ANÁLISIS TEÓRICO EXPERIMENTAL DEL FLUJO DE AIRE EN TOBERAS DE HILATURA

J.Mª Bergadà*, J.A. Tornero**, V. Bailach,F. Roig****, E. Valencia*****y Ll. Coll******

0.1. Resumen

El laboratorio de Sistemas y Procesos textiles investiga, desde 1994, el sistema de hilatura neumática. El campo de investigación se basa tanto en el estudio del comportamiento mecánico de los órganos que forman el proceso como el estudio del hilo que de ello deriva, a fin de conseguir altas producciones de hilo con alta calidad del mismo. En este artículo se presenta el estudio del comportamiento del aire en el interior de la Tobera de Torsión Fugaz a partir del cálculo por elementos finitos. Esta Tobera forma parte del órgano Tobera Vórtex Murata.

Palabras clave: *Toberas neumáticas de hilatura.*

0.2. Summary: *FINITE ELEMENTS SIMULATION OF THE AIR-FLOW INSIDE A SPINNING-AIR-JET*

Textile processes and systems laboratory has been researching the spinning-air-jets since 1994. Mechanic behaviour of each organ of the process has been studied in order to get high production and high quality of thread. Using finite elements simulation, air behaviour inside a Torsion jet is presented in this article. This one belongs to the Murata Vortex pipe organ.

Key words: *Spinning air jets.*

0.3. Résumé: *SIMULATION NUMÉRIQUÉ PAR LA MÉTODÉ DES ÉLÉMENTS FINIS DE FLUX D'AIR DANS DES TUYÈRES DE FILATURE*

Le laboratoire de systèmes et procédes textiles effectue des recherches, depuis 1994, dans le systéme de filature pneumatique. Le domaine de recherche compren aussi bien le fonctionement mécanique des parties qui composent le système que l'étude du fil produit par ce procédé, ayant pour but d'augmenter la production tout en préservant une haute qualité du fil. Dans cet article est présentée l'étude du comportement de l'air dans la tuyère de torsion fugace au moyen du calcul par éléments finis. Cette tuyère est une partie de la tuyère vortex Murata.

Mots clé: *Tuyères de filature.*

Tabla de magnitudes neumáticas que intervienen en el sistema de hilatura por zunchado neumático:

	Nomenclatura	Símbolo	Expresión analítica	Significado físico	Uso en este proyecto
Parámetros adimensionales	Número de giro	S	$S = \int_{R1}^{R2} u \cdot w \cdot \partial r \Big/ R \int_{R1}^{R2} u^2 \cdot r \, \partial r$	Ratio entre el momento angular del flujo vs producto del radio y el momento axial del flujo.	Comparación entre la velocidad de giro y la velocidad de avance del fluido.
	Número de Reynolds	Re	$Re = \rho \times \overline{U} \times D_h / \mu$	Relación entre fuerzas de inercia vs fuerzas de viscosidad	Comparación adimensional de les velocidades y caracterización del flujo
	Número de Euler	Eu	$Eu = \frac{P}{\rho \overline{U}^2 / 2}$	Fuerzas de presión vs Fuerzas de inercia	Comparación adimensional de las presiones
	Número de Mach	Ma	$Ma = V_{abs} \Big/ \sqrt{\gamma RT}$	Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas elásticas, originadas por la compresibilidad del fluido.	Refleja las zonas en donde la compresibilidad del fluido es relevante
Modelo de turbulencia de 2 ecuaciones k-ε	viscosidad de remolino	μ_t	$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$	Es el cociente entre las tensiones turbulentas y los gradientes de velocidad media.	Relaciona las tensiones aparentes de Reynolds con la variación de velocidades medias en cada uno de los ejes coordenados.
	conductividad térmica de remolino	K_t	$K_t = \mu_t C_p / \sigma_t$	Es el cociente entre el transporte de calor turbulento y el gradiente de temperatura.	Da los tres términos desconocidos de transporte de calor turbulento de la ecuación de la energía en función de un único parámetro.
	Energía cinética turbulenta	k	Ver apartado 3.2	Inercia de la velocidad turbulenta	Medida de la turbulencia del fluido en forma de energía
	Ratio de disipación de k	ε	Ver apartado 3.2	Disipación de la energía cinética turbulenta	Correlación entre la viscosidad de remolino y la energía turbulenta

* Dr. Ing. Josep Mª Bergadà.Grañó, Profesor Titular de Escuela Universitaria en el Departamento de Mecánica de Fluidos en la E.T.S.E.I.T. (UPC).
** José Antonio Tornero García, Ing. Industrial.
*** Vicenç Bailach Bel. Ing. Industrial.
**** 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. (UPC).
****** 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

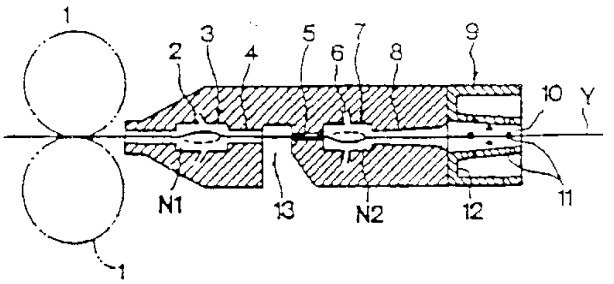
Nomenclatura utilizada en el artículo:

C_1, C_2	Constantes para el modelo k-ε.
$C\mu$	Constante en la expresión de μ_t
$\sigma_\kappa, \sigma_\varepsilon$	Constantes de difusión del modelo k-ε.
C_P	Calor específico a presión constante.
D_h	Diámetro hidráulico.
K	Conductividad térmica.
P	Presión.
r	Variable radial.
T	Temperatura.
t	Tiempo.
Uj	Velocidad en la dirección *j*.
U	Componente axial de la velocidad.
$\overline{U}$	Componente media de la vel. Axial.
V_{abs}	Velocidad absoluta.
w	Velocidad de giro.
x_j	coordenada en la dirección *j*.
ρ	Densidad del fluido.
μ	Viscosidad absoluta.
γ	Ratio de los calores específicos.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de hilatura neumática permite un aumento notable en la producción del hilo respecto los otros procesos utilizados en la industria. Sin embargo, los hilados obtenidos son de calidad inferior a los producidos por el sistema convencional (continua de anillos). Ello ha motivado que el Laboratorio de Sistemas y Procesos investigue en este campo a fin de mejorar las características del hilo y a su vez, conseguir velocidades de producción más altas. Actualmente existe en el mercado el proceso por zunchado neumático utilizando toberas del tipo Vórtex. Existen varios tipos de estas toberas, siendo el modelo Murata el más comercializado. A fin de poder desarrollar mejores toberas, se estimó oportuno estudiar tanto el comportamiento del aire como las propiedades del hilo obtenidas con este último modelo.

El principio de funcionamiento del zunchado neumático usando el modelo Murata consiste en un sistema de estiraje cuya misión es tirar una cinta de fibras paralelas a partir de un conjunto de pares de rodillos con velocidades crecientes en el sentido de avance de una cinta de fibras dispuestas paralelamente. Ello provoca el estiraje de esta consiguiendo una densidad de fibras paralelas óptima para hilar. Este conjunto de fibras es estirado por el tren de estiraje (ver figura 1) introduciéndolas en el órgano Murata. Dicho modelo posee dos toberas: tobera de destorsión y tobera de torsión fugaz. La primera de ellas consiste básicamente en una cámara circular donde 4 inyectores desembocan tangencialmente y con una inclinación de 45º respecto el eje axial. En ella, gracias a la inyección de aire a presión, se genera un vórtice inducido consiguiendo abrir las fibras del extremo mientras las fibras situadas en el núcleo sufren una ligera torsión. A continuación todo el conjunto de fibras se introduce en la tobera de torsión fugaz. En ella 4 ó 8 inyectores derivan hacia una cámara de hilatura de sección circular tangencialmente a ella y perpendicularmente al eje axial. Al igual que la anterior, se induce un vórtice de aire, pero de sentido de rotación inverso al provocado por la tobera de destorsión. Con ello, el núcleo de fibras se "desenrosca" ligeramente mientras las fibras externas giran alrededor del núcleo produciendo un zunchado. Finalmente el hilo es arrastrado por un cilindro de producción hacia la bobina.

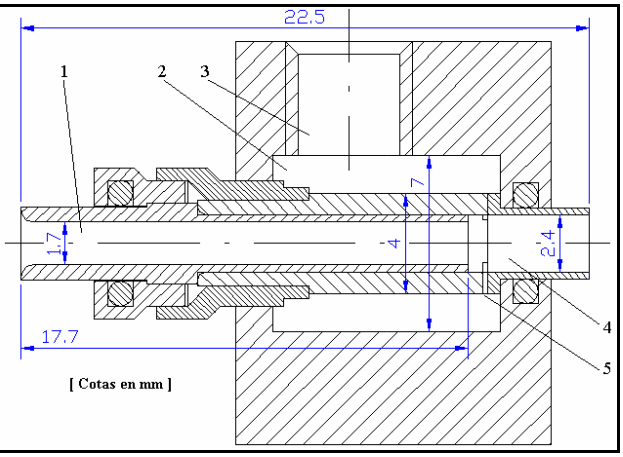


1.- Cilindros de estiraje
2.- Conjunto de 4 inyectores a 45º
3.- Cámara de hilatura.
4.- Condicionador de balón.
5.- Tubo de entrada a la tobera de torsión fugaz.
6.- Conjunto de 4, 6, 8 ó 12 inyectores a 90º.
7.- Cámara de hilatura
8.- Limitador de balón.
9.- Silenciador.
10.- Conducto convergente.
11.- Orificios radiales.
12.- Cámara de expansión.
13.- Cámara intermedia.
N_1.- Tobera de destorsión.
N_2.- Tobera de torsión fugaz.
Y.- Hilo de salida.

FIGURA 1: Esquema del conjunto de toberas en el modelo Murata.

Según lo escrito, la producción del hilo está íntimamente ligada al vórtice de aire generado y a ello se debe el interés por estudiar como evoluciona el vórtice dentro de las toberas. Concretamente, en este trabajo se ha estudiado el comportamiento del flujo de aire en el interior de la tobera de torsión fugaz.

El método de los elementos finitos es una herramienta potente y económica que permite realizar predicciones más o menos exactas del flujo del aire, en este caso y compararlas con la realidad. Dadas las pequeñas dimensiones de la tobera (figura 2), este método permite un estudio completo de toda la región interna de la tobera otro modo difícil de conseguir usando bancos de ensayo.



1.- Tubo de entrada	2.- Depósito
3.- Entrada de aire al depósito	4.- Cámara de hilatura
5.- Conjunto de 4 inyectores a 90 º de sección cuadrada de lado 0,2 mm.	

FIGURA 2: Esquema del conjunto de la tobera de torsión fugaz.

2. LA TOBERA DE TORSIÓN FUGAZ. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

Anteriormente se ha descrito el funcionamiento de esta tobera. Recordemos que básicamente se induce un vórtice en el interior de la cámara de hilatura gracias al aire inyectado al interior de la cámara de forma tangencial. La diferencia de sección apreciable entre el tubo de entrada y la cámara de hilatura (figura 2) produce el fenómeno venturi, aspirando aire desde el primero hacia la salida de la cámara, mientras, el vórtice inducido en la cámara de hilatura evoluciona hacia la salida.

En el trabajo se han modelado tres toberas de torsión fugaz con 4, 6 y 8 inyectores sin variar las dimensiones restantes, y en cada modelo se ha trabajado con presiones relativas en el depósito de 1, 3 y 5 bar, siendo la presión relativa a la entrada del tubo de entrada y a la salida de la cámara de hilatura de 0 bar.

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

3.1. Mallado de los modelos

Para llevar a cabo el estudio por elementos finitos, el Laboratorio de Sistemas y Procesos dispone del programa comercial COSMOS/M ver 2.0. La primera parte del trabajo consiste en realizar el mallado de la tres toberas de torsión fugaz. En éstas es importante conseguir un mallado óptimo para lograr la convergencia de los cálculos.

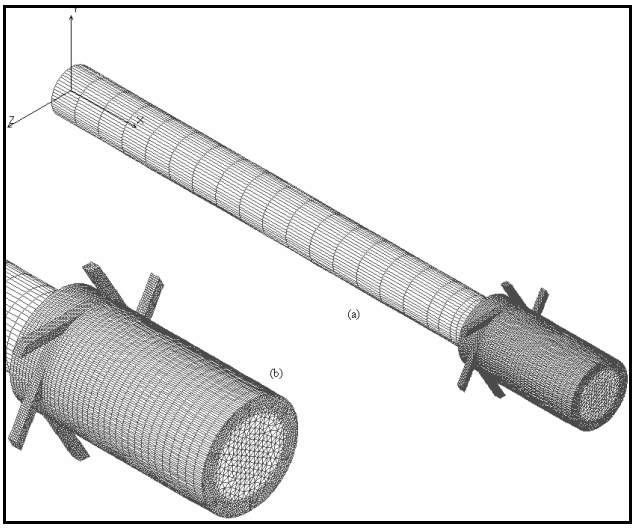


FIGURA 3: Mallado del conjunto toberas e inyectores (caso 6 inyectores).

Tomando como ejemplo el mallado definitivo de la tobera de 6 inyectores (figura 3), se observa que la cámara de hilatura presenta una malla muy densa agudizándose mas a medida que nos aproximamos a la pared interna y en la región de los inyectores. Ello permite que los cálculos no diverjan o lleguen a resultados con altos valores residuales, ya que, estas regiones son las más conflictivas por presentar intensidades de vórtice mas elevadas como posteriormente se comprobará.

3.2. Ecuaciones matemáticas

La base matemática que el programa COSMOS/M dispone para el cálculo integra las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos para régimen turbulento. Éstas son:

- Ecuación de continuidad.

$$\frac{\delta\rho}{\delta t}+\sum_{J=1}^{J=3}\frac{\delta\rho U_j}{\delta x_j}=0$$

- Ecuaciones Navier-Stokes para regímenes turbulentos.

$$\rho\frac{\delta U_i}{\delta t}+\sum_{j=1}^{J=3}\rho U_j\frac{\delta U_i}{\delta x_j}=\rho g_i-\frac{\delta P}{\delta x_i}$$

$$+\sum_{J=1}^{J=3}\frac{\delta}{\delta x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right]+S_w$$

- Principio de conservación de la energía para régimen turbulento.

$$\rho C_p\left(\frac{\delta T}{\delta t}\right)+\sum_{J=1}^{J=3}\rho C_p U_j\left(\frac{\delta T}{\delta x_j}\right)=\sum_{J=1}^{J=3}\frac{\delta}{\delta x_j}\left((k+k_t)\frac{\delta T}{\delta x_j}\right)+q_v$$

A diferencia del modelo matemático utilizado en régimen laminar existen dos variables nuevas: La viscosidad de remolino (μ_t) y la conductividad térmica de remolino (k_t). Definidas por Bousinesq, considerando que los efectos de la turbulencia son isotrópicos, pretenden explicar el fenómeno de la turbulencia estableciendo una analogía entre el movimiento molecular, reflejado en la ley de viscosidad de Stokes para flujos laminares, y el movimiento de una porción del fluido turbulento que, como las moléculas, intercambia movimiento con otra porción.

El programa COSMOS/M, utiliza el modelo de 2 ecuaciones $k\text{-}\varepsilon$. Este modelo refleja la turbulencia del fluido en términos de energía cinética y disipación de esta energía.

Ecuación de la viscosidad de remolino: $\mu_t=C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon}$

Ecuación de la conductividad térmica de remolino: $k_t=\frac{\mu_t C_p}{\sigma_t}$

Ecuación de la energía cinética turbulenta:

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t}+\sum_{J=1}^{J=3}\rho U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\sum_{J=1}^{J=3}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K}+\mu\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]-\rho\varepsilon+$$

$$+\mu_t\left[2\sum_{J=1}^{J=3}\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_j}\right)^2+\frac{1}{2}\sum_{J=1}^{J=3}\left(\sum_{I\neq J}\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i}+\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)^2\right)\right]$$

Ecuación de el ratio de disipación de la energía cinética turbulenta:

$$\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\sum_{J=1}^{J=3}\rho U_j\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}=\sum_{J=1}^{J=3}\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}+\mu\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+$$
$$+C_1\mu_t\frac{\varepsilon}{k}\left[2\sum_{J=1}^{J=3}\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_j}\right)^2+\frac{1}{2}\sum_{J=1}^{J=3}\left(\sum_{I\neq J}\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i}+\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)^2\right)\right]$$

El sistema está cerrado con nueve ecuaciones y nueve incógnitas. Por otro lado las ecuaciones del transporte y disipación de la energía cinética turbulenta llevan asociadas una serie de constantes características del tipo de fenómeno que se desee estudiar. Concretamente, el programa COSMOS/M utiliza las correspondientes al modelo k-ε estándar. Dichas variables se resumen en la siguiente tabla:

Constantes de las ecuaciones k-e		Valor
C_μ	Constante empírica	0.09
C_1	Coeficiente para la correlación presión - tensión	1.44
C_2	Coeficiente para la correlación presión - tensión	1.92
σ_k	Constante de difusión	1.00
σ_ε	Constante de difusión	1.30

3.3. Propiedades del aire y condiciones de contorno

Los cálculos se han realizado considerando:

- Estado permanente.
- Aire seco.
- Paredes adiabáticas a temperatura 293 K.
- Se cumple la ley de los gases perfectos.

Las propiedades físicas del aire necesarias se resumen en la tabla siguiente:

Propiedades físicas (Presión de referencia, 101,3 KPa. Temperatura de referencia, 293 K)	Valor
Densidad (ρ) [Kg/m^3]	1,2047
Viscosidad dinámica (μ) [Pa s]	1,817*10^{-5}
Conductividad térmica (K) [W/mK]	0,02563
Ratio Cp/Cv	1,4
Calor específico (Cp) [J/Kg K]	1004

Excepto la densidad, las propiedades se consideran constantes dado que, las presiones de trabajo son bajas (máximo 5 bar relativo) y los gradientes de temperatura son reducidos. El error máximo producido comparado con el uso de ecuaciones empíricas más ajustadas es del 5%.

La densidad se calcula a partir de la ecuación de estado. A presiones bajas el aire puede considerarse como fluido ideal. El error máximo cometido respecto el comportamiento real es del 3%.

Por otro lado, se recuerda que, cada modelo se ha simulado con presiones de 1, 3 y 5 bar relativos del depósito. Estos valores se han introducido en las secciones de entrada de los inyectores. La presión en la sección de entrada del turbo de entrada y en la sección de salida de la cámara de hilatura es, en todos los casos, de 0 bar.

Por último, en las proximidades de las paredes se cumple la Ley Universal de Pared.

4. RESULTADOS

A partir de algunos ejemplos de los 3 modelos se describe, de forma general, el comportamiento interno del aire.

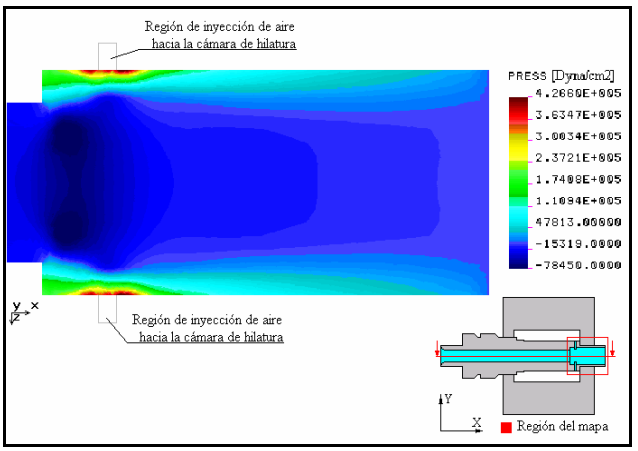


FIGURA 4: Mapa de presiones relativas en la cámara de hilatura (región de inyección de aire). Caso 8 inyectores, presión de trabajo 5 bar relativo.

Como se aprecia en el ejemplo de la figura 4, se crea una zona de depresión que decrece a medida que el fluido se aleja hacia la salida de la cámara y a medida que se aproxima a la pared interna. El gradiente negativo de presión generado entre la sección del tubo de entrada y esta zona provoca la succión de aire exterior hacia la cámara de hilatura. Esto es apreciable en la figura 5.

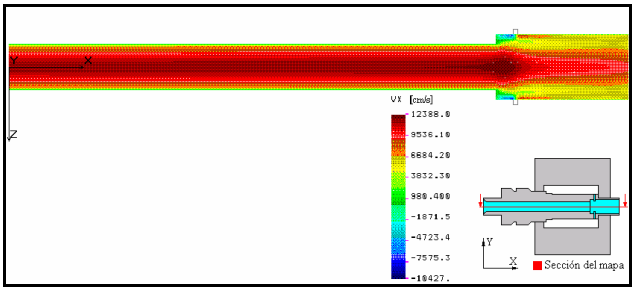


FIGURA 5: Mapa de velocidades axiales (Vx) a lo largo del eje de la tobera. Caso 6 inyectores, presión de trabajo 3 bar relativo.

Los colores rojizos de la figura 5 indican velocidades en el sentido positivo del eje X (eje axial)

confirmando lo explicado anteriormente. Una pequeña región del cambio de sección muestra una recirculación del fluido (representados con colores azulados) dado que, el aire inyectado hacia la cámara de hilatura se expansiona por todas partes. Por lo tanto, aunque el fluido circula hacia la salida de la cámara de hilatura, es inevitable que cierto cabal inyectado se dirija en sentido contrario, o sea hacia el sentido negativo de X, invirtiendo el sentido de circulación en la región del cambio de sección.

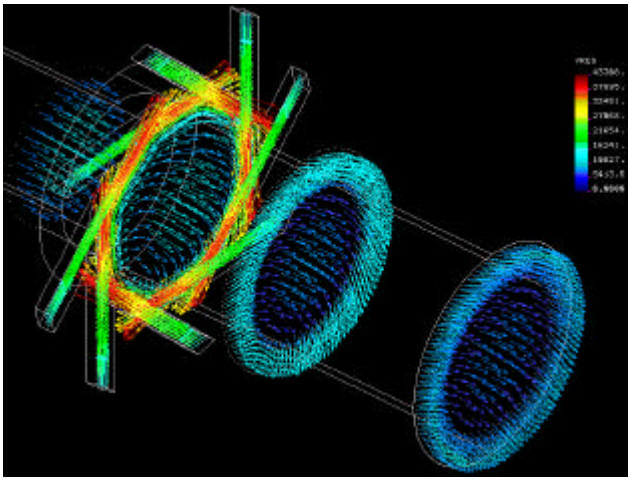


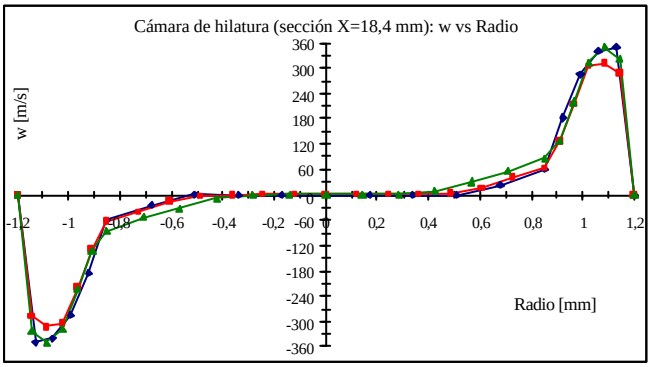
FIGURA 6.: Vectores velocidad absoluta a lo largo de la cámara de hilatura. Caso 8 inyectores, presión de trabajo 3 bar rel.

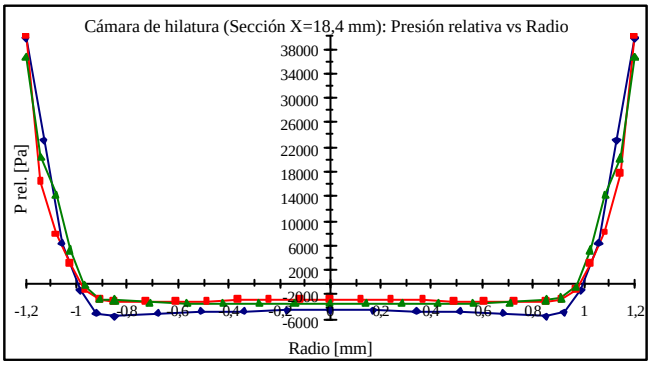
Por otra parte, el aire procedente de los inyectores se introduce en la cámara de hilatura de forma tangencial, induciendo un vórtice como se aprecia en el caso 8 inyectores de la figura 6. Éste se disipa a medida que el fluido se dirige hacia la salida de la cámara. En la misma figura se aprecia que el vórtice inducido afecta a toda la cámara de hilatura, no siendo así en el tubo de entrada, donde no existe giro alguno de fluido.

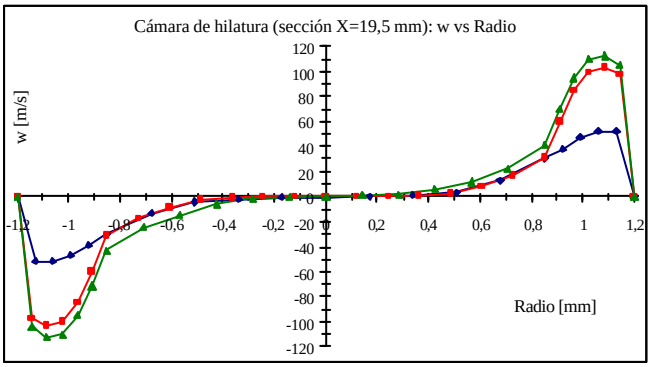
4.1. Comparación de los resultados de los 3 modelos

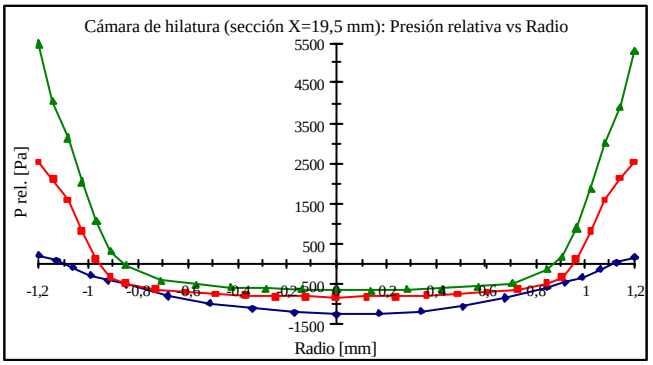
Anteriormente se ha explicado, de modo general, cual es el comportamiento de los tres modelos bajo las condiciones de trabajo fijadas. Para efectuar una comparación en cada condición de trabajo (1, 3 y 5 bar relativo en el depósito), se han determinado:

- Distribuciones de velocidades axiales y tangenciales o de giro en función del radio a lo largo de la tobera.
- Distribuciones de presiones relativas en función del radio a lo largo de la tobera.
- Parámetros adimensionales a lo largo de la tobera. Estos son Nº de Reynolds, Nº de giro, Nº de Mach y el Nº de Euler.









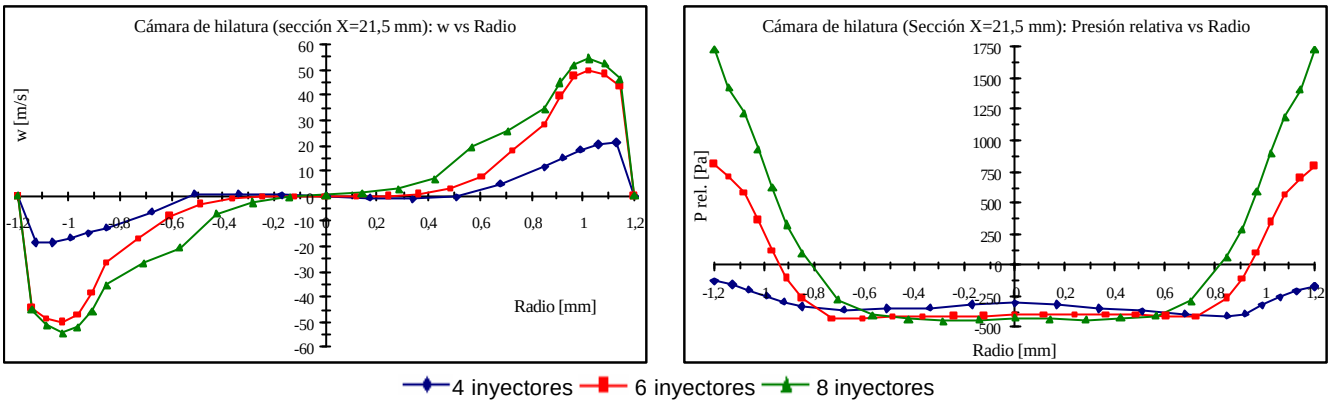


FIGURA 7: Distribuciones de la velocidad de giro (w) y de la presión (P) en función del radio en tres secciones de la cámara de hilatura (ver figura 8), para los modelos 4, 6 y 8 inyectores con presión del depósito de 3 bar relativo.

Como ejemplo, la figura 7 muestra las distribuciones de velocidad de giro y de presión relativa para los casos: 4, 6 y 8 inyectores, a una presión de depósito igual a 3 bar relativo. Estas distribuciones corresponden a las esquematizadas en la figura 8.

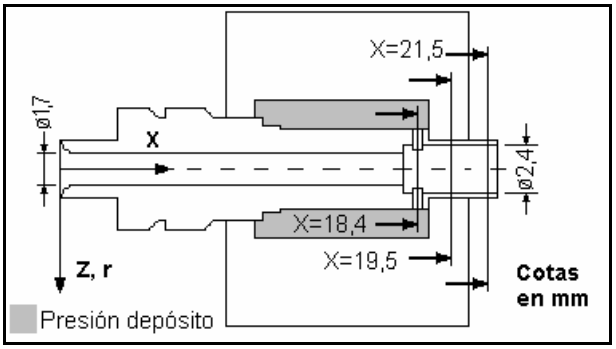


FIGURA 8: Visualización de las secciones correspondientes a la figura 7.

En la distancia axial X=18,4 mm se produce la expansión del aire de los inyectores hacia la cámara de hilatura. Esto conlleva la generación de un vórtice, cuya intensidad es máxima en las proximidades de la cara interna de la cámara. En esta sección, independientemente del número de inyectores, la distribución de la velocidad de giro (w) en función del radio es la misma.Con ello se concluye que: el vórtice inducido no está en función del número de inyectores del modelo, sino de la presión que haya en la entrada de los mismos, como se aprecia en el ejemplo del modelo 8 inyectores (figura 9).

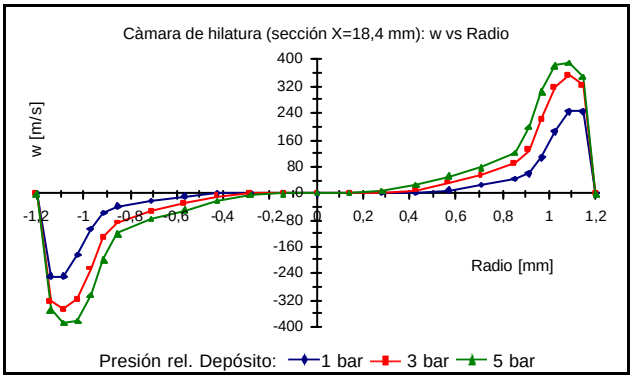


FIGURA 9: Modelo 8 inyectores. Plano medio de inyección: Velocidad de giro (w) en función del radio y de la presión del depósito.

El vórtice inducido pierde intensidad a medida que el flujo viaja hacia la salida (figura 7). El número de inyectores influye en su decaimiento. Por ejemplo, en el plano x= 21,5 mm, próximo a la salida, el modelo 4 inyectores ha perdido gran cantidad de vórtice comparado con los otros modelos.

Por otro lado, en todas las secciones se distingue cómo los valores máximos de giro están en una pequeña zona próxima a la pared, perdiendo valor rápidamente al dirigirse hacia el centro del tubo.

Este razonamiento puede explicarse matemáticamente a partir de las ecuaciones Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas. Como hipótesis se toma como nula la velocidad en el eje radial. La ecuación del momento cinético en el eje de coordenadas radial queda simplificada, y tiene por expresión:

$$-\frac{w^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial P}{\partial r}$$

La velocidad de giro aumenta si el gradiente de presión lo hace. Las gráficas de presiones en función del radio de la figura 7 lo describen. Generalmente los gradientes de presión son muy altos en las proximidades de la pared y disminuyen rápidamente al acercarse al centro. Ello justifica lo anunciado en el párrafo anterior.

Comparando estas gráficas para los diferentes modelos, se comprueba que a mayor número de inyectores mas altos son los gradientes, justificando que el modelo de 8 inyectores tenga intensidades de vórtice mas altas que el modelo 4 inyectores.

4.2. Parámetros adimensionales

A fin de comparar los tres modelos de una forma mas generalizada se hallaron valores adimensionales. Entre ellos, los mas interesantes son el Número de Reynolds (Re), el Número de giro o Índice de giro (S) y el Número de Mach (Ma).

4.2.1. Número de Reynolds (Re)

Los parámetros de Reynolds, expresado en la tabla del capítulo Introducción, se han calculado a lo largo del eje axial usando la velocidad axial media de cada sección.

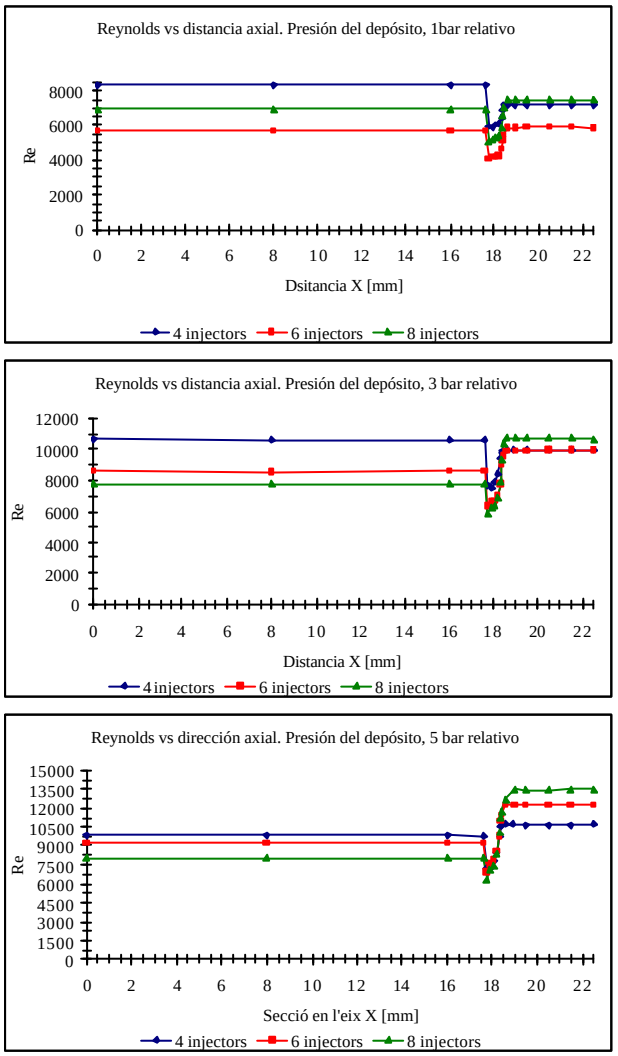


FIGURA 10: Gráficas de Reynolds a lo largo del eje axial para los modelos de 4, 6 y 8 inyectores a presiones del depósito de 1, 3 y 5 bar relativos.

Las gráficas de Reynolds, figura 10, indican, por cada modelo y presión del depósito, cómo evoluciona el régimen del flujo según la distancia axial. En todos los casos, éste corresponde al propio de la zona de turbulencia poco desarrollada.

El caudal másico es proporcional al Nº de Reynolds. De este modo, las gráficas de la figura 10 permiten comparar entre los diferentes modelos el caudal aspirado por el tubo de entrada: Cuanto mayor es el número de inyectores menor es el caudal aspirado.

4.2.2. Número de giro (S)

El número de giro S, introducido por Senoo y Nagata el año 1972, es un parámetro adimensional que relaciona el momento de la velocidad tangencial o de giro con el momento de la velocidad axial. Su expresión matemática figura en la tabla del capítulo Introducción. Este valor adimensional es importante para entender cómo evoluciona el giro del fluido a lo largo de la distancia axial de la cámara de hilatura.

Todas las gráficas de distribuciones de velocidades de giro para cada modelo y condición de trabajo se resumen en las gráficas de S expuestas en la figura 11: El valor de S crece rápidamente desde la entrada de la cámara logrando el valor máximo en el área de inyección. A partir de este punto, el valor de S cae de forma progresiva en todos los modelos, poniendo de manifiesto que, a medida que el fluido se aproxima a la salida, la componente de velocidad de giro se disipa. Pero se notan grandes diferencias entre los máximos presentes en los modelos de 6 y 8 inyectores respecto el de 4, lo cual indica un mayor aprovechamiento del vórtice inducido en estos modelos.

Es presumible que en la salida todavía existe vórtice, pues en ningún caso el Nº de giro se anula.

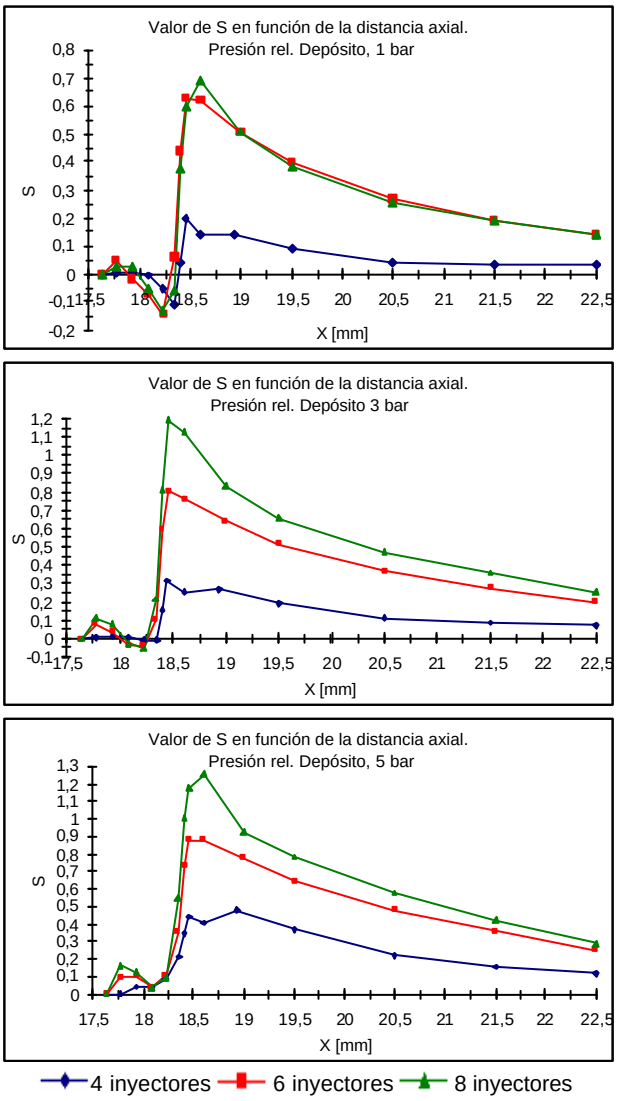


FIGURA 11: Gráficas del número de giro (S) en la cámara de hilatura.

En los comentarios a la figura 5 se ha indicado la existencia de una pequeña región de recirculación de flujo, próxima al cambio de sección

tubo de entrada-cámara de hilatura. Este hecho se aprecia en los valores negativos de S (figura 11), pues los vectores velocidad axial son de sentido contrario al eje axial.

En la misma figura 11 es visible el efecto de esta recirculación. Los valores negativos de S son causados por el momento generado por la distribución de velocidades axiales de sentido negativo a las X, siendo mayores al correspondiente generado por las velocidades positivas. En consecuencia S toma valores por debajo del cero.

4.2.3. Número de Mach (Ma).

El Nº de Mach se ha calculado a partir de velocidades absolutas. El Nº de Mach de las gráficas representa el valor medio en cada sección. El tubo no alcanza el punto de estrangulación, aunque claramente se aprecia que la región de inyección presenta un pico alto motivado por las altas velocidades de inyección. Ello indica que se puede trabajar a presiones de depósito más altas antes de estrangular el tubo.

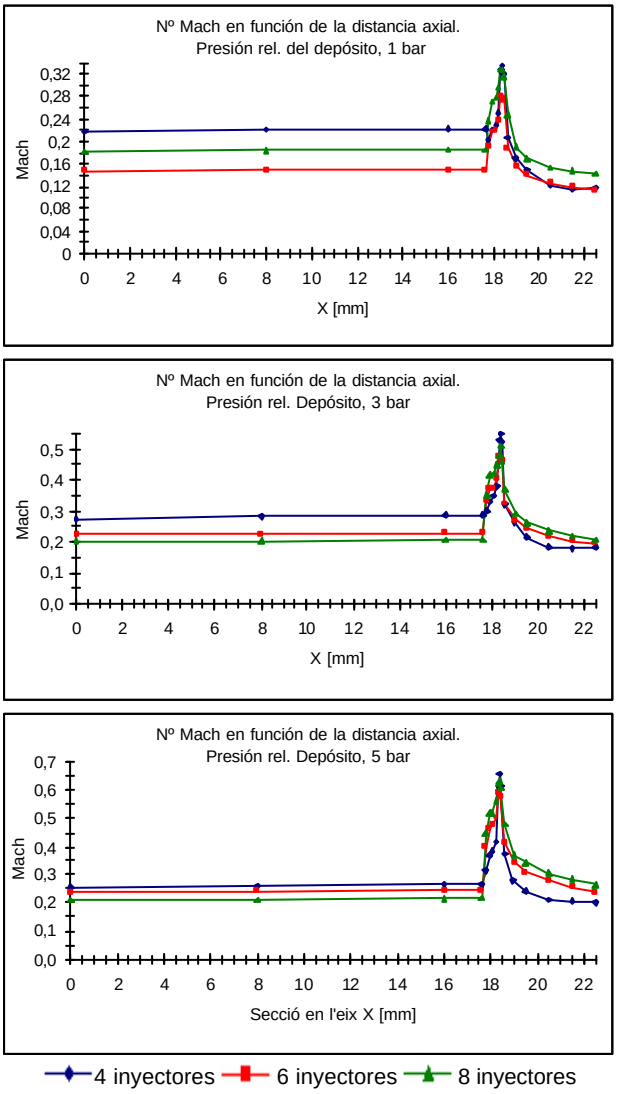


FIGURA 12: Gráficas de Mach a lo largo del eje axial para los modelos de 4, 6 y 8 inyectores a presiones del depósito de 1, 3 y 5 bar relativos.

5. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON ENSAYOS EXPERIMENTALES

Para validar todo el estudio es oportuno contrastar los resultados hallados por ordenador con los hallados en el banco de ensayo. El Laboratorio de Sistemas y Procesos del Instituto Textil de Terrassa dispone de una tobera a escala 1/1 de una tobera de Torsión fugaz con 4 inyectores. Mediante ensayos por anemometría Láser se analizaron las velocidades de giro en la sección media de la cámara de hilatura y en la de salida de este modelo, siendo imposible ensayar otras secciones, ya que las pequeñas dimensiones de la tobera no permite introducir los haces del Láser correctamente, provocando lecturas erróneas.

Los ensayos del modelo se realizaron para las mismas condiciones de trabajo planteadas en este estudio (1, 3 y 5 bar relativos en el depósito).

Como ejemplo, en la figura 11 se comparan algunos resultados analizados por ordenador con los del banco de ensayo para el modelo de 4 inyectores.

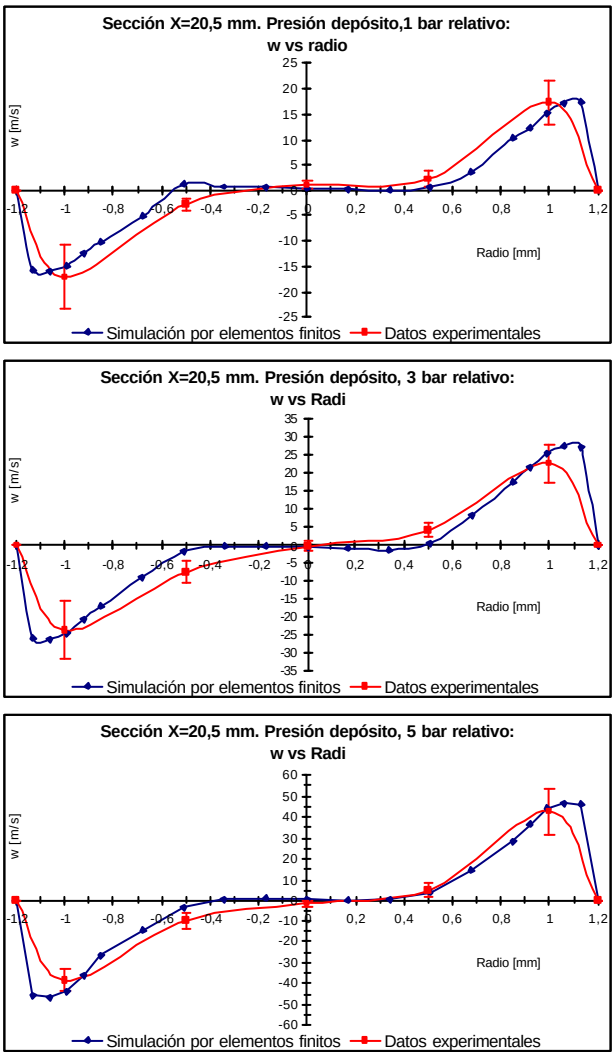


FIGURA 13: Comparación de la distribución de velocidad de giro, en la cámara de hilatura (sección X=20,5 mm),

halladas mediante simulación y mediante anemometría Laser. Modelo 4 inyectores, condiciones de trabajo 1, 3 i 5 bar relativos en el depósito.

Obsérvese la coincidencia en los resultados. Ello permite anunciar que los valores hallados por elementos finitos describen con bastante exactitud el comportamiento neumático de la tobera. Se concluye que los datos proporcionados por la simulación pueden considerarse correctos y cercanos al comportamiento real del flujo.

6. CONCLUSIONES

6.1. Se observa que la utilización del modelo de turbulencia κ-ε aporta un resultado sobre el comportamiento del flujo muy próximo a la realidad. Véase figura 13 en donde se comparan datos experimentales con los aportados vía modelización.

6.2. La simulación, por otro lado, nos permite estudiar el comportamiento de la tobera para diferentes casos prácticos, al comparar por ejemplo, las distribuciones tangenciales de velocidad así como las distribuciones de presión en la sección donde se encuentra el vórtice, para diferente número de inyectores (caso de 6 y 8 inyectores), se observa que tanto la presión mínima en el centro del vórtice como la velocidad tangencial en función del radio y su decaimiento a lo lago de la cámara de hilatura son muy similares, por otro lado la utilización de una tobera con cuatro inyectores da lugar a un decaimiento mayor de velocidad tangencial a lo largo de la cámara de hilatura y a una menor presión en el centro del vórtice. Ver figura 7.

6.3. Respecto a la presión de alimentación se observa que a mayor presión aumenta la velocidad tangencial. Figura 9, caso 8 inyectores.

6.4. De estos dos apartados se puede concluir que el funcionamiento optimo se obtiene mediante la utilización de 6 inyectores y 6 bar de presión relativos.

6.5. Se podría pensar que al aumentar la presión por encima de la indicada se seguirían obteniendo mejores resultados, y aunque es cierto que existe una cierta mejora en el comportamiento del fluido, (aumenta la velocidad tangencial), esta mejora no es relevante como para afrontar un mayor dispendio energético.

6.6. Tanto al visualizar los vectores velocidad, como cuando se realiza el cálculo del número de giro, se observa una zona justamente detrás del punto de inyección en donde existe recirculación de flujo. En concreto, el número de giro aporta información sobre la evolución a lo largo de la cámara de hilatura, de la componente tangencial de la velocidad, decisiva para conseguir la torsión apropiada de las fibras. Véase la similaridad en el decaimiento del giro a lo largo de la cámara de hilatura para el caso de 6 y 8 inyectores. Figura 11.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. V. Bailach; J.A. Tornero; J.M. Bergadà; Ll. Coll; E. Valencia; E. Garcia. Simulación numérica mediante el método de elementos finitos del flujo de aire en toberas de Hilatura. Anales de Ingeniería Mecánica Vol 2 pp 14-22. Diciembre 1998. ISSN 0212-5072
2. J.A. Tornero; I. Simó; J.Mª Bergadà; E. Valencia; Ll. Coll. Flow Characteristics in a jet Spinning Nozzle. 8th International symposium on flow visualization. Sorrento Italy 1-3 Septiembre de 1998. Artículo Nº 231. ISBN 0-953399109.
3. V. Bailach; J.A. Tornero; J.Mª Bergadà; Ll. Coll; E. Valencia. Estudio teórico experimental del comportamiento del fluido en una tobera Murata de hilatura. IV congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Santiago Chile. Vol. 3 Artículo 72, 23-26 Noviembre de 1999. ISBN 956-7069-44-1.

Trabajo aceptado en: 2000.02.10.
Presentado en: 2000.05.25.