

## MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA TOBERA PARA HILATURA NEUMÁTICA MEDIANTE ANEMOMETRÍA LASER, COMPORTAMIENTO DE LAS FIBRAS EN SU INTERIOR.

J.C. Sanchez\*, J.A. Tornero\*\*, J.M<sup>a</sup> Bergadà\*\*\*, F.Roig\*\*\*\*, E. Valencia\*\*\*\*\* y Ll. Coll\*\*\*\*\*

### 0.1. Resumen

Con el fin de tener un conocimiento más amplio y más profundo del funcionamiento interno de las toberas utilizadas para hilatura neumática, se ha realizado el estudio presente, el cual consta de dos partes; el análisis experimental del flujo de aire en el interior de las toberas, y un análisis experimental del comportamiento de las fibras en el proceso de hilatura.

**Palabras clave:** Toberas de hilatura, hilatura neumática, anemometría láser.

### 0.2. Summary: MODELLING OF THE BEHAVIOUR OF A PNEUMATIC SPINNING NOZZLE BY LASER ANEMOMETRY: BEHAVIOUR OF INTERNAL FIBRES

In order to get a deeper and wider knowledge of the flow behaviour and fibres movement at the inside of a spin nozzle, the following research was carried on. On the first part, the air velocities were studied using an argon laser anemometer, while at the second part, the way travelled by the textile fibres was taken into consideration.

**Key words:** Spin nozzles, pneumatic spinning, laser anemometry.

### 0.3. Résumé: MODELISATION DU COMPORTEMENT D'UNE Busette POUR FILAGE PNEUMATIQUE MOYENNANT ANEMOMETRE LASER, COMPORTEMENT DES FIBRES À L'INTERIEUR

A fin d'observer plus amplement le comportement des fibres textiles, leur mouvement à l'intérieur d'un tuyau de filature pneumatique, a été réalisé l'expérience suivante. D'une part la mesure de la vitesse à l'aide d'un anémomètre laser de argon, et d'autre l'analyse expérimentale du comportement des fibres dans le porces de filature.

**Mots clé:** Tuyaus de filature, filature pneumatique, anemomètre laser.

## 1. INTRODUCCIÓN

La hilatura neumática es uno de los procesos con más futuro en la industria textil. Sus mejoras son muy deseadas por las empresas del sector, al conseguir este tipo de proceso una muy elevada producción con un bajo coste.

Debido a la dificultad de realizar un análisis teórico del comportamiento del fluido a su paso por las toberas para hilatura neumática, resulta imprescindible realizar un estudio experimental.

El método utilizado - la tecnología de velocimetría láser - presenta una gran ventaja respecto a los sistemas tradicionales (encoders, sondas) puesto que no influye en modo alguno en el comportamiento del sistema estudiado.

Por otro lado, fotografiar y filmar el proceso que siguen las fibras, arrastradas por el aire, aclara el comportamiento de éstas en el interior de la tobera, cosa que hasta ahora se sabía pero nunca de manera tan directa y clara. En consecuencia la información aportada será decisiva para optimizar en gran medida este proceso de hilatura.

Debido al reducido tamaño de éste tipo de tobera, se ha optado por construir una a escala mayor (en nuestro caso de 5:1). De esta manera podemos realizar un buen estudio de la velocidad del aire en los puntos más significativos y tener un campo de visión lo suficientemente grande para poder fotografiar y filmar el comportamiento de la hilatura. Otra exigencia cumplida es que la tobera consta de zonas transparentes permitiendo así analizar su interior.

---

\* Juan Carlos Sánchez García, Ing. Industrial.

\*\* José Antonio Tornero García, Ing. Industrial.

\*\*\* Dr. Ing. Josep M<sup>a</sup> Bergadà Grañó, Profesor Titular de Escuela Universitaria en el Departamento de Mecánica de Fluidos en la E.T.S.E.I.T. (U.P.C.).

\*\*\*\* Francesc Roig Munill, Ing. Industrial.

\*\*\*\*\* Dr. Ing. Eugeni Valencia Leonardo. Catedrático del Departamento de Mecánica de Fluidos en la E.T.S.E.I.B. (U.P.C.)

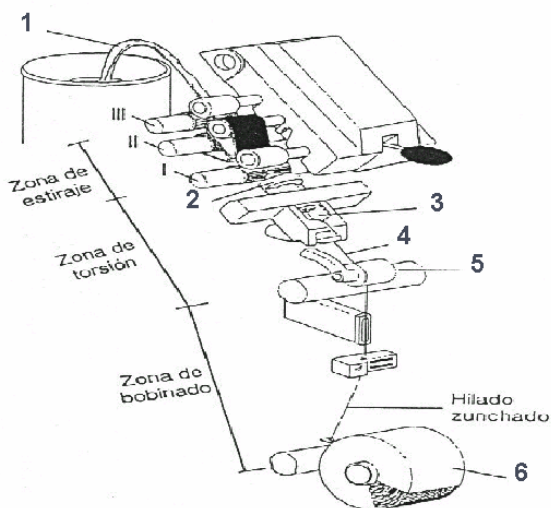
\*\*\*\*\* Dr. Ing. Llibert Coll Tortosa, Profesor Titular de Universidad, Director del Instituto Textil y Cooperación Industrial de Terrassa (INTEXTER), Jefe del Laboratorio de Sistemas y Procesos del INTEXTER (U.P.C.).

## 2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE HILATURA NEUMÁTICO.

El objetivo del sistema de hilatura neumática es el de conseguir una máquina de hilar de alto rendimiento, utilizando corrientes neumáticas para impartir la torsión sin mecanismos

torsionadores que limiten la velocidad de torsión y produzcan tensiones sobre el hilo, .

El proceso de hilado del sistema neumático consta de tres zonas: una de estiraje de las fibras, otra de torsión de fibras, donde el elemento principal es la tobera y una tercera zona de bobinado, (ver figura 1).



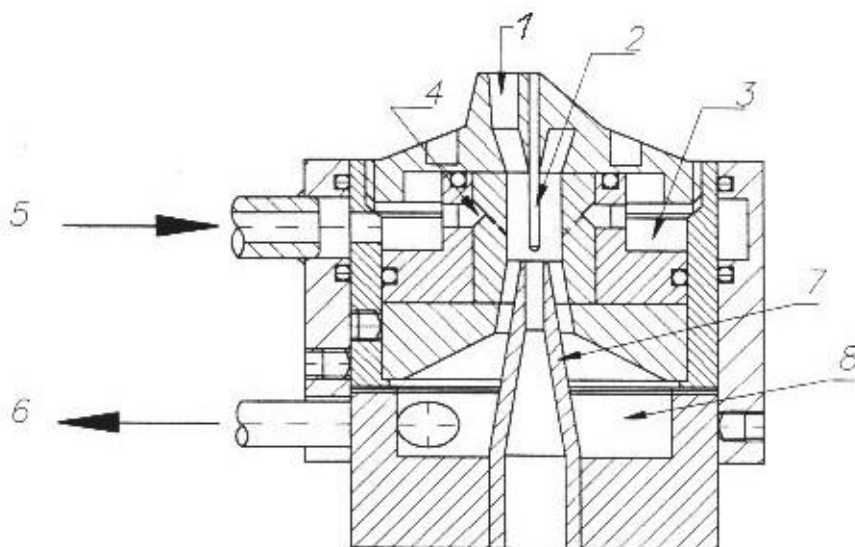
- 1.Mecha.
- 2.Tobera.
- 3.Bomba de vacío.
- 4.Hilo.
- 5.Cilindros extractores.
- 6.Bobina.

FIGURA 1: Sistema de hilatura neumático.

## 3. FUNCIONAMIENTO DE LA TOBERA MODELO (E 5:1).

El funcionamiento es el mismo que en la tobera prototipo. En esta tobera (ver figura 2), el aire procedente del compresor entra a presión(5), pasa por una cámara de presión(3) y sale por los inyectores(4). El aire al girar crea un vórtice cuya

depresión en el centro absorbe las fibras procedentes de la entrada exterior(1), guiadas por la aguja(2) chocan con la entrada del cono de hilatura(7) donde se produce el zunchado y el hilo sale por su interior. Las fibras que se sueltan pasan por la tobera de expansión(8) y son desalojadas por la salida lateral al exterior(6).



- 1-Entrada exterior.
- 2-Aguja de hilatura.
- 3-Cámara de presión.
- 4-Inyectores.
- 5-Entrada del compresor.
- 6-Salida lateral al exterior.
- 7-Cono de hilatura.
- 8-Tobera de expansión.

FIGURA 2: Tobera prototipo.

Las fibras aspiradas abrazan la aguja, que las guía y separa, antes de entrar en el cono de hilatura. El cono de hilatura tiene una doble misión;

canalizar el paso de las fibras ya hiladas hacia el exterior, y obstaculizar en su entrada un gran número de fibras de forma que posteriormente

pasan a zuncharse sobre el núcleo del hilo, debido a la acción de giro producida por el aire que sale de los inyectores (vórtex). Un pequeño número de fibras se desprenden y salen al exterior por la

salida del aire (salida lateral), pasando por la tobera de expansión.

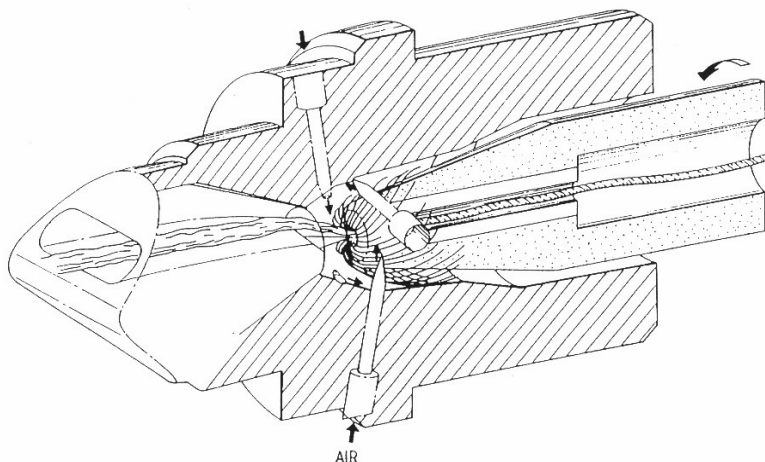


FIGURA 3: Detalle del proceso de zunchado.

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LA TOBERA MODELO

Dado que la tobera prototipo tiene unas dimensiones demasiado reducidas para poder estudiarla, el modelo ha sido diseñado a una escala 5:1. Como los dos caminos a seguir para el análisis en el interior de la tobera van a ser; uno por

anemometría láser y el otro fotografiado y filmado de imágenes, es necesario que la tobera conste de elementos transparentes. Por ello se optó por utilizar diversas partes de metacrilato, material transparente y fácilmente mecanizable. En la figura 4 se observa el desglose de los diversos componentes de la tobera.



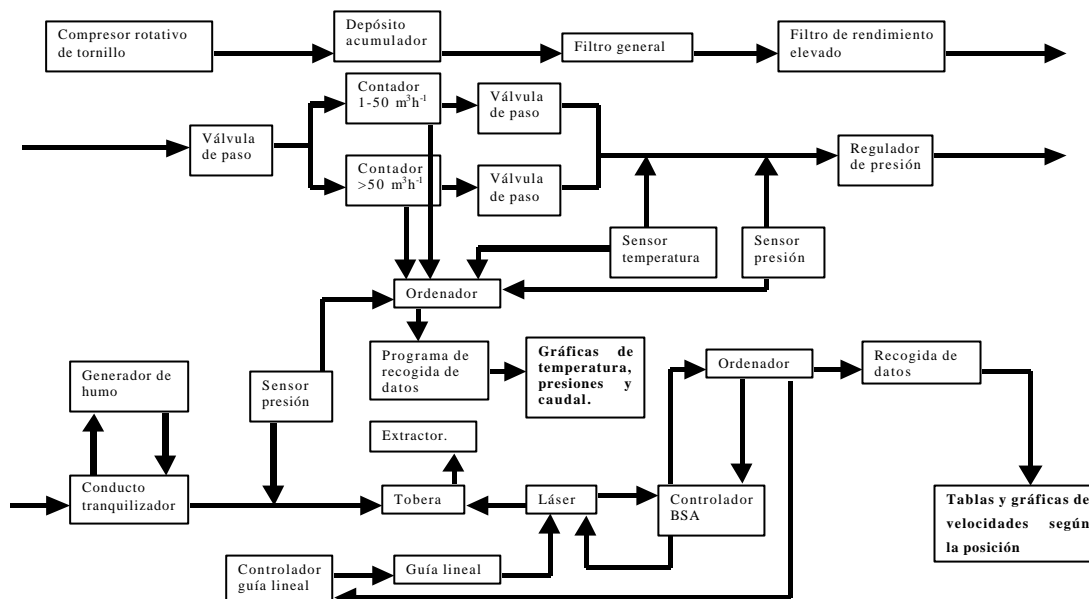
FIGURA 4: Despiece tobera modelo, y comparación con tobera prototipo.

#### 5. BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE VELOCIDADES

Las necesidades generales del banco de pruebas para el análisis de velocidades son en primer lugar el suministro de aire a presión, para el cual se ha utilizado un compresor que suministra un caudal de 100 l/s a una presión máxima de 10 bar. También se debe tener un control de la temperatura, para ello se ha climatizado el laboratorio manteniendo una temperatura constante

de 20 °C. Así mismo se ha colocado un sensor de temperatura en el conducto de aire. Al ser el aire un medio transparente se ha tenido que utilizar un generador de humo para poder medir con anemometría láser. También es necesario la utilización de un extractor para la evacuación del humo. Y por último es necesario efectuar la calibración del equipo de medición para las condiciones en que se va a utilizar.

**FIGURA 5:** Esquema del banco de pruebas para el análisis de velocidades.



En el diagrama anterior (figura 5), se puede ver el esquema del banco de pruebas. En primer lugar se tiene una parte de suministro de aire, en la cual se encuentra el compresor, un depósito acumulador, filtros, válvulas, contadores, un regulador de presión y un conducto tranquilizador en el cual gracias a un diafragma se aspira el humo. A continuación hay una parte de control que incluye sensores de presión y de temperatura, un ordenador equipado con una tarjeta de adquisición de datos y un software realizado con el programa

Labview que representa gráficamente los datos recogidos. Después se tiene la parte donde se sitúa la tobera, el equipo de medición y la guía lineal que controla la posición del láser, y por último la extracción de aire.

En las siguientes imágenes (figura 6), se puede observar el equipo de anemometría láser compuesto por, un ordenador, el controlador de espectro (BSA), una fuente de alimentación, el generador del láser, el divisor de haces y el cabezal.



**FIGURA 6:** Equipo de anemometría láser.

El funcionamiento del equipo de medición es por efecto Doppler, los dos haces de luz coherente se cortan dando origen al volumen de medición donde se forman franjas luminosas (intersecciones constructivas y destructivas de la

luz láser), gracias a las cuales es posible medir la velocidad de la partícula que pasa a través de ellas, determinando la frecuencia de la pulsación de luz reflejada.

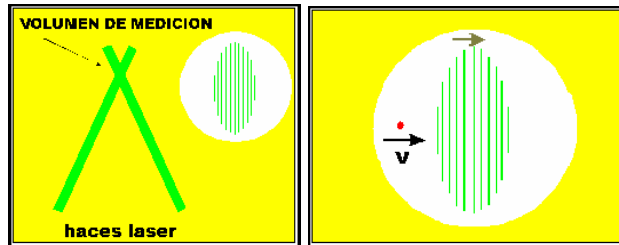


FIGURA 7: Volumen de medición.

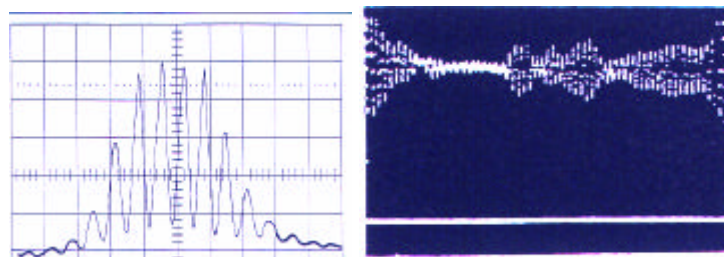
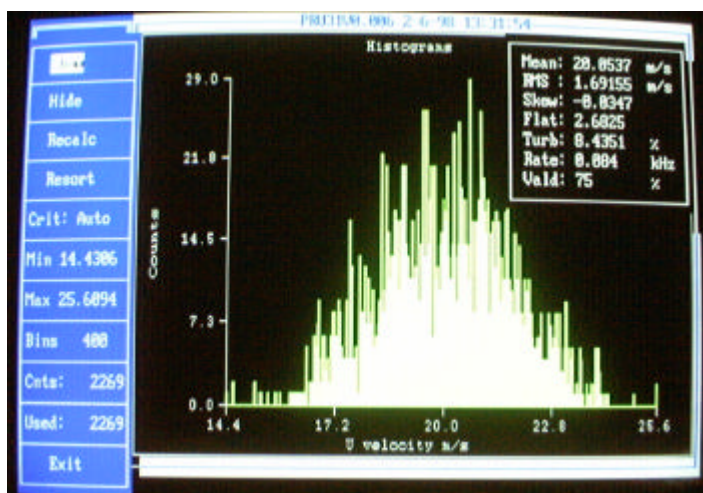


FIGURA 8: Espectros ideal y real.

El equipo de anemometría láser proporciona los valores de velocidad media del fluido, el RMS y un parámetro T relacionado con esta denominado turbulencia, el cual indica la dispersión de las mediciones realizadas respecto a la media. Para la validación de la medida hemos de fijarnos en la distribución de velocidades la cual

debe seguir una ley normal. En la figura 9 se muestra un ejemplo de una medición. En el eje de ordenadas se tiene el número de veces que se ha obtenido cada velocidad.



$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i (U_i - \bar{U})^2}{N}}$$

$$T = \frac{RMS}{V_{med}} \times 100$$

FIGURA 9: Distribución normal de velocidades.

Las presiones absolutas a las que se han realizado las pruebas han sido, 6, 8 y 10 bar. En la siguiente tabla se muestran los caudales

normalizados para las distintas presiones en la salida de la tobera.

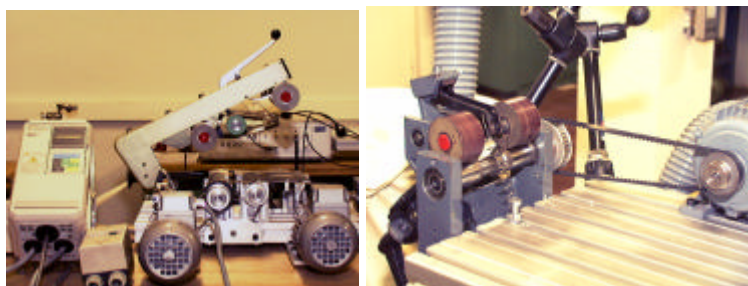
Entrada tobera		
PRESIÓN bar	CAUDAL $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ( $\times 10^{-3}$ ) (normalizado)	Densidad $\text{Kg}/\text{m}^3$
6 bar	7.35	7,159
8 bar	9.66	9,546
10 bar	12.39	11,932

FIGURA 10: Caudales para distintas presiones.

## 6. BANCO DE PRUEBAS PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES

Para la toma de imágenes es preciso poner en marcha el proceso de hilatura; para ello deben añadirse al banco de pruebas una serie de elementos como son el tren de estiraje, el cilindro extractor y una aspiración de fibras.

El tren de estiraje (ver figura 11), situado entre la mecha y la tobera, consiste en unos pares de cilindros que giran a distinta velocidad para estirar la vena de fibras introducida según la densidad (título) deseado. El cilindro extractor (ver figura 12), colocado a la salida de la tobera, tiene la misión de regular y mantener constante la velocidad de salida del hilo.



FIGURAS 11 y 12: Tren de estiraje y cilindro extractor.

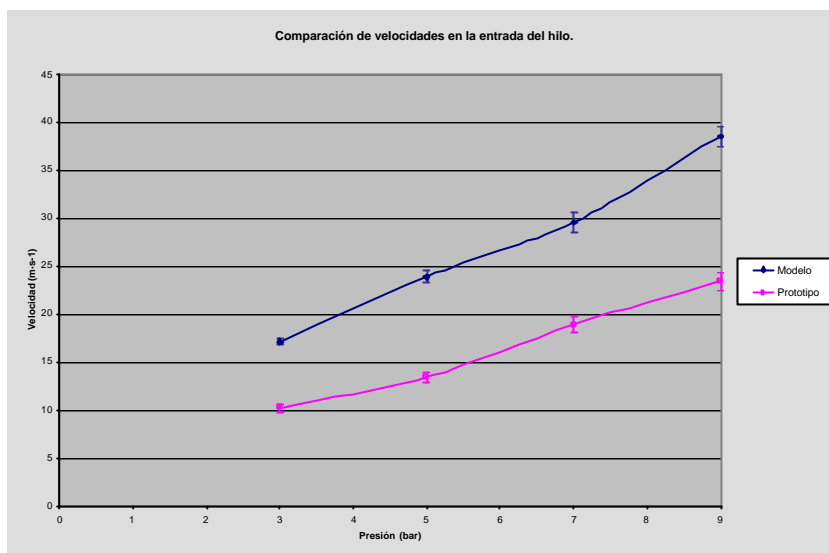
Normalmente en hilatura neumática se utiliza algodón y sus mezclas con fibras químicas como el poliéster, pero en nuestro caso se buscan fibras más largas para mantener la escala respecto a las fibras que se utilizan en la tobera a escala natural. Inicialmente se ha utilizado poliéster y lana, posteriormente se ha visto que la lana es más adecuada para las pruebas ya que su rizado característico provoca que las fibras se separen con más facilidad, con un comportamiento más parecido a las fibras de tamaño real (1:1).

Para la captura de imágenes se han utilizado cuatro configuraciones del banco de pruebas; dos de ellas con una cámara fotográfica digital y las otras dos toman imágenes utilizando una cámara de vídeo CCD en blanco y negro. Para la iluminación se han realizado combinaciones con un estroboscopio convencional y uno láser de vapor de cobre.

En las cuatro configuraciones se ha conservado, del banco de pruebas utilizado para el análisis de velocidades, toda la parte de suministro y control del aire a presión. Se ha añadido una parte para hilar compuesta por el tren de estiraje, el cilindro extractor y la bobinadora.

## 7. RESULTADOS OBTENIDOS

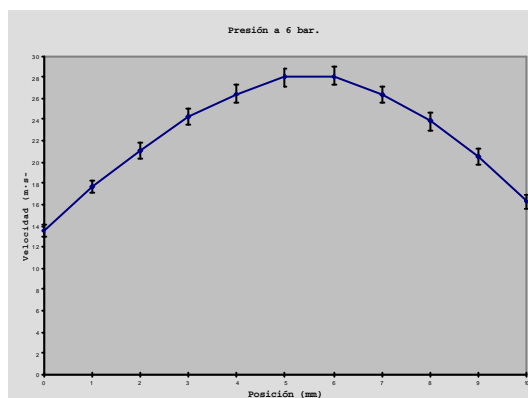
A partir de los resultados obtenidos en la medición de velocidades se ha realizado una comparación entre la tobera modelo (5:1) y prototipo (1:1). En la figura 13 se presenta un ejemplo que corresponde al proceso de entrada de las fibras. Se comprueba que los resultados tanto para el modelo como para el prototipo manifiestan la misma tendencia de aumento de velocidad del aire aspirado en función de la presión.



**FIGURA 13:** Comparación de velocidades en la entrada de la mecha.

En la figura 14 tenemos la distribución de velocidades a 6 bar, de la tobera modelo en la misma zona anteriormente mencionada. Con las mediciones realizadas se ha hecho un cálculo de

los caudales de aire que entran y salen de la tobera (figura 14).



**FIGURA 14:** Distribución de velocidades en la entrada de la mecha.

Zona	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Salida hilo	0,002
Entrada mecha	0,003
Salida aire	-0,012
Inyectores	0,007

**FIGURA 15:** Caudales en los orificios de la tobera modelo a 6 bar.

En el interior de la tobera se han realizado barridos desde la parte trasera, puesto que ésta no es simétrica ni vertical ni horizontalmente, se han efectuado medidas en cuatro planos formados cada

uno por tres líneas, efectuando 55 medidas de velocidad a lo largo de cada línea. En cada punto se han tomado 3000 muestras. El tiempo medio de cada medida es aproximadamente de dos minutos.

Todas las medidas se han realizado para 6, 8 y 10 bar. En la figura 16 tenemos un ejemplo; la velocidad tangencial en el plano inferior a la presión

de 6 bar. En ella se puede observar una velocidad máxima de 100m/s en el punto situado a la distancia axial de 30 mm.

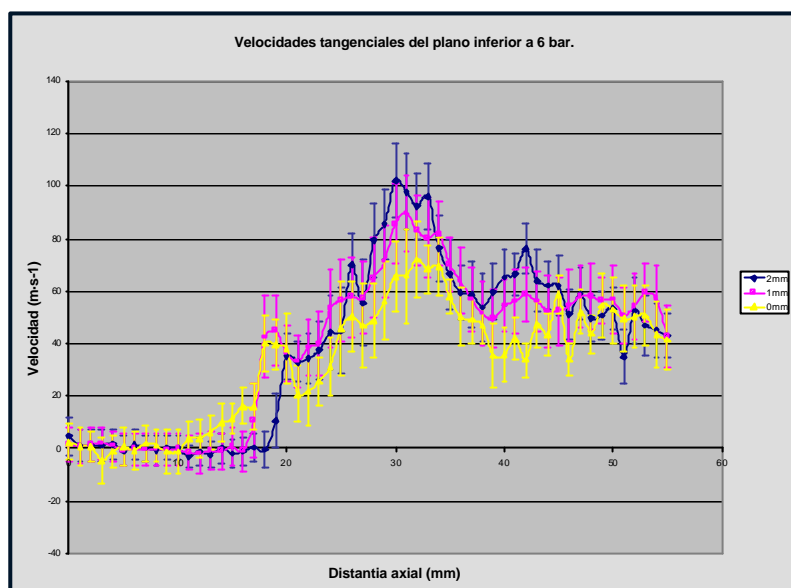
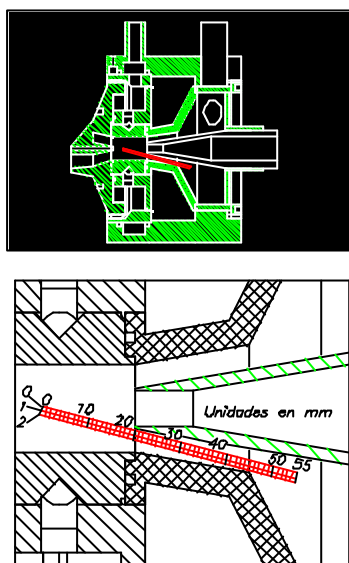
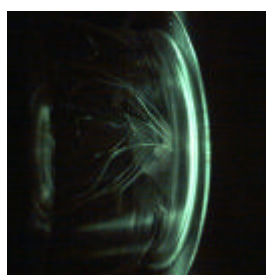


FIGURA 16: Distribución de velocidades tangenciales en el interior de la tobera modelo.

En lo que a la captura de imágenes se refiere, se han realizado diversos ensayos comentados anteriormente, un ejemplo de los resultados obtenidos lo tenemos en la figura 17,

que corresponde a una imagen en la cual se puede observar la posición de una misma fibra para cuatro pulsos de láser. Para iluminar se ha utilizado un generador de planos en la salida del láser.



1. Generador de planos.

4. Láser stroboscópico.  
f=14 KHz

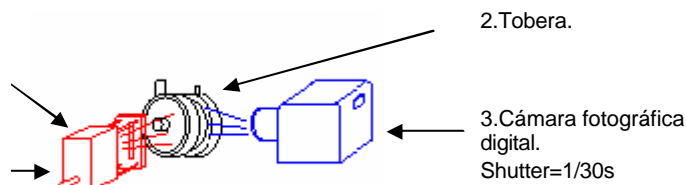


FIGURA 17: Imagen capturada con cámara fotográfica digital.

	Misión	Valor numérico.
1. Generador de planos	Establecer planos de luz donde se representará el movimiento de las fibras.	La frecuencia de los pulsos producidos por el láser vale 14 kHz.
2. Tobera	Dispositivo donde se genera el hilo.	Velocidades del flujo registradas en la figura 18 a y b.
3. Cámara fotográfica digital.	Obtiene imágenes de la posición de los hilos.	El shutter está abierto el intervalo de tiempo (1/30)s.



## 8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En primer lugar se representa los valores de las velocidades tangenciales, en su variación a lo largo del conducto de entrada, desde el punto 0 hasta el 55 (Fig. 16 y 18a), y a continuación la

velocidad tangencial para una sección perpendicular al eje de la tobera situado en un punto determinado del conducto de entrada (fig. 18b). Obsérvese la no simetría del flujo en los cuatro planos estudiados.

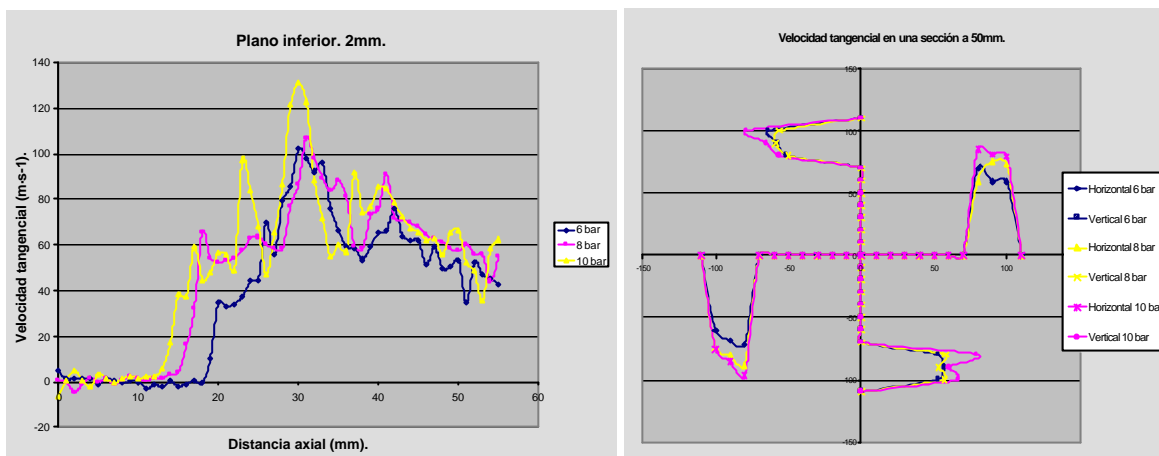


FIGURA 18:

a) Velocidades tangenciales para diferentes presiones a lo largo del conducto de entrada.

b) Distribución de velocidades tangenciales en una sección determinada.

A partir de los resultados obtenidos en la captura de imágenes se pudo confeccionar la figura 19. La función de cada componente es la siguiente. El láser estroboscópico produce 4 pulsos con una frecuencia de 14 kHz, correspondiendo cada pulso a una posición de un mismo hilo en el tiempo y en el espacio. En cambio, el shutter (compuerta del objetivo) de la cámara fotográfica digital permanece abierto un intervalo de tiempo 1/30s, dentro del cual quedan comprendidos los cuatro pulsos anteriores (Fig. 19).

Así, cuando el estroboscópio láser emita su primer pulso t1, la cámara fotográfica digital estará

abierta y filmará la posición del hilo en el instante t1, esta posición la denominaremos A1.

Para el pulso t2 captaremos, para el mismo hilo, la posición A2, y así sucesivamente. Midiendo la distancia entre A1 y A2, la velocidad del hilo se determina con la sencilla relación.  $V=(A1-A2)/(t2-t1)$ .

Repitiendo este proceso para los pulsos t3 y t4, se obtendrán valores sucesivos de la velocidad de la fibra del hilo.

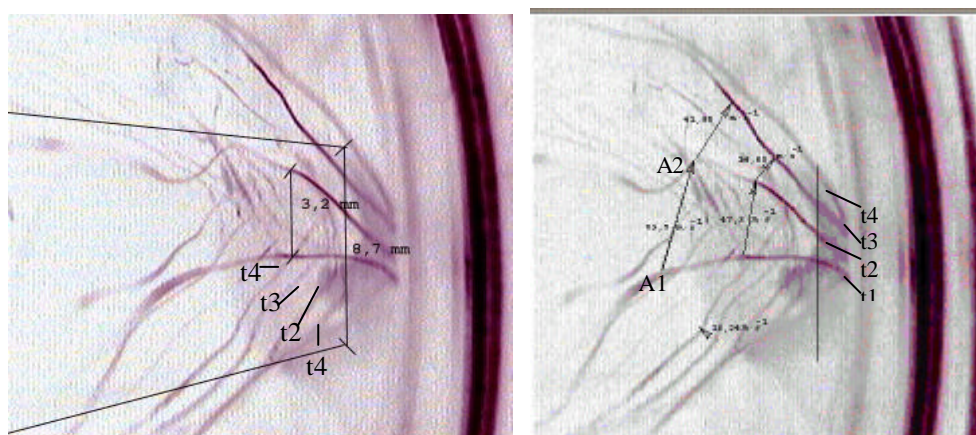


FIGURA 19: Análisis de una fotografía en cuatro pulsos: t1, t2, t3, t4, correspondientes a 4 posiciones del mismo hilo a lo largo del tiempo.

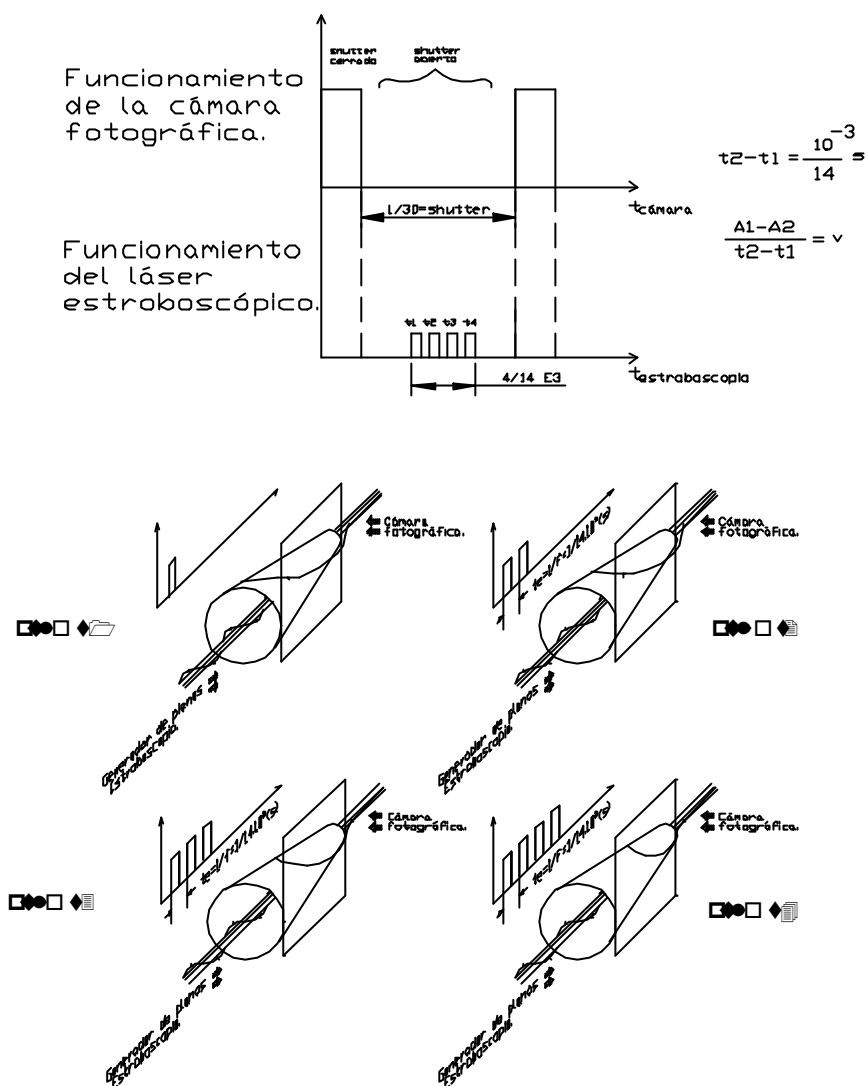


FIGURA 20: Sucesión de pulsos y evolución de la posición de un hilo a lo largo del tiempo.

La figura 20 muestra en la parte superior un diagrama que representa el tiempo de apertura del shutter de la cámara fotográfica y el periodo en que se producen los cuatro pulsos del láser. La parte inferior de dicha figura nos muestra cual es la evolución de una fibra girando alrededor del cono de hilatura, se observa que es lo que capta la cámara para cada uno de los pulsos del láser.

### 9. PUNTOS DE INTERÉS EN LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se expone a continuación un conjunto de observaciones sobre el proceso de medida fruto directo de nuestra experiencia.

- La superficie a través de la cual se mide con anemometría láser debe ser plana.
- Es recomendable que las partículas empleadas para medir en fluidos transparentes no dejen residuos líquidos, no erosionen ni se evaporen con rapidez.
- En flujos muy turbulentos es conveniente para cada zona de medición reajustar los parámetros óptimos del controlador BSA.
- Las medidas son válidas cuando las velocidades se distribuyen según una ley normal.
- Las configuraciones con estroboscopia convencional son sólo útiles para ajustar de forma rápida la tobera durante su funcionamiento pero no es adecuada para fotografiar, ya que la excesiva duración del pulso da imágenes borrosas para velocidades altas.
- Las imágenes obtenidas por grabación en vídeo son adecuadas para observar el comportamiento de las fibras, pero no proporcionan la calidad suficiente para obtener datos objetivos de velocidad.
- Las fotografías mediante cámara digital sincronizada con estroboscopia láser sí proporcionan la calidad necesaria para realizar

el estudio de velocidades, debido a la resolución de la matriz de la cámara y la perfecta sincronización entre la velocidad de obturación y los pulsos emitidos por el láser.

## 10. CONCLUSIONES

Para comprender con facilidad los razonamientos aquí expresados es conveniente tener a la vista la figura 2.

Las conclusiones se reducen a los puntos siguientes:

**10.1.** En primer lugar se pone de manifiesto que la presión ideal para la hilatura se encuentra de forma efectiva y económica entre 6 y 7 bar.

**10.2.** Puede afirmarse que el proceso de hilado mejoraría si se incrementase el número de inyectores, con lo cual se obtendría una mejor distribución del aire alrededor del cono de hilatura.

**10.3.** La tobera propiamente dicha debería experimentar ciertos cambios con el fin de eliminar la irregularidad en la producción del hilo, las fluctuaciones del hilo disminuirían si se redujese el diámetro de entrada del cono de hilatura; por otro lado, si el cono de hilatura fuese giratorio, ayudaría al desplazamiento de las fibras alrededor del mismo. En cuanto a la salida, se propone añadir una aspiración que facilite el proceso de extracción del hilo ya fabricado.

Tabla de magnitudes

Nomenclatura	Símbolo	Expresión Analítica	Significado físico	Utilidad
Velocidad instantánea	$U_i$	$V(\text{ms}^{-1})$	Velocidad de la partícula analizada	Análisis anemométrico
Velocidad media	$\bar{U}$	$V_{\text{med}}(\text{ms}^{-1})$	Velocidad media de las partículas.	Análisis anemométrico
Numero de partículas	N	-	Cantidad de partículas analizadas	Cálculo del RMS
Variancia	RMS	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i (U_i - \bar{U})^2}{N}}$	Variancia de la distribución normal	Análisis de las velocidades del flujo
Turbulencia	T	$T = \frac{RMS}{V_{\text{med}}} \times 100$	Porcentaje. Cantidad de muestras de velocidad que han dado un valor excesivamente separado de la media.	Conocimiento del comportamiento del fluido.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Análisis teórico experimental del flujo en una tobera coaxial para hilatura neumática.
- J.C. Sanchez; J. A. Tornero; J.M<sup>a</sup> Bergadà; Ll. Coll; E. Valencia; M. García. ISBN 956-7069-44-1
- Vol. 3 Artículo 95. IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Santiago-Chile. 23-26 Noviembre de 1999.
- Análisis de toberas neumáticas de Hilatura del tipo coaxial. A. Sanchez; J.A.Tornero; E. Valencia; Ll. Coll; J.M<sup>a</sup> Bergadà. Anales de Ingeniería Mecánica. Vol 2 pp 3-7 ISSN 0212-5072. Diciembre 1998.
- Colección: Curso de formación de hilatura de proceso algodonero:
- I Oficial de apertura, II. oficial de cardado y IV. oficial hilador, prof.dr-ing. Llibert Coll i Tortosa. Asesoramiento Pedagógico: Dr. Jaume Serramona López. Coordinación de edición: Emilio Espí Pérez. Dirección: Salvador Maluquer Trepal.
- The laser doppler technique, L.E. Drain, Atomic Energy Research. Establishment, Harwell. Wiley-Interscience publication.
- Laser doppler velocimetry, R.J. Adrian, Brian J. Thompson. SPIE Optical Engineering Press.
- Some ntf laser velocimeter instalation and operation considerations, W.W.Hunter, Jr., L.R. Gartrell, W.C. Honaker, NASA Langley Research Center Hampton, Virginia.
- Velocimetria laser-doppler en flujo cerrado, Echavarri, J.F. / Negueruela, A.I., Óptica Pura y Aplicada; 1983, 16 (2): 113-116, 1 REF.
- Representativity of the wind measurements by a laser doppler anemometer (lda) in the boundary layer of the atmosfere, Banakh, Victor A.; Smalikh, Igor N.; Kopp, Friedrich; Werner, Christian. Inst. of Atmospheric Optics, Tomsk, USSR.
- Pfc. Estudio de la tecnología de anemometría láser y su aplicación a procesos textiles (hilatura convencional y neumática). José Antonio Tornero García.
- Pfc. Diseño y construcción de un modelo de tobera neumática mediante la teoría de semejanza. Miquel Àngel Verger Martín.
- Pfc. Estudio en el banco de pruebas de una tobera coaxial para hilatura neumática. Juan Carlos Sánchez García.

Trabajo presentado en: 2000.03.23.

Trabajo aceptado en: 2000.05.25.