piloto **semana 2** del 12-07-2017 al 16-07-2017

La **Figura 4-4-13** muestra los datos de los días **12, 13, 14, 15 y 16** de julio. Pueden observarse varios sucesos en este periodo.

El día **14**, se generó una obstrucción hipotética aguas abajo mediante la llave de paso manual, esta vez de mayor duración que la hecha el día **3** de la **semana 1**. La presión subió, luego el sensor recogió bien esta circunstancia.

También, el día **14**, hubo una breve parada de la aspiración, debida a cualquier circunstancia. Se consideró normal y pudo observarse, nuevamente, el pico de arranque en la puesta en marcha.

El día **15**, se produjo una reducción instantánea de la presión, a la que no se encontró explicación. Probablemente, hubo un corte muy breve en la alimentación del motor principal, que no llegó a traducirse en un paro completo de la aspiración debido a la propia inercia del eje del motor.

El resto del funcionamiento fue el normal, aunque, quizás, con un poco más de variación de la habitual, pero nada reseñable. Finalmente, el día **16** paró la producción.

Semana 3

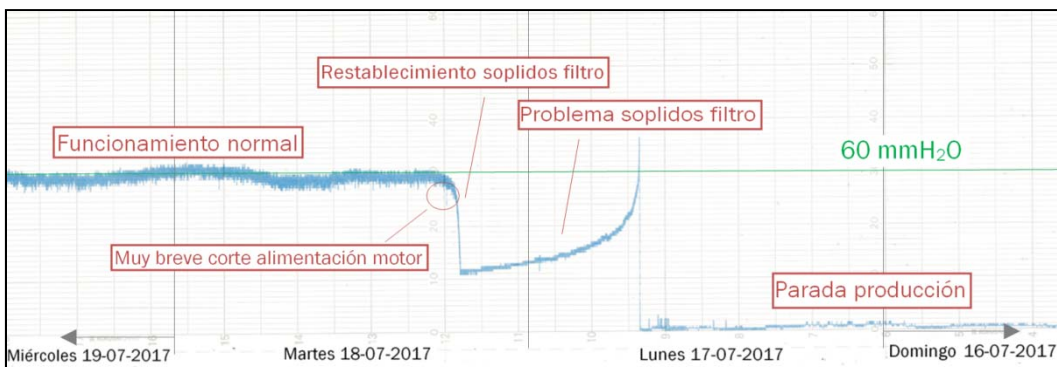


Figura 4-4-14. Prueba piloto **semana 3** del 16-07-2017 al 19-07-2017

Los datos de la **Figura 4-4-14** son los correspondientes a **los días 16, 17, 18 y 19 de julio**. Tras la parada de producción, volvió a darse el problema de los sopladitos del filtro, que se arregló pasadas unas horas y el funcionamiento volvió a ser el normal.

El día 18, se forzó un breve corte en la alimentación del motor principal, desde el autómata de la aspiración. De este modo, se pudo comprobar el descenso instantáneo que tiene lugar en la presión cuando esto ocurre, pero sin llegar a 0, pues el motor no llega a pararse. Se dio explicación, de esta manera, al descenso en la presión que ocurrió **el día 15 de la semana 2**.

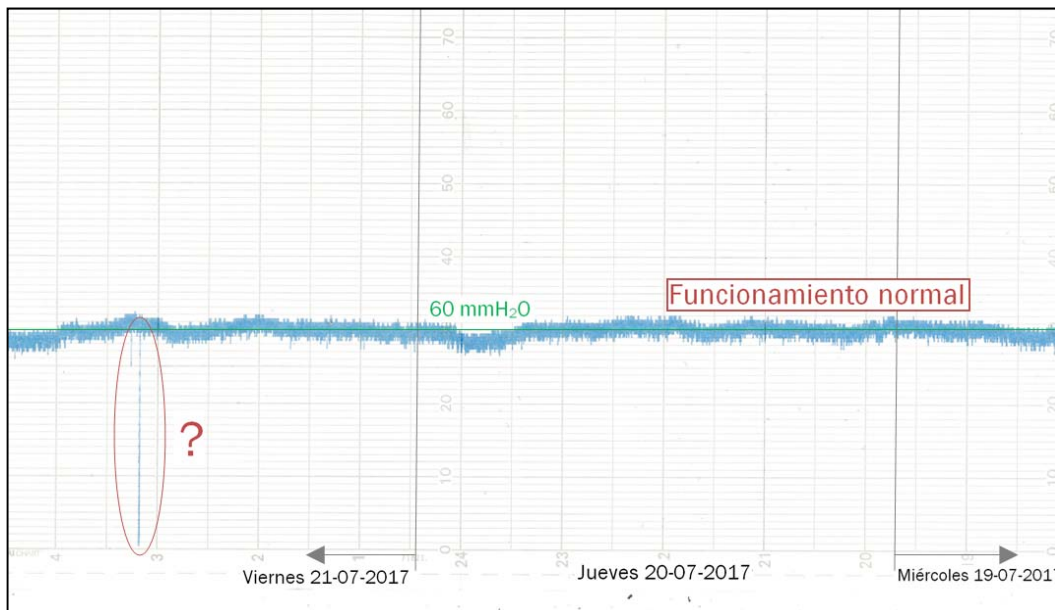


Figura 4-4-15. Prueba piloto **semana 3** del 19-07-2017 al 21-07-2017

La **Figura 4-4-15** muestra los datos de **los días 19, 20 y 21 de julio**. El funcionamiento fue el normal en este periodo.

Únicamente, hubo dos descensos instantáneos en la presión **el día 21**. Probablemente se debieron, como en días anteriores, a cortes muy breves en la alimentación del motor, que no llegan a traducirse en un paro total de la aspiración.

Los datos de la **Figura 4-4-16** corresponden a **los días 21, 22 y 23 de julio**. No hubo ningún incidente en estos días.

El día 22, se puso en marcha, varias veces, el *ventilador 2*, como puede observarse. El resto del funcionamiento fue el normal. Finalmente, **el día 23**, paró de nuevo la producción.

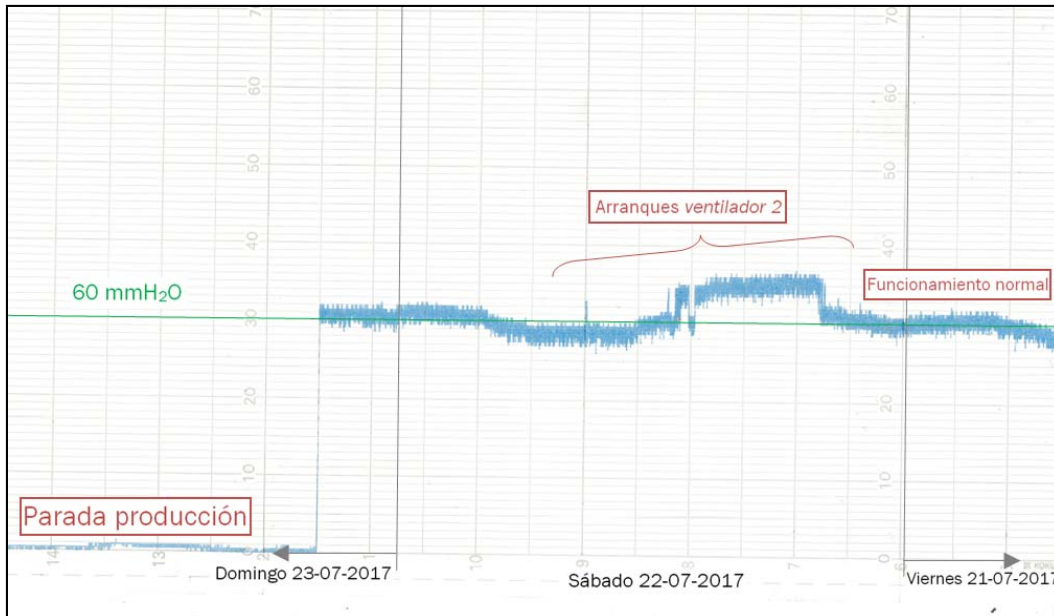


Figura 4-4-16. Prueba piloto *semana 3* del 21-07-2017 al 23-07-2017

No se observó ningún comportamiento erróneo, por parte del sensor, en la prueba piloto. De hecho, se intentó forzar su fallo mediante la obstrucción de la manga realizada el día 4 de la *semana 1*, y el resultado fue un comportamiento muy robusto del aparato.

Como ya se ha comentado, este sensor funciona sin problemas en los filtros de las aspiraciones, pese a que mide en aire sucio con una de sus mangas. En los filtros, lleva puesto **2 años**, por lo que su buen funcionamiento en esta aplicación ya está suficientemente contrastado.

Por todo ello, y pese a que la prueba piloto no es de larga duración, no se prevé que el sensor pueda fallar; **la confianza en los sensores de presión, para el propósito de este proyecto, es grande.**

Además, mediante la prueba piloto se pudo determinar el problema del aire de los sopladors del filtro, que hubiese sido atajado más tarde de no haberse observado en los datos de este ensayo.

Por otro lado, lo más normal sería que con el tiempo, en el punto de la prueba piloto, la presión se situase por encima de $60 \text{ mmH}_2\text{O}$, como consecuencia del aumento paulatino de una supuesta obstrucción aguas abajo del sensor.

Se concluyó, finalmente, que la prueba piloto había sido plenamente satisfactoria. En consecuencia, en este punto, la solución por presiones fue validada.

4.5. Prototipo de solución de control

Tras la prueba piloto, la solución por presiones fue validada. En este apartado se propone, a modo de prototipo, la implantación completa del sistema desarrollado, en un determinado sistema de aspiración.

En primer lugar, se han de elegir los sensores a colocar. El sensor utilizado para la prueba piloto es un sensor con muchas funcionalidades, pero la mayoría de ellas no es requerida en esta aplicación. En consecuencia, un sensor de gama más baja puede ser suficiente.

Las características fundamentales que debe tener el aparato son las que ya se remarcaron para la prueba piloto: salida 4-20 mA y precisión en el rango aproximado 0/+150 mmH₂O. El DPF 4-20 de aeautel, cuyas características se muestran en la **Figura 4-5-1**, es el sensor adecuado. El PVP aproximado de este equipo es de 700 €.



PRESSURE GAUGES

DPF 4-20

Our most simple, but always precise instrument: no display, analog output.

The DPF 4-20 is a differential pressure gauge controlled by microprocessor with 4-20mA output. That signal follows the pressure flow changing from 4mA with 0mmH₂O to 20mA, with 1000mmH₂O.

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Main Features	Features	Values
Dimensions	External Dimensions (L x H x W mm)	105x105x57
	Weight (kg)	0,36
Protection	Protection Level (standard)	IP56
Temperature	Working Temperature (°C)	-10... +50
Power Supply	Power Supply Range (standard)	115/230Vac 50-60Hz
	Power Supply Range (optional)	12/24Vdc 24Vac
	Power Consumption	2,5VA
Display	Led	1
Inputs	Pressure Input	ok
	Pressure Range	0/+999mmH ₂ O
Outputs	4-20mA Output	ok

Figura 4-5-1. Sensor DPF 4-20 de aeautel

En esta ocasión, a diferencia de lo que se muestra en el **DPF 20 de aeautel**, la marca no indica la precisión del sensor en el rango de medida, pero el error no será mayor que un 5% del fondo de escala, sin duda suficiente.

Un aspecto a tener muy en cuenta es que este sensor es de la misma familia que el usado para la prueba piloto. Es de suponer que la fabricación de ambos será casi idéntica, por lo que si uno de ellos funciona con normalidad en esta aplicación, también lo hará el otro.

Hay que colocar tantos sensores como ramales tenga la aspiración. Sus señales han de ser centralizadas en un autómata, en el que se puede programar la función requerida y visualizar gráficas. Esto se muestra, a modo esquemático, en la **Figura 4-5-2**.

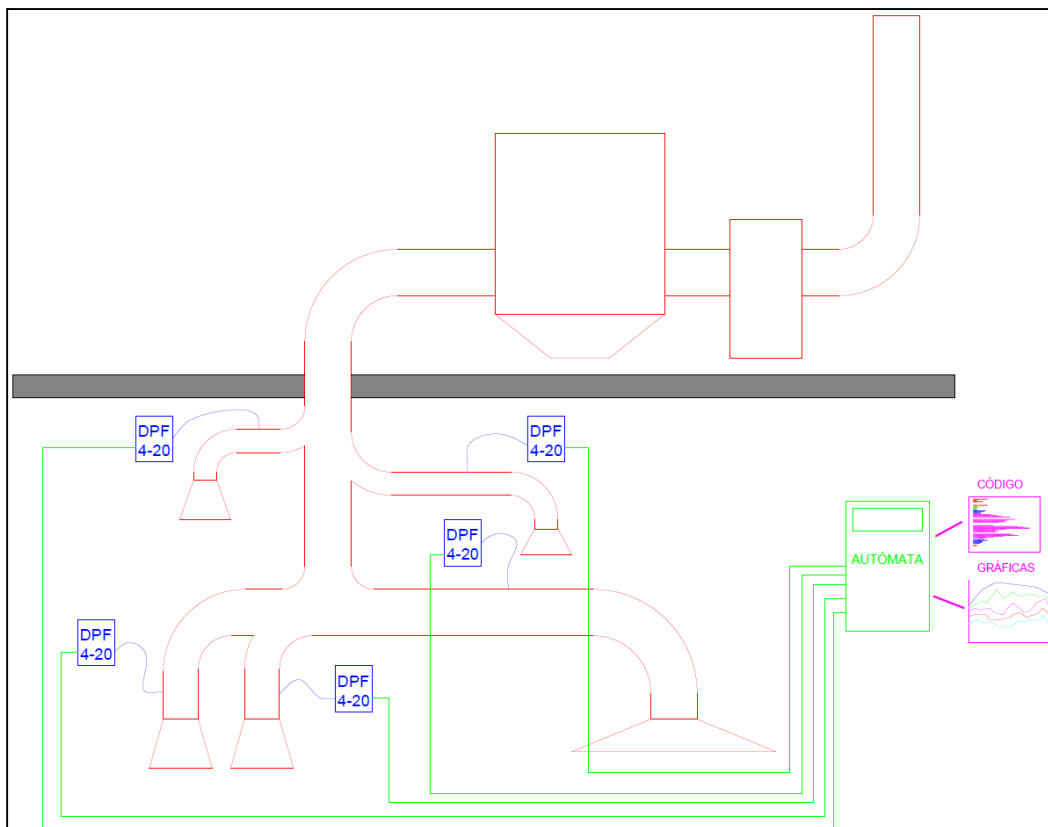


Figura 4-5-2. Prototipo de solución de control

El código constituye el análisis cuantitativo del sistema. Con su desarrollo, se pueden enviar consignas que determinen las acciones a realizar.

Las gráficas ayudan al análisis cualitativo. Se puede almacenar un histórico de la evolución del sistema, que de un simple vistazo permita determinar cuál es el estado actual de la aspiración.

Código

Establecer, para los puntos de medición, valores de presión de referencia, y comparar, en bucle, estos valores con los actuales. Determinar, en cada ciclo de comparación, dónde se encuentra la mayor diferencia porcentual, entre presión de referencia y actual. Si la mayor diferencia es superior a un cierto porcentaje (20 %, por ejemplo), se concluye que se tiene una obstrucción en el ramal de ese punto. **Si la diferencia es negativa, la obstrucción se encuentra aguas abajo del sensor; si la diferencia es positiva, la obstrucción se encuentra aguas arriba del sensor.**

Los valores de referencia dependen de la configuración del sistema, que viene determinada por los ventiladores en marcha y por las posiciones de las válvulas guillotina.

Las *Figuras 4-5-3, 4-5-4, 4-5-5 y 4-5-6* muestran un pseudocódigo que implementa esta descripción.

```
//Variables globales//
int vector presion_ref_conf_0[4];
int vector presion_ref_conf_1[4];

presion_ref_conf_0[0]=60;
presion_ref_conf_0[1]=70;
presion_ref_conf_0[2]=80;
presion_ref_conf_0[3]=65;
presion_ref_conf_0[4]=50;

presion_ref_conf_1[0]=55;
presion_ref_conf_1[1]=75;
presion_ref_conf_1[2]=90;
presion_ref_conf_1[3]=60;
presion_ref_conf_1[4]=70;
```

Figura 4-5-3. Variables globales

Las variables globales determinan los valores de presión de referencia. Se han supuesto cinco puntos de medición, como en la *Figura 4-5-2*, y valores hipotéticos, a fin de no complicar su comprensión. Por otro lado, el término *conf* se refiere a la configuración de la instalación para una determinada marcha de los ventiladores y una determinada posición de las guillotinas. Se consideran dos configuraciones distintas, lo que corresponde a un sistema con un solo ventilador y una sola guillotina con dos posibles estados: abierta y cerrada.

```

main()//main() se ejecuta cíclicamente//
{
    float vector presion_actual[4];
    float diferencia, mayor_diferencia=0;
    int configuracion, i, pto;
    bool negativo;

    presion_actual[0]=entrada_analogica_0;
    presion_actual[1]=entrada_analogica_1;
    presion_actual[2]=entrada_analogica_2;
    presion_actual[3]=entrada_analogica_3;
    presion_actual[4]=entrada_analogica_4;

    configuracion=entrada_analogica_5;

```

Figura 4-5-4. En *main()*, variables locales

Las presiones actuales se leen de supuestas entradas analógicas del autómatas. Del mismo modo, para no complicar, se ha supuesto que la configuración del sistema la determina otra entrada analógica. Son también necesarias variables auxiliares para el desarrollo del programa.

```

if configuracion==0 then for i=0 to i=4:
{
    diferencia=presion_ref_conf_0[i]-presion_actual[i];
    if |diferencia|>mayor_diferencia then
    {
        mayor_diferencia=|diferencia|; pto=i;
        if diferencia<0 then negativo=!; else then negativo=0;
    }
}

else if configuracion==1 then for i=0 to i=4:
{
    diferencia=presion_ref_conf_1[i]-presion_actual[i];
    if |diferencia|>mayor_diferencia then
    {
        mayor_diferencia=|diferencia|; pto=i;
        if diferencia<0 then negativo=!; else then negativo=0;
    }
}
}

```

Figura 4-5-5. En *main()*, determinación de la mayor diferencia

La mayor diferencia se determina en valor absoluto, por lo que es necesario un bit que indique su signo, `negativo`. También es necesaria otra variable que almacene el punto donde se encuentra la mayor diferencia, `pto`.

```

if configuracion==0 then
{
  if mayor_diferencia>0.2*presion_ref_conf_0[pto] then
  {
    if negativo==1 then printf("Problemas pto %d aguas abajo"), pto;
    else then printf("Problemas pto %d aguas arriba"), pto;
  }
  else then printf("Sin problemas en la aspiración");
}
else if configuracion==1 then
{
  if mayor_diferencia>0.2*presion_ref_conf_1[pto] then
  {
    if negativo==1 then printf("Problemas pto %d aguas abajo"), pto;
    else then printf("Problemas pto %d aguas arriba"), pto;
  }
  else then printf("Sin problemas en la aspiración");
}
}

```

Figura 4-5-6. En `main()`, envío de consignas

En función de la magnitud de la mayor diferencia y de su signo, se generan las consignas pertinentes, que muestran si hay alguna obstrucción y dónde se encuentra, en caso de haberla. En la práctica, lo normal sería tener una consigna luminosa que indique si hay algún problema, y una pantalla donde pueda visualizarse, cuando lo haya, el problema existente.

Gráficas

En cuanto a las gráficas, sería bueno que, de alguna manera, se visualizaran los valores de referencia, indicando, de este modo, en qué configuración se encuentra la aspiración, tal y como se muestra en la **Figura 4-5-7**.

En este hipotético caso, se puede observar que **en PT3 hay un problema aguas abajo, pues su valor se encuentra notablemente por encima de su referencia**, y que el sistema se halla en la **configuración 1** del pseudocódigo descrito.

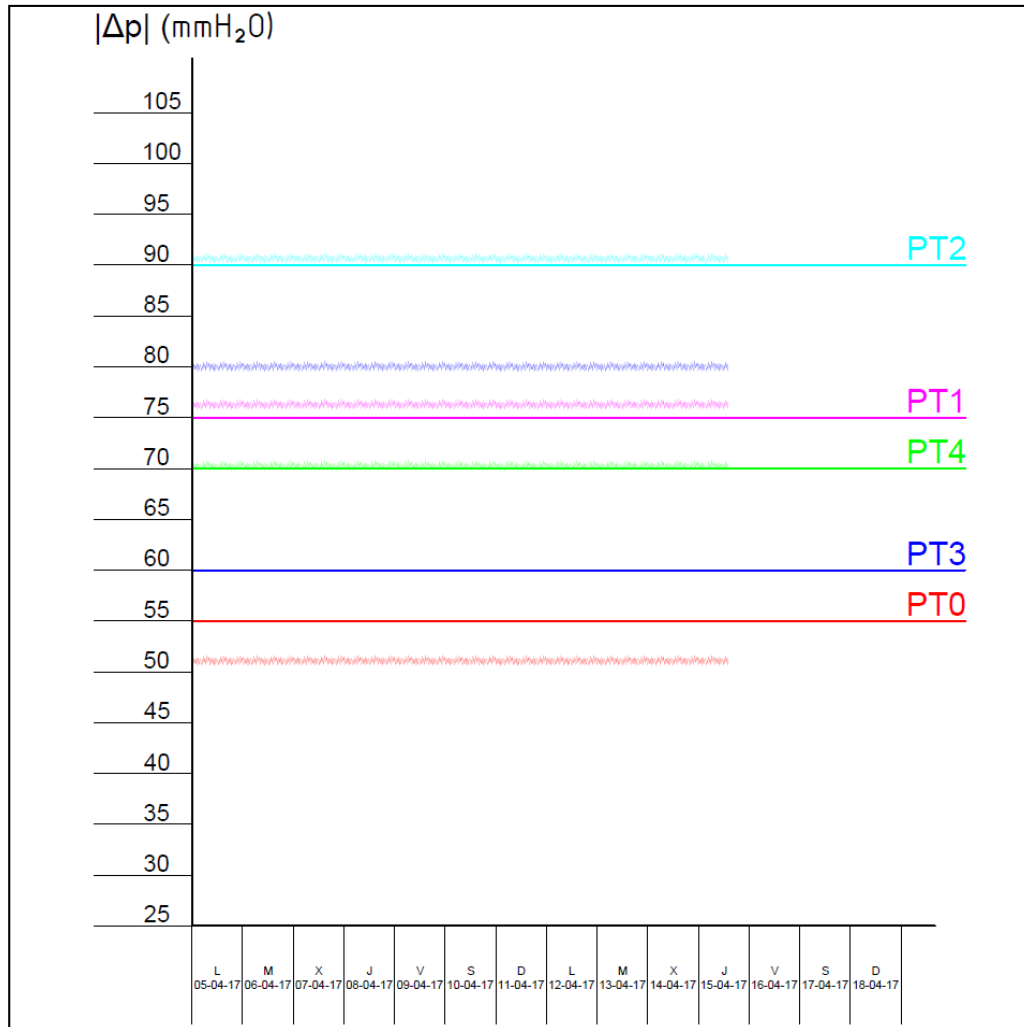


Figura 4-5-7. Gráficas en autómatas

Al final, en la práctica, probablemente la visualización de gráficas sea lo más usado. La programación, aunque sencilla, es engorrosa, ya que hay que tener en cuenta todas las configuraciones posibles. En sistemas con varias guillotinas y varios ventiladores, el código puede resultar demasiado extenso, dificultando su comprensión.

El usuario que visualice las gráficas, rápidamente cogerá pericia y sabrá determinar cuándo hay un cambio de configuración y cuándo hay problemas en algún ramal.

En cualquier caso, se ha querido mostrar cómo podría implementarse, mediante el pseudocódigo descrito, una tarea que envíe consignas automáticas de limpieza, sin necesidad de interpretar los datos recogidos por los sensores.

5. Presupuesto

El estudio económico de la solución propuesta es parte fundamental para evaluar la viabilidad de la misma. En este apartado, se analiza el coste de instalación del prototipo desarrollado para un determinado sistema de aspiración, como el mostrado en la **Figura 4-5-2**, y que se muestra de nuevo en la **Figura 5-1**.

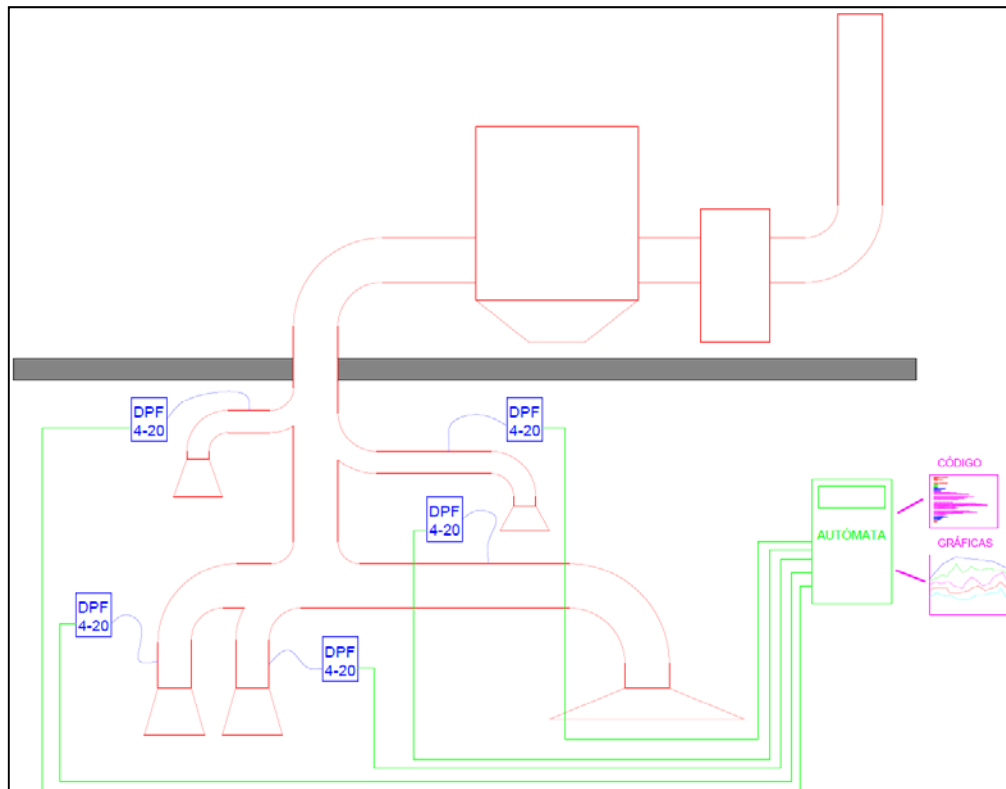


Figura 5-1. Prototipo de solución de control

Existen una serie de costes directos e indirectos. Los directos se pueden desglosar en costes de equipos y de instalación. Lo indirectos son tales como el uso energético o los gastos de administración.

La **Figura 5-2** recoge los costes aproximados de equipos para un sistema como el mostrado en la **Figura 5-1**. El sensor a utilizar es el **DPF 4-20 de aeautel**, cuyo PVP asciende a 700 € por unidad. El autómata ha de disponer de un módulo de entradas analógicas, de un módulo de control y de un módulo de comunicaciones. También se debe incorporar una pantalla de visualización y una baliza de alerta. El coste del armario de integración también se considera. Harán falta varios metros de cable a tres hilos y un cable Ethernet para exportar la señal del autómata. No se incluye licencia de software.

Concepto	Cantidad	Precio por unidad en €	Subtotal en €
Sensor DPF 4-20 de aeautel	5	700	3500
Módulo de entradas analógicas	1	600	600
Módulo de control	1	1000	1000
Módulo de comunicaciones	1	600	600
Pantalla de visualización	1	200	200
Baliza de alerta	1	80	80
Armario de integración	1	200	200
Cable a tres hilos	300 metros	1/m	300
Cable Ethernet	100 metros	2/m	200
Costes directos de equipos			6680

Figura 5-2. Costes directos de equipos prototipo de control

Los costes directos de instalación corresponden a la implantación del hardware y a la programación del software. En la **Figura 5-3** se recogen, aproximadamente, estos conceptos. Se suponen dos ingenieros automatistas trabajando a jornada completa durante 2 semanas.

Concepto	Horas de trabajo	Salario bruto por hora en €	Subtotal en €
Ingeniero automatista instalación hardware	40	150	6000
Ingeniero automatista instalación hardware	40	150	6000
Ingeniero automatista instalación software	40	150	6000
Ingeniero automatista instalación software	40	150	6000
Costes directos de instalación			24000

Figura 5-3. Costes directos de instalación prototipo de control

Para este proyecto, los costes indirectos son muy bajos. Serán aquellos asociados a la gestión de contratación de operarios y de compra de equipos, al uso de los servicios de la empresa por parte de los técnicos y al gasto energético del sistema implantado, que será ínfimo en un ámbito industrial. Por todo ello, los costes indirectos no son una partida a considerar en este proyecto.

La **Figura 5-4**, recoge el coste total del prototipo de solución de control. Es la suma de los costes directos de equipos y de los costes directos de instalación, y asciende a **treinta mil seiscientos ochenta euros**.

Costes directos de equipos	6680
Costes directos de instalación	24000
Coste total	30680

Figura 5-4. Coste total de instalación prototipo de control

6. Conclusiones

Se ha llevado a cabo una revisión sustancial del funcionamiento de los circuitos de aspiración. Se han repasado y desarrollado los fenómenos físicos que intervienen en estos sistemas, dando lugar a un entendimiento profundo de ellos.

El mantenimiento actual por velocidades es fiable. Se trata de un método sencillo que ya ha sido contrastado. No obstante, el sistema por presiones propuesto supone una idea novedosa, que puede mejorar sustancialmente el mantenimiento actual, pues dotaría a las instalaciones de un seguimiento continuado.

El concepto de la solución por presiones no es complejo. Sin embargo, la utilización del software **EPANET** fue clave, ya que, gracias a las simulaciones, se pudo localizar un patrón en la repartición de presiones. Sin el software, resultaba difícil imaginar cuál era exactamente el comportamiento de una aspiración, desde el punto de vista físico.

Los sensores de presión de la marca **aeautel** son robustos. El **DPF 20** no ha dado ningún problema ni en la prueba piloto ni en los filtros. Se confía, de este modo, en que el **DPF 4-20** tampoco dé ningún problema.

La implantación del prototipo propuesto no es complicada. No debe llevar más que unos días, y a un precio razonable. Probablemente, lo más tedioso sea determinar los valores de presión de referencia, teniendo en cuenta todas las posibles configuraciones de las guillotinas, y llevar esto a la función que se cargue en el autómata.

Trabajo futuro

Instalar el prototipo es el siguiente paso lógico antes de implantar este sistema en una fábrica. Con él, se podrá comprobar el funcionamiento de la solución desarrollada, en una determinada aspiración.

Por otro lado, la prueba piloto puede alargarse. Tres semanas no es un periodo lo bastante largo para validar, sin ningún atisbo de duda, el funcionamiento de los sensores. Sin embargo, no hay razones para pensar que no puedan funcionar durante años.

Referencias

- [1] V. V. Baturin. Finalidades de la ventilación y su relación con otras ramas de la ciencia y su metrología. En *Fundamentos de ventilación industrial*. 1ª ed. Sant Joan Despí (Barcelona): Labor, S. A., 1976.
- [2] Organización Internacional del Trabajo. Industria del caucho. En *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. 3ª ed. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2001.
- [3] PANATEC, Agua & Medio Ambiente [en línea]. [Consulta: marzo de 2017]. Disponible en: <http://www.panatec-agua.com>
- [4] CAUDALIMETROS.ES - Lana Sarrate, S.A. [en línea]. [Consulta: marzo de 2017]. Disponible en: <http://www.caudalimetros.es>
- [5] PCE Instruments [en línea]. [Consulta: marzo de 2017]. Disponible en: <http://www.pce-instruments.com>
- [6] Nicolás García Tapia. Aplicaciones del teorema de Bernoulli. En *Ingeniería fluidomecánica*. 2ª ed.: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valladolid, 2006.

