

Estudio numérico de la pérdida de presión y eficiencia de captura en separadores de gotas en torres de refrigeración

Manuel Lucas^{1*}, Pedro J. Martínez¹, Javier Ruiz¹, Antonio S. Kaiser², Mónica Hernández², Ulrich Kling², Blas Zamora², Antonio Viedma²

1 – Dep. Ingeniería de Sistemas Industriales. Univ. Miguel Hernández. Edificio Torreblanca, Av. Del Ferrocarril, s/n., 03202, Elche (Alicante), España.

Tel.: 966 658 561, Fax: 966 658 979. e-mail: mlucas@umh.es.

2 – Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Univ. Politécnica de Cartagena, Campus Muralla del Mar. C/ Dr Fleming, s/n – 30202 Cartagena (Murcia) España.

Tel.: 968 325 984, Fax: 968 325 999.

Resumen

El principio de funcionamiento de torres de refrigeración se basa en el intercambio de energía y masa entre una corriente de agua y una de aire. Estos dispositivos pulverizan agua que se encuentra con una corriente de aire, y que al no estar saturado, hace que se evapore una pequeña parte de ésta y se enfríe el resto. A su vez, la corriente de aire captura pequeñas gotas de agua, que no han sufrido cambio de fase, y salen al exterior del equipo. A esta cantidad de agua emitida se le denomina arrastre. Existen diversos aspectos medioambientales destacables relacionados con el arrastre de torres. Para reducir la cantidad de agua arrastrada se instalan separadores de gotas en la sección de salida. Éstos limitan la cantidad de agua arrastrada mediante impacto inercial y su comportamiento puede cuantificarse fundamentalmente por dos factores: la eficiencia de captura de gotas (ϵ_c) y la pérdida de presión generada (Δp). Si la eficiencia de captura de gotas tiene relación con el impacto ambiental del equipo, la pérdida de presión afecta al comportamiento térmico de la torre, por lo que se justifica la creación de un modelo que optimice la geometría de éstos elementos. En este trabajo se realiza un análisis numérico de la pérdida de presión y eficiencia de captura de diferentes geometrías de separadores de gotas. La simulación numérica se lleva a cabo mediante el código de volúmenes finitos Fluent, prestando atención a la influencia del tipo y densidad de mallas así como el número de gotas y/o diámetros de las mismas. Los resultados obtenidos en las simulaciones han sido validados con datos experimentales de la bibliografía [1],[2],[3]. En los separadores ensayados se observa que cuanto mayor es su eficiencia de captura, mayor es también la pérdida de presión que introducen y viceversa.

Palabras clave: **Torres de refrigeración, arrastre, pérdida de presión, separador de gotas.**

1 Introducción

El principio de funcionamiento de torres de refrigeración y condensadores evaporativos se basa en el intercambio de energía y masa entre una corriente de agua y una de aire. Estos dispositivos pulverizan agua que se encuentra con una corriente de aire, y que al no estar saturado, hace que se evapore una pequeña parte de ésta y se enfríe el resto. A su vez, la corriente de aire captura pequeñas gotas de agua, que no han sufrido cambio de fase, y salen al exterior del equipo. A esta cantidad de agua emitida al exterior se le denomina arrastre.

Existen diversos aspectos medioambientales destacables relacionados con el arrastre de torres de refrigeración. En origen, el interés se asoció a la emisión de partículas radioactivas desde centrales nucleares (Pasquill [1962] y Van der Hoven [1968]). Los trabajos de Aynsley y Carson [1973] y de Pedersen et al. [1987] describen diversos problemas medioambientales como:

pérdida de un bien escaso, como es el agua, sin realizar la función de enfriamiento para la que se ha ubicado en la torre; posibilidad de generar problemas de corrosión en equipos, conductos y elementos estructurales que rodean la torre; formación de hielo en las zonas cercanas a la instalación en períodos invernales; degradación de cultivos del entorno por deposición de sales o efectos sobre la salud humana debido a la exposición a compuestos, bien químicos, bien biológicos del agua arrastrada. En este sentido, la contaminación por legionella tiene un especial protagonismo.

Con objeto de reducir la cantidad de agua arrastrada se instalan en la sección de salida del aire unos deflectores, llamados separadores de gotas. Éstos limitan la cantidad de agua arrastrada mediante impacto inercial. El comportamiento de los separadores de gotas puede cuantificarse por dos factores: la eficiencia de captura y la pérdida de presión generada. La eficiencia de captura se define como la relación entre la cantidad de masa de agua capturada frente al total que llega al separador. Para minimizar los efectos medioambientales del arrastre es interesante que la eficiencia de captura sea elevada. La pérdida de presión a lo largo del separador refleja la resistencia que ofrece este elemento al paso del aire. La presencia de un separador puede reducir el flujo de aire en el interior de la torre, reduciendo asimismo su capacidad térmica. Este efecto puede ser muy perjudicial en el caso de torres de tiro natural puesto que el tiro se provoca por la diferencia de densidad del aire entre la sección de entrada y salida del equipo. En el caso de torres de tiro mecánico, una mayor pérdida de presión motiva un aumento en el consumo de potencia en los motores que accionan los ventiladores si se quiere mantener el mismo gasto másico de aire. Por lo tanto, para un funcionamiento económico de las torres es recomendable disponer de pérdidas de carga reducidas.

El diseño de separadores de gotas ha tenido una atención limitada en la literatura. Chilton [1952] construyó un dispositivo para la determinación de la pérdida de presión y la efectividad de los separadores en el que se podían ensayar diferentes tipos de separadores y rellenos. Las medidas de pérdida de presión se realizaron a tres velocidades para cada separador. Las medidas de arrastre las realizó con un scrubber drenando el agua capturada a un recipiente. Chilton concluye que los separadores de lamas pueden orientarse de forma que reduzcan las emisiones y produzcan poca resistencia al flujo de aire, siendo la elección más práctica y económica. Foster et al. [1974] realizan estudios analíticos y experimentales sobre dos tipos de separadores de gotas: de doble fila de lamas de madera y otro de forma sinusoidal de fibrocemento. Estos mismos dos tipos de separadores son utilizados por Gardner y Lowe [1974] en sus estudios de impacto ambiental en una torre de tiro natural. Chan y Golay [1977] desarrollan un modelo numérico para calcular la eficiencia de captura y la pérdida de presión de diferentes separadores, entre los que se incluyen las tipologías utilizadas por Foster et al. [1974]. Comparan los resultados numéricos con datos experimentales obtenidos con la técnica laser light scattering. La diferencia de presión entre la entrada y salida de los separadores la determinan mediante manómetros electrónicos. Los cálculos y resultados experimentales no terminan de coincidir en las geometrías más complejas debido a la no consideración de turbulencia y recirculaciones. Sin embargo, en las geometrías más simples sí que consiguen buenos resultados. El trabajo de Becker y Burdick [1992] investiga la pérdida de presión entre la entrada de aire y el plenum para dos tipos comerciales de separadores de gotas de geometría tridimensional denominados tipo Z y tipo T. Este estudio también analiza el efecto que tiene el ángulo de descarga del aire. Este trabajo muestra la importancia de diseñar los separadores de forma que se tenga en cuenta la distribución del flujo de aire con objeto de reducir la pérdida en el resto de elementos de la torre. Además, determinan un ángulo de descarga óptimo para reducir las pérdidas de presión desde la entrada del aire hasta la sección de descarga del mismo en la salida del ventilador.

En general, a medida que los cambios en la dirección del flujo aumentan, mayor es la eficiencia de captura pero, a la vez, mayor es la pérdida de presión. Para alcanzar una alta eficiencia de captura con bajas pérdidas de presión, se requiere optimizar el diseño de los separadores en términos de estos dos factores. Ni en la bibliografía ni a nivel industrial se dispone de un

procedimiento de diseño establecido, de forma que los diseños existentes han sido generados a través de procesos de prueba, experiencia e innovaciones.

En este trabajo se realiza el estudio numérico de la pérdida de presión de tres geometrías de separadores de gotas. Las mejoras recientes en los algoritmos de resolución numérica, la implementación de nuevos modelos de turbulencia así como el aumento en la capacidad computacional presentan a la CFD como la herramienta ideal para la optimización del diseño de separadores. Para la construcción del modelo numérico se emplea el código numérico de propósito general FLUENT [2006]. La validación de los resultados numéricos obtenidos se realiza mediante datos experimentales disponibles en la bibliografía.

2 Modelo físico

Los separadores de gotas estudiados en el presente trabajo son el separador con dos filas de lamas inclinadas, denominado "Wooden lath", (descrito en el trabajos de Gardner et al. [1974]) y los separadores sinusoidal y de alta velocidad denominados "Belgian wave" y "HI-V" por los autores (descritos en Chan et al. [1977]). Las dimensiones principales en centímetros así como la disposición de los mismos se muestran en la Figura 1, Figura 2 y Figura 3.

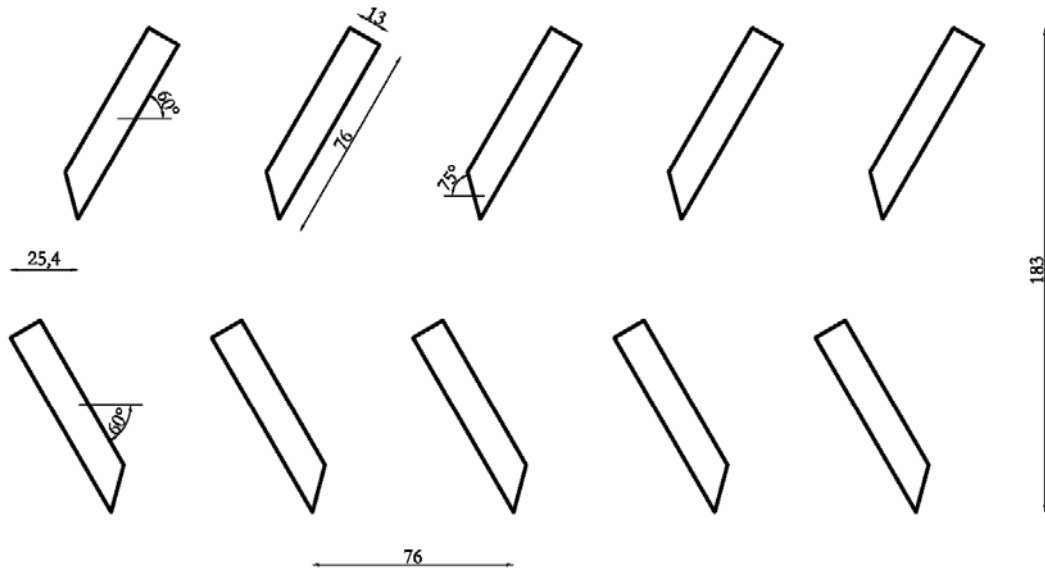


Figura 1: Dimensiones principales del separador de gotas "Wooden-lath".

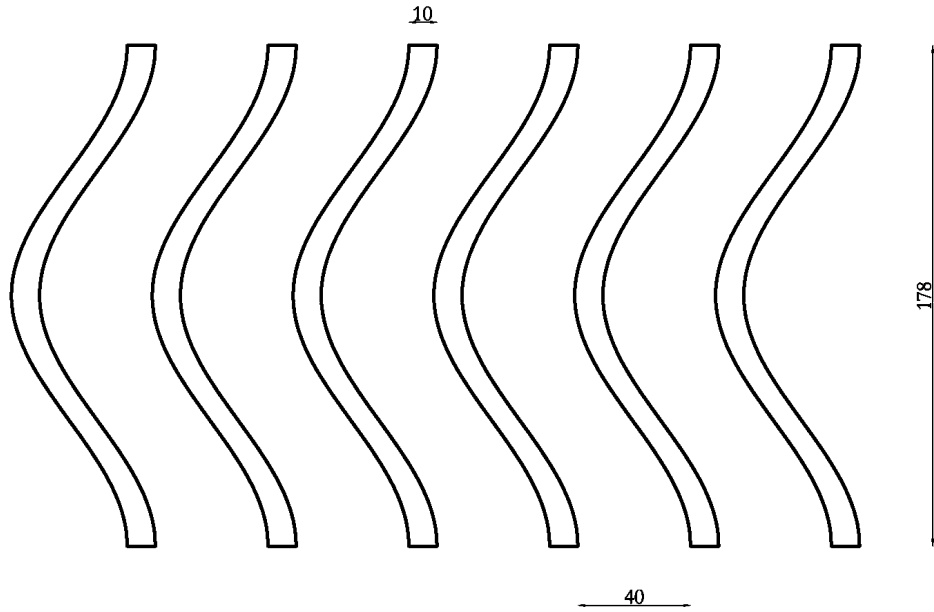


Figura 2: Dimensiones principales del separador de gotas "Belgian wave".

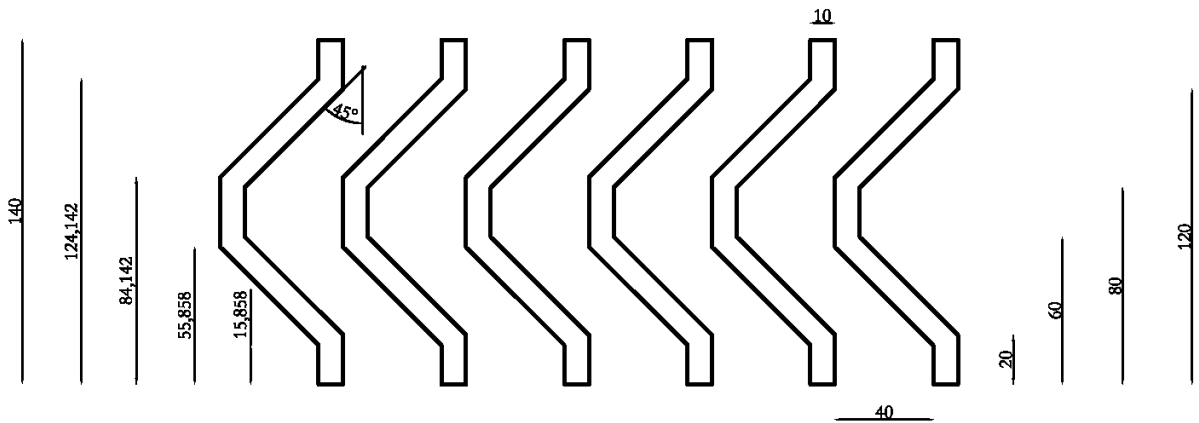


Figura 3: Dimensiones principales del separador de gotas "HI-V".

3 Modelo matemático

Las ecuaciones que gobiernan el problema físico se dividen en, por un lado las ecuaciones que gobiernan la fase continua, y por el otro, las ecuaciones que gobiernan la fase discreta.

En la fase continua se distinguen la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento debido a que se considera un modelo adiabático (no existe transferencia de calor al ambiente). No obstante, el número de Reynolds considerado para la resolución del problema hace que el problema sea turbulento, por lo que las ecuaciones de Navier-Stokes deben ser modificadas para poder resolver el flujo turbulento correctamente. Para ello se emplea el método de Reynolds Averaging Navier-Stokes (RANS), que consiste en introducir términos adicionales en las ecuaciones de Navier-Stokes para caracterizar la turbulencia. En este ámbito el código numérico de propósito general empleado para la simulación implementa una serie de

modelos de turbulencia para resolver gran variedad de tipos de flujos. Concretamente el modelo empleado en la simulación es el modelo de turbulencia k-ε estándar, que incorpora dos nuevas ecuaciones a las ya presentes, una para k (energía turbulenta) y otra para ε (disipación turbulenta). A continuación se muestran las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento modificadas de manera que los correspondientes términos asociados a la turbulencia ya han sido añadidos (1) y (2) respectivamente, así como las ecuaciones para k (4) y para ε (5).

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - (\rho \overline{u'_i u'_j}) \right] \quad (2)$$

donde

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

donde

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad C_\mu = \text{cte} \quad (6)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (7)$$

siendo los escalares $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ϵ constantes con los siguientes valores:

$$C_{1\epsilon} = 1,44 \quad C_{2\epsilon} = 1,92 \quad C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\epsilon = 1,3 \quad (8)$$

Estos valores son los que incorpora FLUENT por defecto y han sido determinados experimentalmente con aire y agua y funcionan bien en las simulaciones en un amplio rango de problemas.

Por otro lado, las ecuaciones para la fase discreta (gotas de agua líquida de diámetro D_p y velocidad V_p) planteadas en un sistema de referencia lagrangiano, son las de balance de fuerzas sobre la partícula, de trayectoria r_p y de conservación de la energía en la partícula,

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} (V - V_p) + g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{\rho}{\rho_p} V_p \frac{\partial V}{\partial r_p} \quad (9)$$

$$\frac{dr_p}{dt} = V_p \quad (10)$$

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_f \quad (11)$$

$$Re = \frac{\rho D_p |V_p - V|}{\mu} \quad (12)$$

siendo $Re_p = (\rho D_p |V_p - V|) / \mu$ el numero de Reynolds de la partícula basado en su velocidad relativa, y

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (13)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (14)$$

donde los coeficientes a_1 , a_2 y a_3 son constantes utilizadas para el caso de partículas esféricas para diferentes rangos de números de Reynolds dadas por Morsi y Alexander [1972], $F_D(V - V_p)$ es la fuerza de resistencia por unidad de masa de la partícula, $g(\rho_p - \rho) / \rho_p$ la fuerza de gravedad por unidad de masa, $(\rho / \rho_p) V_p (\partial V / \partial r_p)$ la fuerza causada por el gradiente de presiones en el fluido, y dm_p / dt el promedio de masa evaporada en la partícula. Por ultimo, h es el coeficiente de transmisión de calor por convección y h_f el calor latente de vaporización del agua.

4 Modelo numérico

Para la resolución del modelo, se considera un modelo bidimensional donde la anchura y la altura de la región de estudio se corresponden con la anchura y la altura de la torre de refrigeración donde se encontraban dispuestos los separadores en el ensayo original. Ésta posee unas medidas de 2210 x 1154 mm (alto x ancho) para el "Wooden lath" y 1200 x 800 para las otras geometrías. Se considera que el aire entra en la región de estudio por la parte inferior de la misma y escapa por la superior. Los puntos de medida para evaluar la pérdida de presión introducida por el separador se encuentran situados de manera simétrica a 35 mm de las caras superior e inferior respectivamente del separador de lamas, y a 25,4 mm aguas arriba y 15,24 mm aguas abajo de las caras superior e inferior respectivamente de los separadores restantes.

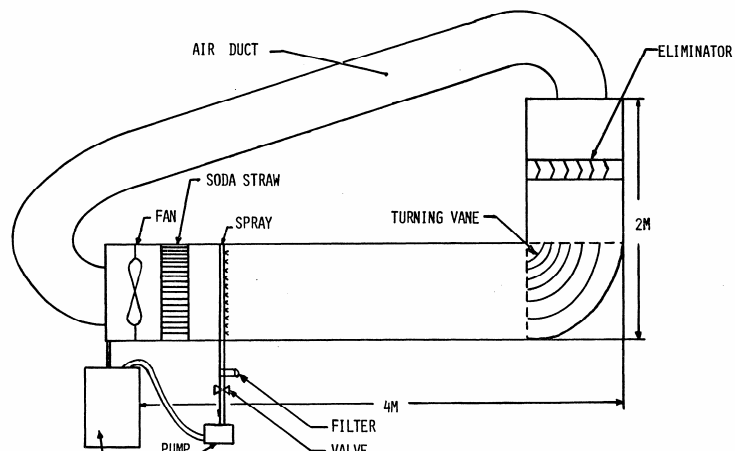


Figura 4: Instalación experimental empleada por Chan et al. [1977].

Las velocidades consideradas en las simulaciones se corresponden a su vez con las ensayadas en los casos experimentales. Esto es, que mientras que para el separador de gotas de lamas se ensayan casos con tres niveles de velocidad (0,91, 1,52 y 2,13 m/s), para el resto de geometrías se emplean dos niveles (1,5 y 2,5 m/s). Por su parte, los diámetros de las gotas encargadas de modelizar el arrastre considerados oscilan en diferentes rangos según el separador y la velocidad de aire considerada. Mientras que para el "Wooden lath" se lanzan diámetros desde 5 hasta 1000 micras para las 3 velocidades (0,91, 1,52 y 2,13 m/s), para el "HI-V" los diámetros inyectados barren un rango de 1 a 1000 μm para 1,5 m/s y 10 a 90 μm para 2,5 m/s. Por último, para el "Belgian wave", los diámetros inyectados barren un rango de 5 a 85 μm para 1,5 m/s y 5 a 90 μm para 2,5 m/s.

Las condiciones de contorno empleadas se resumen en la Figura 5. El flujo de aire en la entrada se supone uniforme a velocidad constante (condición de contorno "Velocity inlet") mientras que en la salida se impone una presión relativa nula ("Pressure outlet"). En las paredes laterales se impone tanto la condición adiabática de las mismas como la de no deslizamiento ("Wall"). Las gotas se modelizan a través de inyecciones de agua líquida en la sección de entrada de diámetro constante y velocidad igual a la de entrada del aire. Para calcular la eficiencia de captura de los separadores se ha escogido la condición de contorno "trap" la cual funciona provocando el cese en el cálculo de la trayectoria de una gota una vez que ésta entra en contacto con una pared.

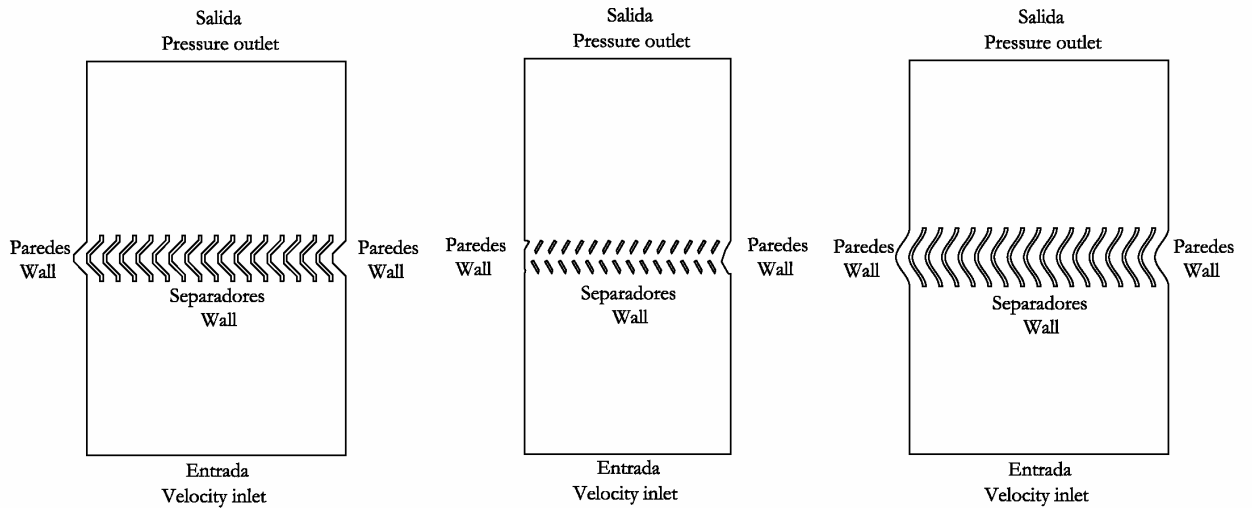


Figura 5: Condiciones de contorno de los casos estudiados. No a escala.

Para obtener los resultados, se ha empleado en la simulación una malla obtenida como resultado de la aplicación de un método de generación de mallas que consiste en identificar aquella malla que con el menor costo computacional garantiza la independencia de los resultados con la misma además de garantizar un valor apropiado de la distancia adimensionalizada a la pared (y^+). El procedimiento aplicado a tal efecto consiste en crear cinco mallas diferentes con un crecimiento progresivo del número de elementos entre una malla y la inmediatamente posterior. La malla seleccionada será aquella que garantice un valor apropiado de la distancia adimensionalizada a la pared (y^+) con el menor costo computacional. Si por exigencias computacionales de la malla no se alcanza el valor de y^+ requerido por el tratamiento de pared empleado, se procederá adaptando en la misma las celdas adyacentes a la pared. El resultado de este estudio deja una malla resultado de 471400 para el separador de lamas, 725260 para el sinusoidal y 874511 celdas para el separador de alta velocidad. Cabe mencionar que las mallas empleadas en la geometría "Belgian wave" y "HI-V" son el resultado de un proceso de adaptación. La diferencia más significativa entre ambas es, que mientras que para el "HI-V" la misma malla garantiza valores de y^+ en las celdas adyacentes a la pared satisfactorios para las dos velocidades simuladas, para el "Belgian wave" es necesaria la confección de dos mallas diferentes en función de la velocidad ensayada. El número de celdas al que hace referencia el texto es a la malla empleada en la simulación del nivel más bajo de velocidad en esta geometría (1,5 m/s).

En la Figura 6 se puede observar el mallado empleado en la simulación para los tres separadores de gotas, así como detalles de mallado en los separadores de gotas (celdas adaptadas).

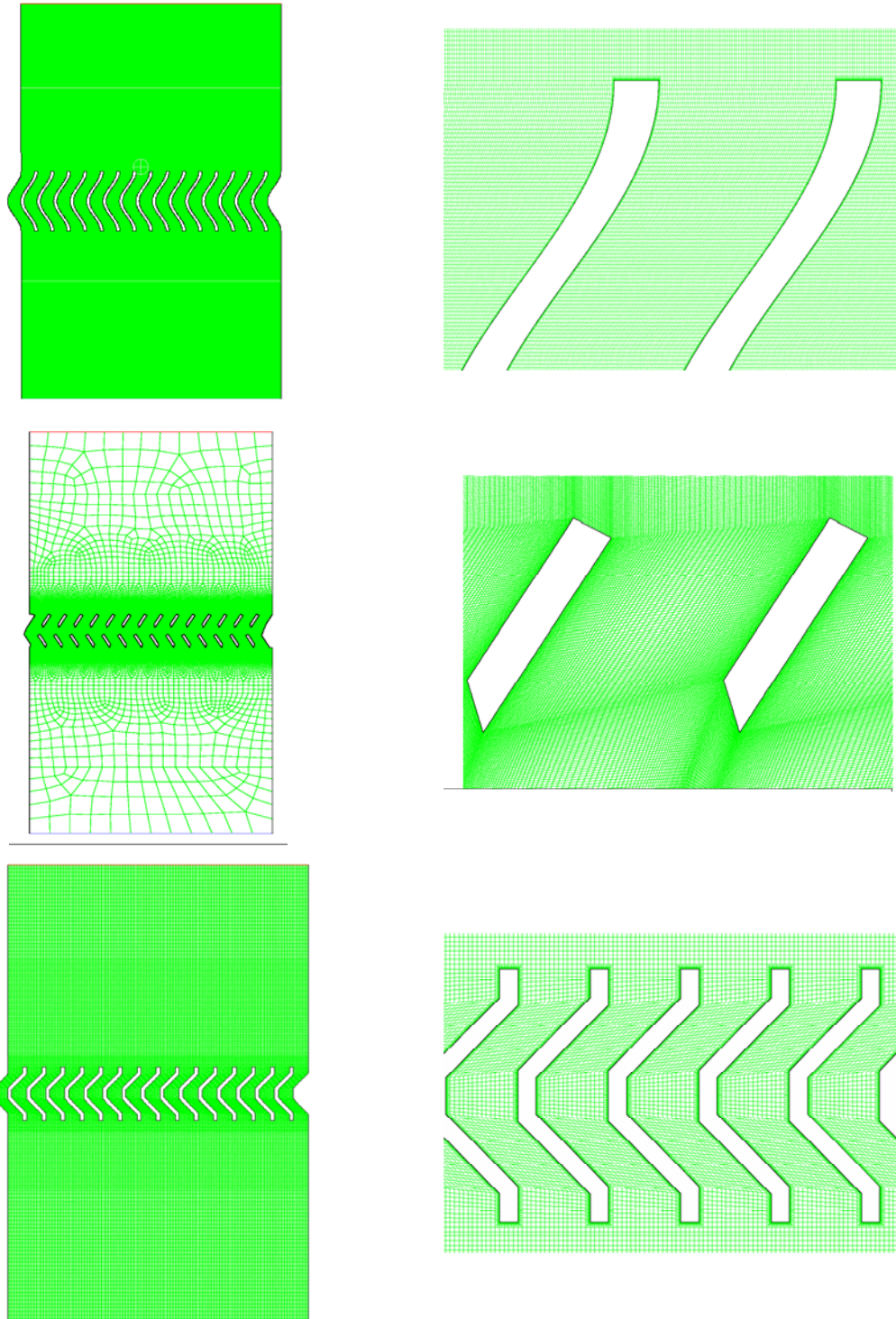


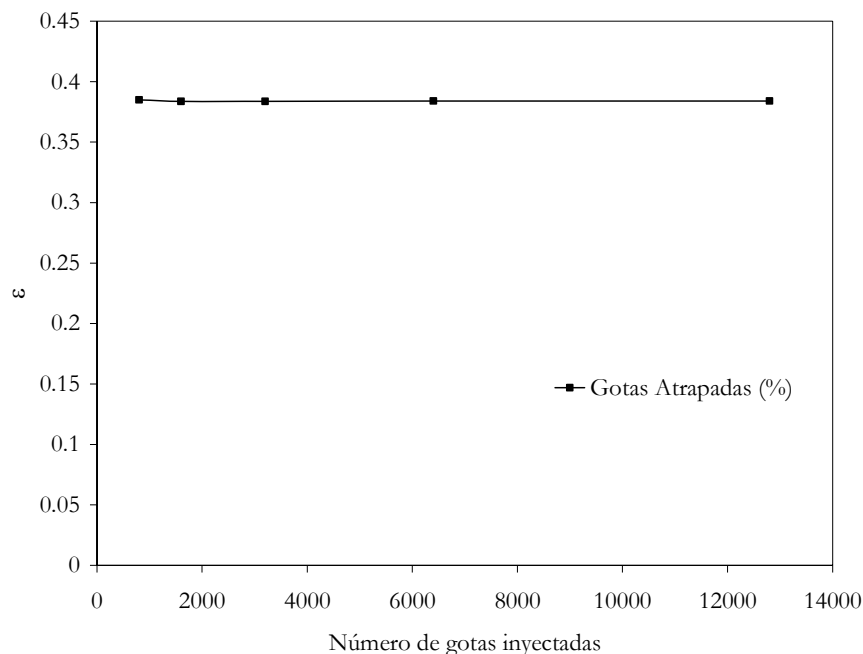
Figura 6: Detalles del mallado en diferentes geometrías. En orden descendente "Belgian wave", "Wooden lath" y "HI-V".

El sistema de ecuaciones mostrado en el apartado anterior ha sido resuelto con el código de propósito general FLUENT, basado en el cálculo de volúmenes finitos. El modelo de turbulencia empleado ha sido el $k-\epsilon$ estándar con tratamiento de pared "enhanced wall treatment" (el cual garantiza buenos resultados para valores de la distancia adimensionalizada a la pared cercanos

a la unidad $y^+ \approx 1$). Para el acoplamiento entre las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento con la presión se ha empleado el algoritmo "SIMPLE". Además, todos los cálculos han sido realizados empleando discretizaciones de segundo orden. El criterio de convergencia establecido es el siguiente $|\phi^{(i+1)} - \phi^{(i)}| / \phi^{(i)} < 10^{-4}$, donde i denota el número de iteración y ϕ puede representar cualquiera de las variables dependientes.

Adicionalmente a los estudios de mallado y de y^+ , otro estudio más ha sido desarrollado. Éste consiste en hallar el número óptimo de gotas inyectadas desde la sección de entrada de modo que no influyan en el resultado final y se minimice el costo computacional asociado al cálculo de las trayectorias de las mismas. Para ello debe modificarse el valor del parámetro numérico n , el cual cuantifica el número de gotas de agua líquida (encargadas de simular el arrastre) inyectadas desde la sección de entrada de la región de estudio. Para cada separador se ha realizado el estudio contemplando diferentes valores de inicio y fin de n , basándose en la experiencia de problemas anteriores. Así pues, mientras que para el "HI-V" se han ensayado valores de n comprendidos en el rango [50 - 12800], para el "Belgian wave" han estado entre [800 - 12800] y por último, para el "Wooden lath" el intervalo empleado ha sido [400 - 12800]. Se considera garantizada la independencia de resultados en el momento que la eficiencia porcentual de captura del separador ε no se modifica con un aumento de n . Numéricamente esto se consigue con $n = 1600$ para el "HI-V" y $n = 800$ para las geometrías restantes. Cabe destacar que este estudio se ha realizado para un diámetro de gota concreto (50 micras) y una velocidad concreta para cada caso (1,5 m/s para "Belgian wave" y "HI-V" y 1,52 m/s para "Wooden lath" (en éste último se ha escogido esta velocidad para mantener el mismo orden magnitud que en las demás geometrías)). Los resultados se pueden ver a continuación en la Figura 7:

$$\varepsilon = \frac{\text{gotas atrapadas}}{\text{gotas inyectadas}} \quad (15)$$



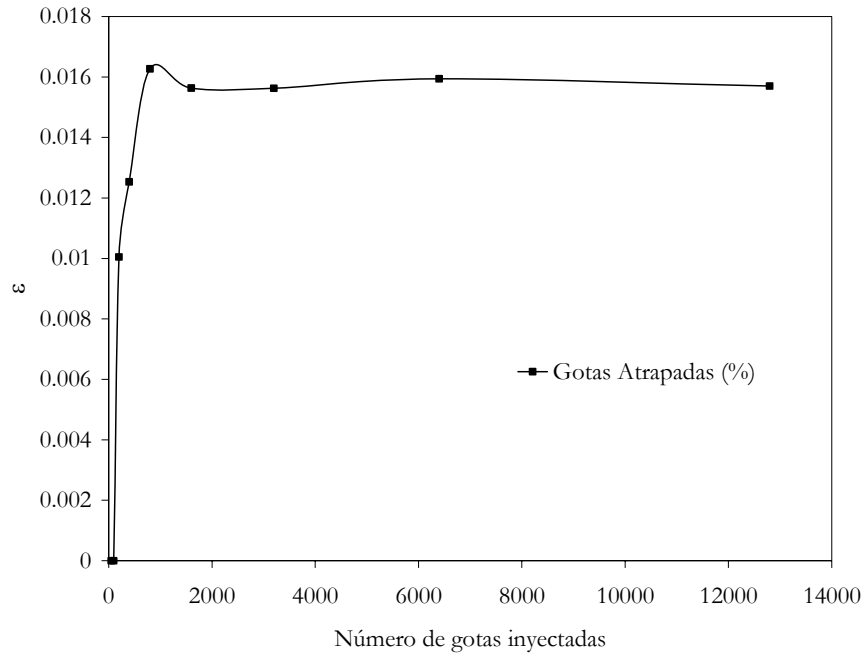


Figura 7: Variación de la eficiencia porcentual de captura en las geometrías estudiadas para diversos valores del parámetro n . De arriba abajo separador "Belgian wave" y "HI-V".

5 Resultados

De entre los resultados más importantes obtenidos en la simulación numérica, cabe destacar los campos de velocidades y presiones, las trayectorias de las gotas de agua en fase líquida inyectadas y la comparativa entre resultados numéricos y experimentales tanto de pérdida de presión como de eficiencia de captura. Las siguientes figuras muestran los campos de velocidades y presiones obtenidos con el código numérico así como las trayectorias de las gotas inyectadas para cada uno de los tres tipos de separadores simulados con sus correspondientes niveles de velocidad.

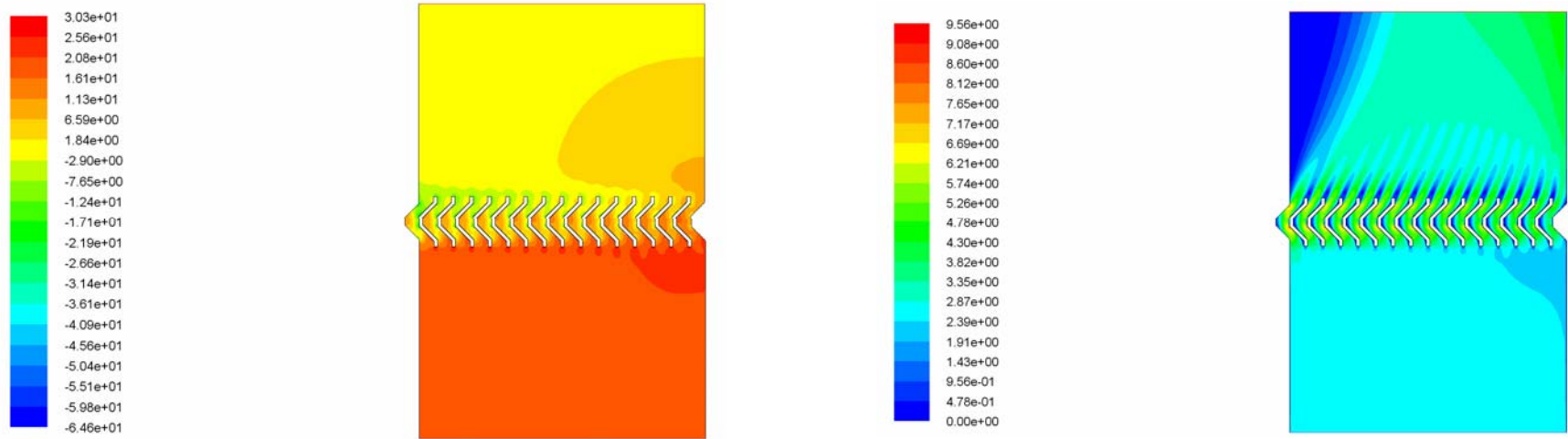


Figura 8: Campos de presión (izquierda) y velocidades (derecha) para el separador de gotas "HI-V" con velocidad de entrada de 2,5 m/s.

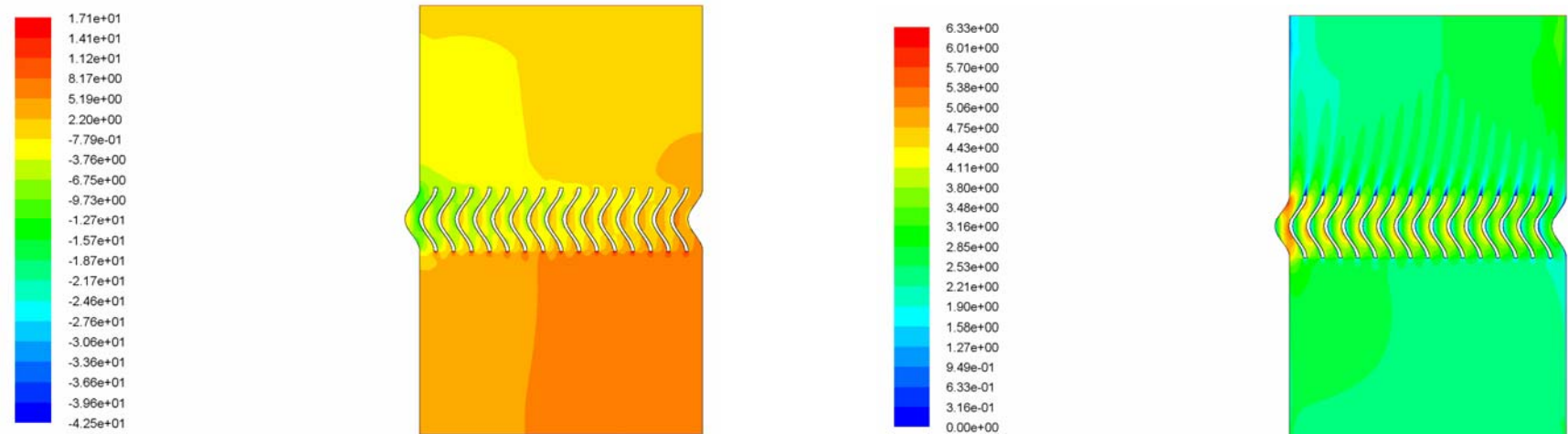


Figura 9: Campos de presión (izquierda) y velocidades (derecha) para el separador de gotas "Belgian wave" con velocidad de entrada de 2,5 m/s.

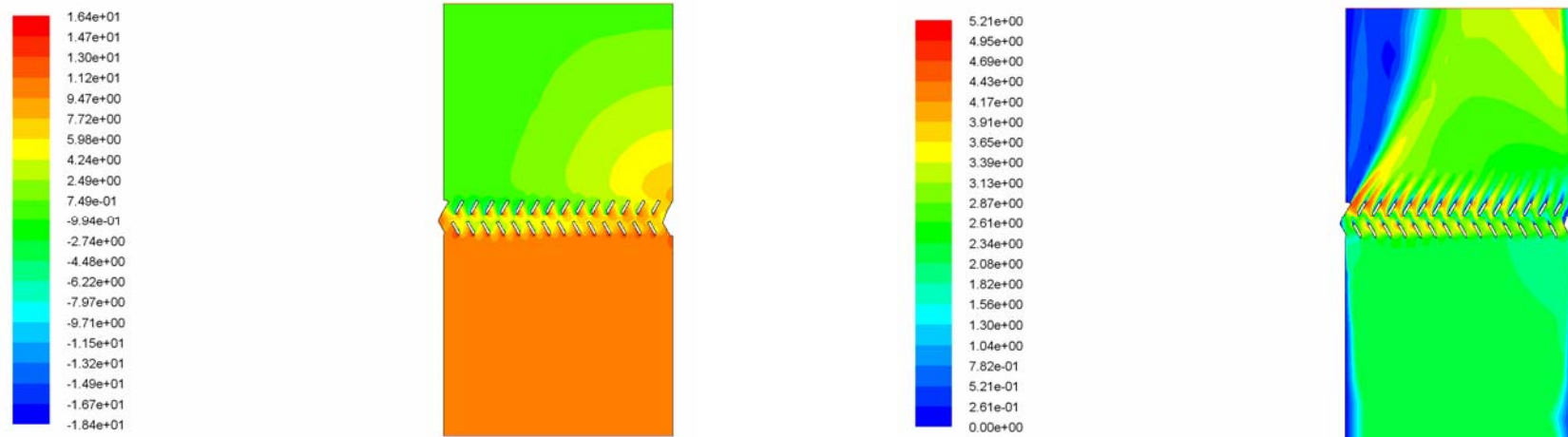


Figura 10: Campos de presión (izquierda) y velocidades (derecha) para el separador de gotas "Wooden lath" con velocidad de entrada de 2,13 m/s.

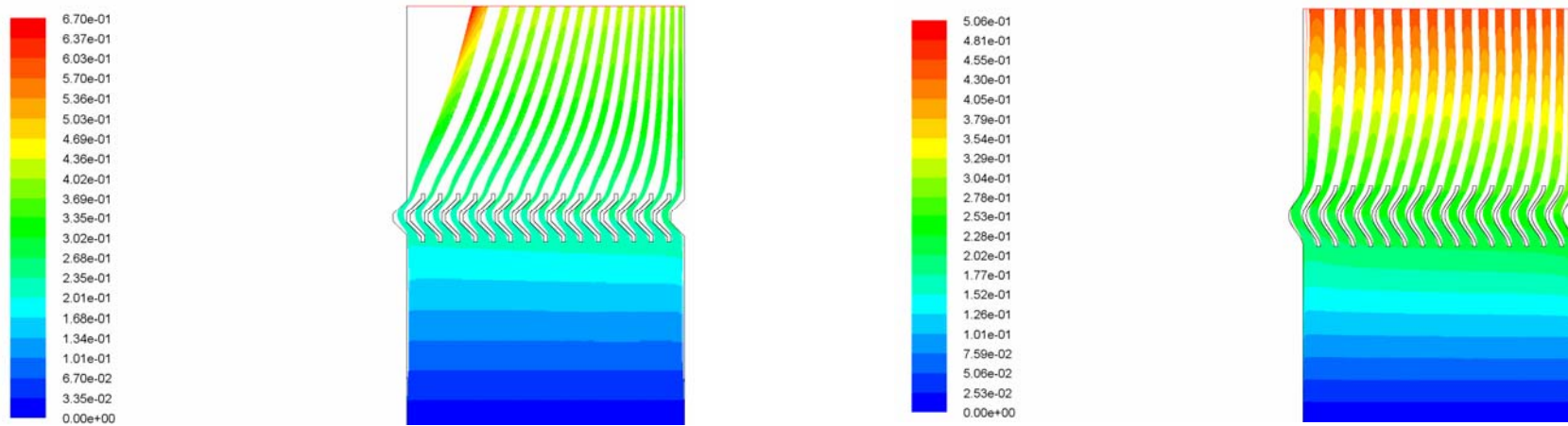


Figura 11: Trayectorias gotas coloreadas por tiempo de residencia. Izquierda; "HI-V", 2,5 m/s y 20 mm de diámetro. Derecha; "Belgian wave", 2,5 m/s y 25 mm de diámetro.

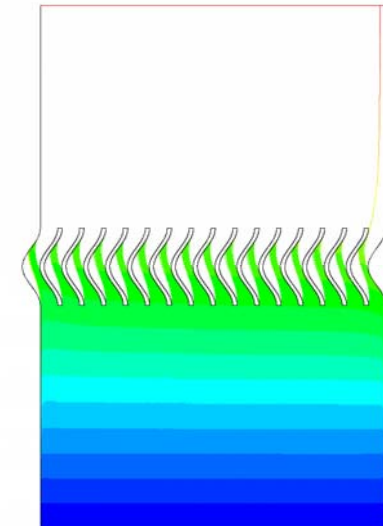
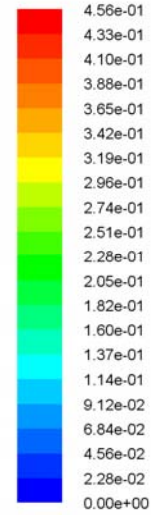
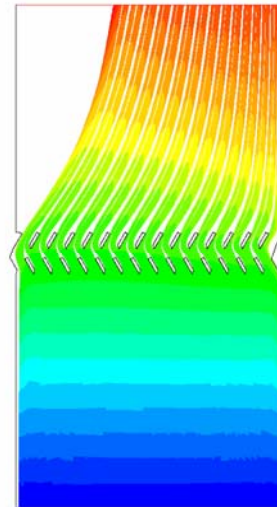
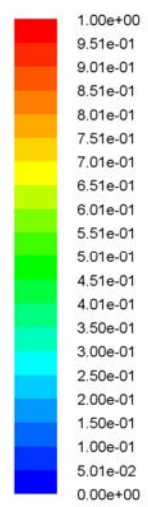


Figura 12: Trayectorias gotas coloreadas por tiempo de residencia. Izquierda; "Wooden lath", 2,13 m/s y 20 μ m de diámetro. Derecha; "Belgian wave", 2,5 m/s y 90 μ m de diámetro.

La comparativa de resultados de pérdida de presión introducida por un separador concreto se muestra a través del parámetro adimensional K_p (pérdida de presión adimensionalizada) en función del número de Reynolds para cada una de las geometrías estudiadas. Los resultados obtenidos se comparan con los obtenidos tanto experimentalmente como numéricamente en la bibliografía en las siguientes figuras.

$$K_p = \frac{|\Delta P|}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (16)$$

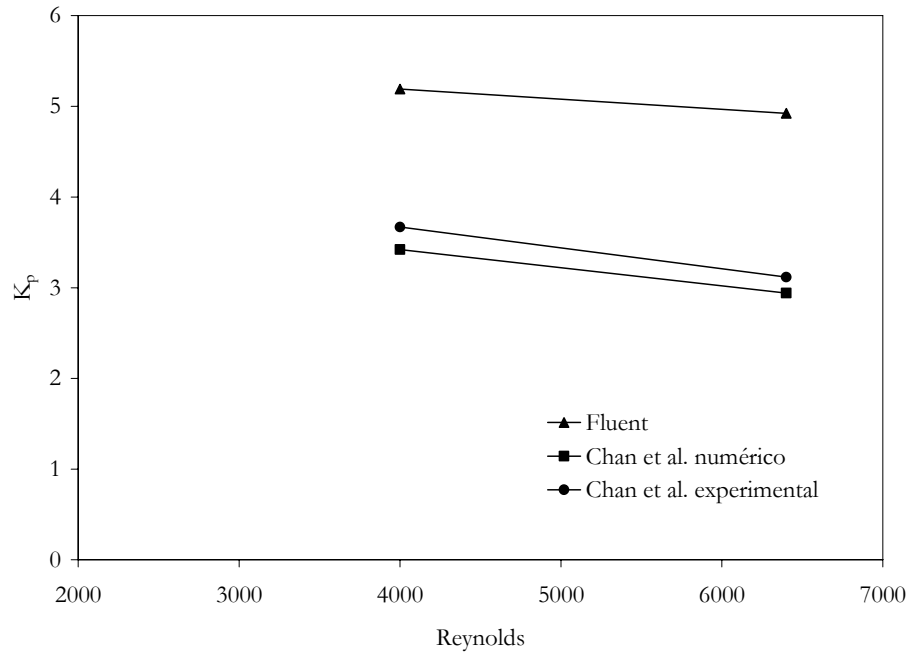


Figura 13: Pérdida de presión introducida por la geometría "HI-V".

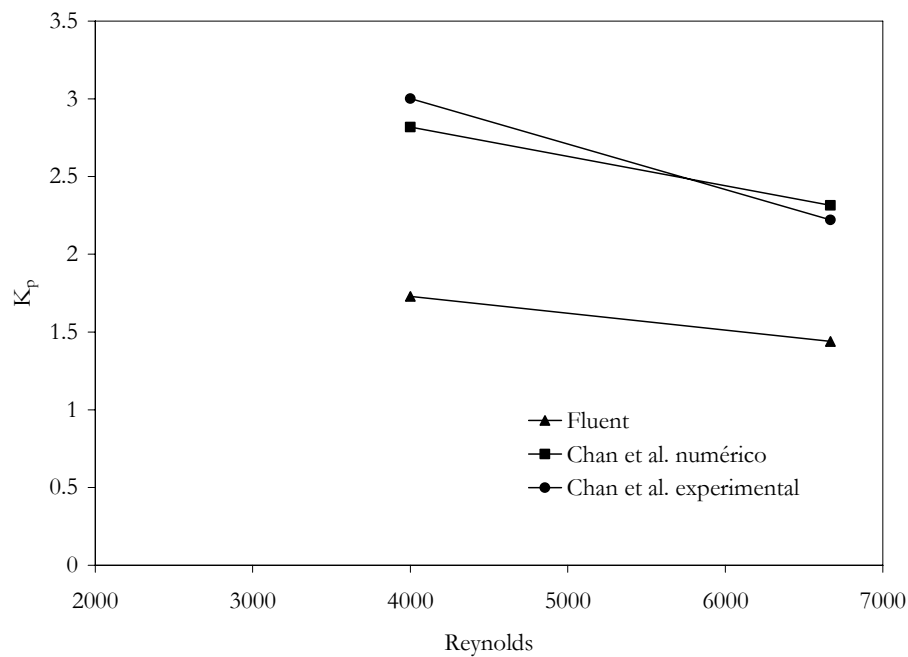


Figura 14: Pérdida de presión introducida por la geometría "Belgian wave".

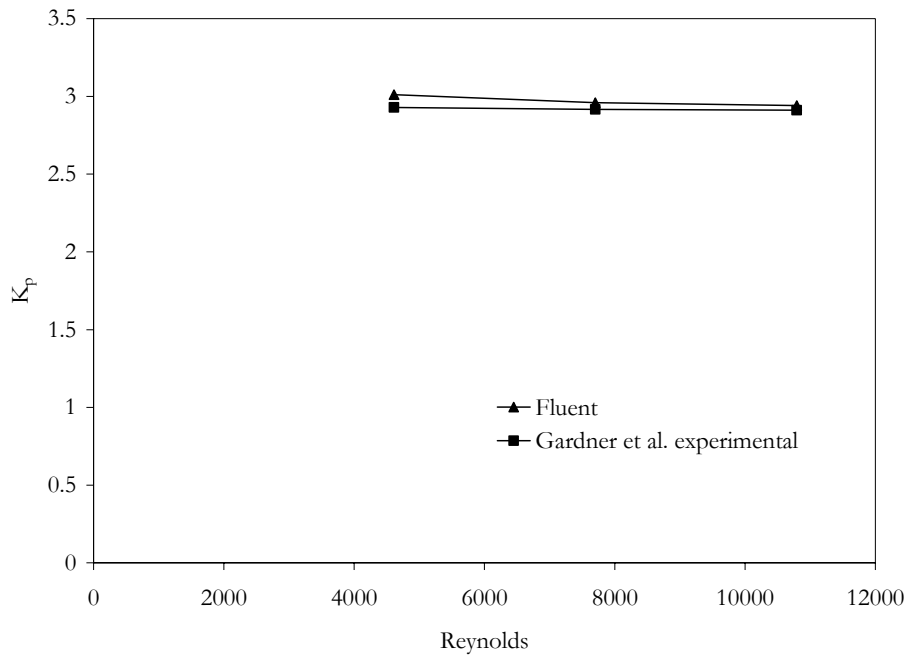


Figura 15: Pérdida de presión introducida por la geometría "Wooden lath".

En el separador de lamas los resultados de las simulaciones prácticamente coinciden con los valores de los experimentales. El error entre medidas es de 2,68 %, 1,44 % 1,04 % para Reynolds de 4611, 7701 y 10792 respectivamente. Por el contrario, en los separadores sinusoidal y de alta velocidad las diferencias son más elevadas, llegando a errores de 42,40 % y 35,20 % para Reynolds de 4000 y 6667 en el "Belgian wave" y 29,31 % y 36,69 % para Reynolds de 4000 y 6400 en el "HI-V". La elevada desviación en los resultados puede atribuirse fundamentalmente a la incertidumbre existente sobre la posición real en la que se han tomado las medidas experimentales (posición en eje x) e incertidumbre de la misma (las pérdidas de presión experimentales son tan pequeñas que la incertidumbre de la instrumentación puede jugar un papel importante en el resultado final), así como a parámetros requeridos en la simulación numérica no documentados en la literatura de referencia, como por ejemplo la intensidad de turbulencia real con la que entra el aire o la temperatura del mismo.

Por último, se puede observar la comparativa entre la eficiencia de captura ϵ numérica y experimental para los separadores "Belgian wave" y "HI-V", así como la eficiencia predicha por el código numérico para el "Wooden lath". Todas las gráficas se representan en función del parámetro adimensional denominado P' , empleado por Maclaine et al [2003], el cual engloba las características principales que gobiernan el problema (diámetro de gota y velocidad fundamentalmente).

$$P' = \frac{\rho_w D^2 v}{\mu_a L} \quad (17)$$

donde v y D son la velocidad y diámetro de la gota respectivamente, ρ_w la densidad del agua, μ_a la viscosidad dinámica del aire y L una longitud característica del separador (en este problema se ha considerado la altura del mismo).

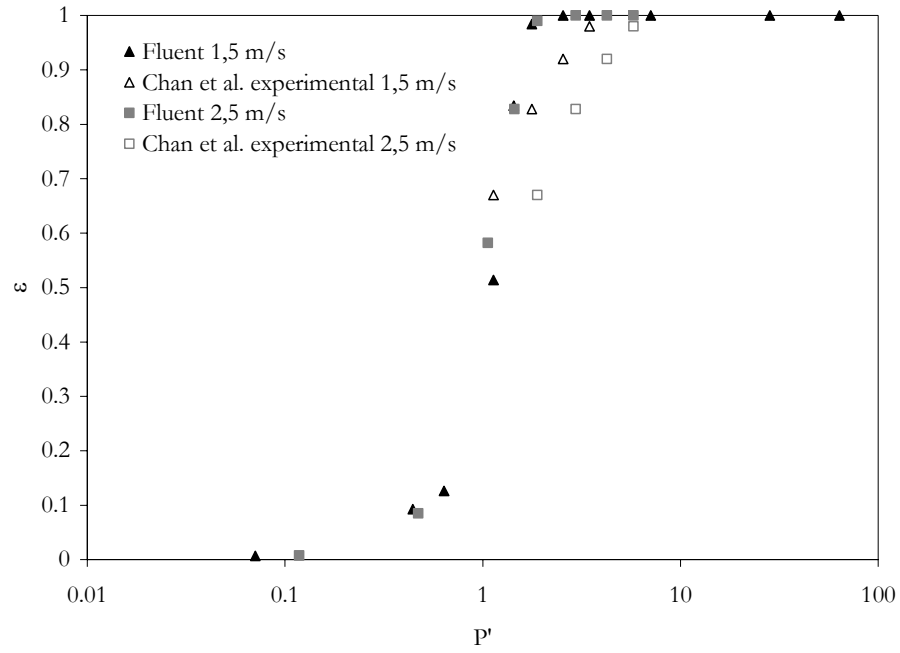


Figura 16: Eficiencias de captura experimentales y numéricas del separador "HI-V" para los dos niveles de velocidad ensayados.

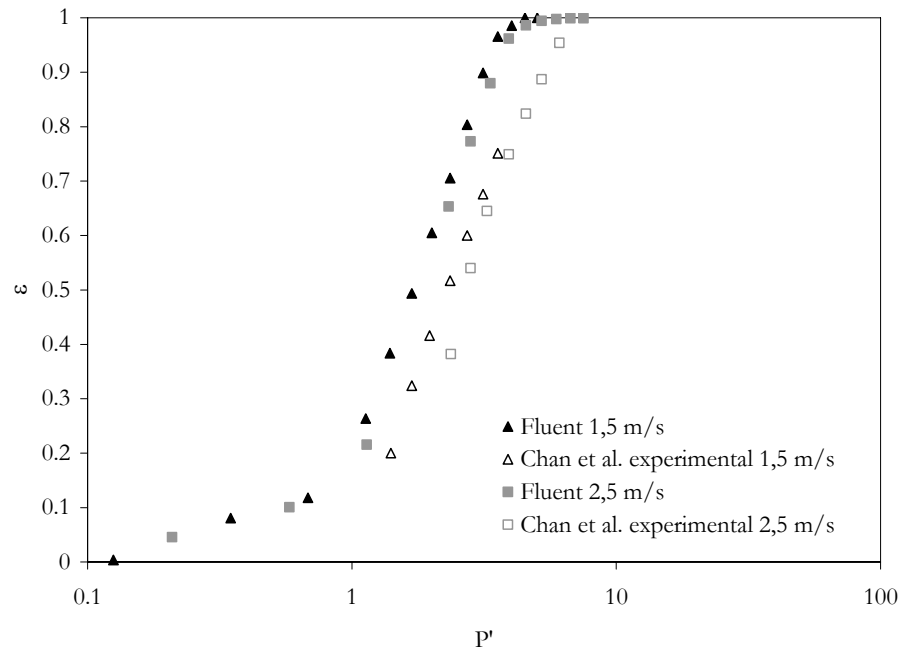


Figura 17: Eficiencias de captura experimentales y numéricas del separador "Belgian wave" para los dos niveles de velocidad ensayados.

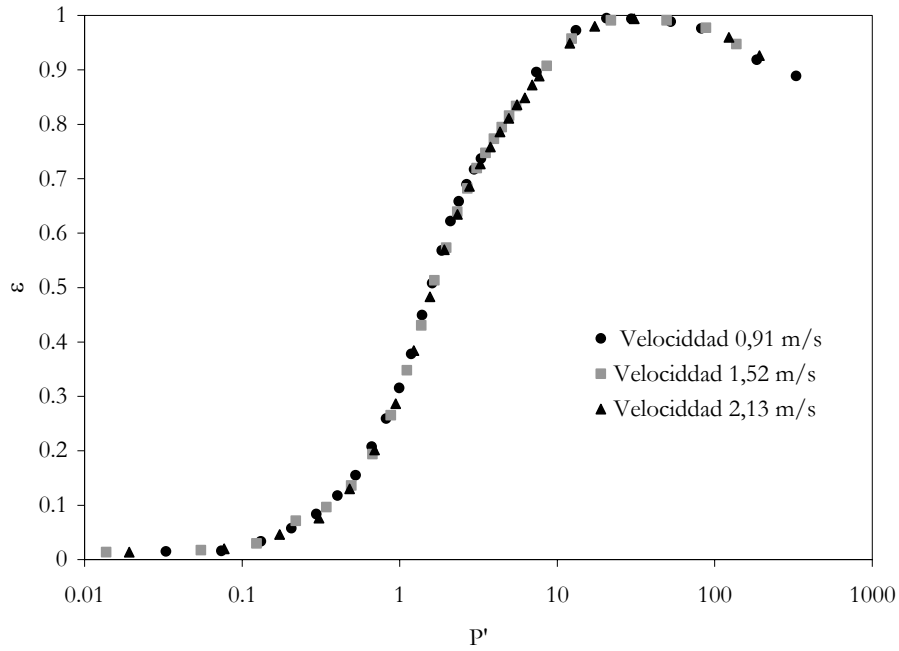


Figura 18: Eficiencias de captura numéricas del separador "Wooden lath" para los tres niveles de velocidad ensayados.

Se puede observar que para los dos primeros separadores la comparativa entre resultados numéricos y experimentales puede considerarse satisfactoria ya que las curvas de eficiencia se aproximan a las descritas en la bibliografía científica. Por el contrario, en el separador de lamas ocurre que al superar un determinado diámetro de gota la eficiencia de captura decrece. Esto se debe fundamentalmente a la existencia de un canal de paso directo entre dos lamas consecutivas del separador que permite que, cuando las gotas tengan el tamaño suficiente como para no ver afectada su trayectoria por el flujo de aire, escapen al exterior sin posibilidad de ser atrapadas por el separador. De ahí que la eficiencia máxima sea inferior al 100% y que el porcentaje de reducción se encuentre relacionado con la proporción de área no cubierta por separadores entre la proporción total.

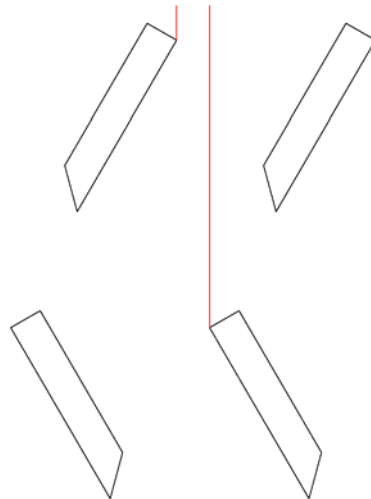


Figura 19: Canal de paso directo en separador "HI-V".

Por último, destacar que no se puede establecer una relación entre los dos parámetros más importantes en lo que a diseño de separadores de gotas respecta (pérdida de presión introducida y eficiencia de captura) ya que, aunque en líneas generales exista una relación inversamente

proporcional (esto es a más pérdida de presión menos eficiencia de captura y viceversa), no se cumple para todas las simulaciones realizadas. Por ejemplo, puede observarse como el separador de lamas, que es el que más pérdida de presión introduce, es también el que más eficiencia de captura presenta. Sin embargo, si se comparan los separadores sinusoidal y de alta velocidad en el intervalo P' [1-10] puede comprobarse que el sinusoidal tiene una mayor eficiencia de captura a la vez que el coeficiente K_p es menor.

Habría por tanto, que establecer un criterio de selección que contemplara ambos fenómenos en conjunto. Por ejemplo un criterio válido podría ser seleccionar aquel separador que, para un nivel de agua arrastrada que cumpliera con la legislación vigente introdujese la menor pérdida de presión posible.

6 Conclusiones

Las principales conclusiones derivadas del análisis de resultados se resumen a continuación:

- Se ha creado y ensayado un modelo numérico de separador de gotas en el ámbito de análisis de problemas de flujo interno en torres de refrigeración de tiro mecánico para evaluar la pérdida de presión y la eficiencia de captura del mismo y se ha demostrado que la simulación numérica en combinación con estudios experimentales disponibles en la bibliografía científica han demostrado ser una herramienta de análisis eficiente en este tipo de trabajos.
- Para independizar la influencia de parámetros numéricos con los resultados finales obtenidos, se han realizado diversos estudios adicionales de mallado y independencia de gotas.
- No se ha hallado ninguna relación directa entre los dos parámetros característicos en el diseño de separadores (eficiencia de captura y pérdida de presión) por lo que habría que establecer un criterio de diseño que contemple ambos fenómenos.

Las principales líneas de trabajo futuras consideradas de interés tras el trabajo realizado descrito en este documento se listan a continuación:

- Análisis de la eficiencia de captura considerando diferentes modelos de comportamiento de gotas en presencia de paredes como "wall film" en FLUENT o similares.
- Generación de correlaciones que modelicen el comportamiento de los separadores en función tanto de parámetros de operación como geométricos.
- Diseño de separadores de gotas propios mediante la combinación de simulaciones numéricas con ensayos experimentales propios.

Referencias

- [1] Pasquill, F., 1962. Section 6.2 Deposition of Airborne Materials, Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources, D. Van Nostrand Company, Ltd., London, pp. 226-239.
- [2] Van der Hoven, I., 1968. Deposition of Particles and Gases, Meteorology and Atomic Energy 1968 (editor D. Slade), US. Atomic Energy Commission, pp. 202-207.
- [3] Aynsley, E. y Carson, J.E., 1973. Atmospheric effects of water cooling facilities. Cooling Tower Institute. (Technical Paper TP-107B)
- [4] Pedersen, G.C., Lamkin, V.K. y Seich, M., 1987. An economical solution to cooling tower drift. Cooling Tower Institute. (Technical Paper- T-87-08).
- [5] Chilton, H., 1952. Elimination of carryover from packed towers with special reference to natural draught water cooling. Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol. 30, pp 235-250.
- [6] Foster P. M., Williams M. I. y Winter R. J., 1974 Droplet behavior and collection by counterflow cooling-tower eliminators. Atmospheric environment, Vol. 8 (4), pp 349-360.
- [7] Gardner B.R y Lowe H.J. The research and development background to the environmental problems of natural draught cooling towers. Atmospheric environment, Vol. 8-4, pp 313-320.
- [8] Chan J and Golay MW.; 1977, Comparative evaluation of cooling tower drift eliminator performance. Energy Laboratory Report MIT-El 77-004.
- [9] Becker, B. R. and Burdick L., 1992. Effect of drift eliminator design on cooling tower performance. Transactions of the ASME. Vol. 114, pp632-642.
- [10] Fluent INC, Fluent 6.3 Users Guide, 2006. <http://www.fluent.com>.
- [11] Morsi S.A. and Alexander A.J., 1972. An investigation of particle trajectories in two phase flow systems, J. Fluid Mech., Vol. 55 (2), pp. 193-208.
- [12] Maclaine, I. L., Sriveerakul, T. and Behnia, M., 2003. Performance Prediction for Cooling Tower Eliminators. 17th Annual Conference of Mechanical Engineering Network, 15-17 October 2003, Prajinburi, Thailand.