

3. Técnica flow focusing

La técnica flow focusing aparece como tal en 1998 [1]. El objetivo de ésta no sólo es la generación de micropartículas, se centra también en que dicha generación sea monodispersa, esto quiere decir que los tamaños de gota generados tengan un grado de dispersión pequeño, de forma que pueda considerarse con mucha aproximación que las partículas generadas tienen el mismo diámetro que sus precedentes y consecuentes. Es esta última circunstancia, la monodispersión, la que dota a esta técnica de especial interés para distintos campos de la industria, como por ejemplo los que se comentaron en la introducción.

En lo que sigue, se presentará el principio que rige el funcionamiento flow focusing pasando brevemente por su teoría, se expondrán las expresiones a partir de las cuales es posible la determinación de los diámetros de partículas. Se presentará también los parámetros de diseño de los nebulizadores. Seguidamente se mostrarán los distintos tipos de nebulizadores-flow focusing, simples y múltiples, planos y tridimensionales, construidos comentando sus ventajas e inconvenientes.

3.1. Principio de funcionamiento flow focusing.

La explicación de funcionamiento flow focusing que se hace a continuación se centra en la generación de partículas simples en un único nebulizador tridimensional. Posteriormente se generalizará para partículas complejas, dispositivos múltiples y flow focusing plano.

El funcionamiento flow focusing requiere dos fluidos inmiscibles, a los que llamaremos fluido enfocado y fluido enfocante, o simplemente, enfocado y enfocante. La figura siguiente, Fig.1, muestra gráficamente la generación de las partículas.

En dicha figura puede verse un cilindro, a través del cual entra el enfocado. A la salida del cilindro, el diámetro del chorro del enfocado es reducido de D_o a d_j debido a la presencia del enfocante. Dicho enfocante entra a la cámara de remanso, y fluye, estrangulando al enfocado, y posteriormente saliendo junto a él por el orificio de la placa de salida. Finalmente, y siempre que se cumplan unos requisitos que posteriormente serán comentados, el fluido enfocado rompe en gotas debido al efecto de las perturbaciones y a su tensión superficial [1].

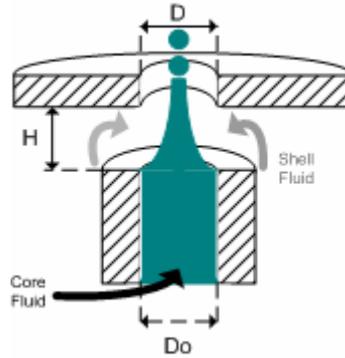


Fig.1. Sección de un nebulizador simple flow focusing. Se observan las dimensiones características y los dos fluidos, en blanco el enfocante y en verde el enfocado

A parte de Do , en la figura se observan dos parámetros importantes en flow focusing. Estos parámetros son la longitud H y el diámetro de placa de salida D . La relación que deben tener estas dimensiones es que el valor de H debe estar siempre entre un cuarto y el doble de D [2], matemáticamente se tiene que

$$\frac{1}{4} \leq \frac{H}{D} \leq 2 \quad (1)$$

En el comportamiento flow focusing es importante definir un número adimensional según el cual se puede determinar si la generación de gotas se está produciendo en régimen flow focusing. Dicho número es el número de Weber:

$$We = \frac{\rho_l \cdot v_l^2 \cdot d_j}{\sigma_d} \quad (2)$$

donde σ es la tensión superficial del enfocado, v_l es la velocidad del enfocante, ρ_d es la densidad del enfocado y d_j es el diámetro del chorro. Dicho número relaciona la energía cinética del fluido con la debida a la tensión superficial del enfocado. Si se cumple que:

$$8 < We < 40 \quad [1] \quad (3)$$

se puede aceptar que el régimen de funcionamiento es flow focusing. Esta relación viene a decir que la tensión superficial tiene que ser lo suficientemente dominante como para que el chorro no rompa violentamente, y lo suficientemente poco dominante como para que dicho chorro se pueda formar. Siempre que el número de Weber se encuentre entre tales límites, la forma de la perturbación que sufre el chorro es axilsimétrica, como puede apreciarse en la figura siguiente, Fig.2. Dicha perturbación, junto con el efecto de la tensión superficial, como se dijo anteriormente, son las responsables de la ruptura monodispersa del chorro.

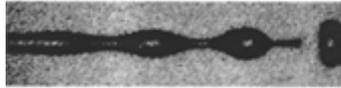


Fig.2. Imagen de la perturbación axilsimétrica en un chorro.

Para mostrar la monodispersión ofrecida por esta técnica basta observar la siguiente gráfica, Fig.3, en la que se representa la densidad de distribución de gotas frente al diámetro de las mismas. Los parámetros más importantes de esta gráfica con el d_{50} , o diámetro medio de las gotas, y el GSD , es decir, la desviación estándar geométrica, gracias a la cual se puede determinar como de monodispersa es la generación de partículas.

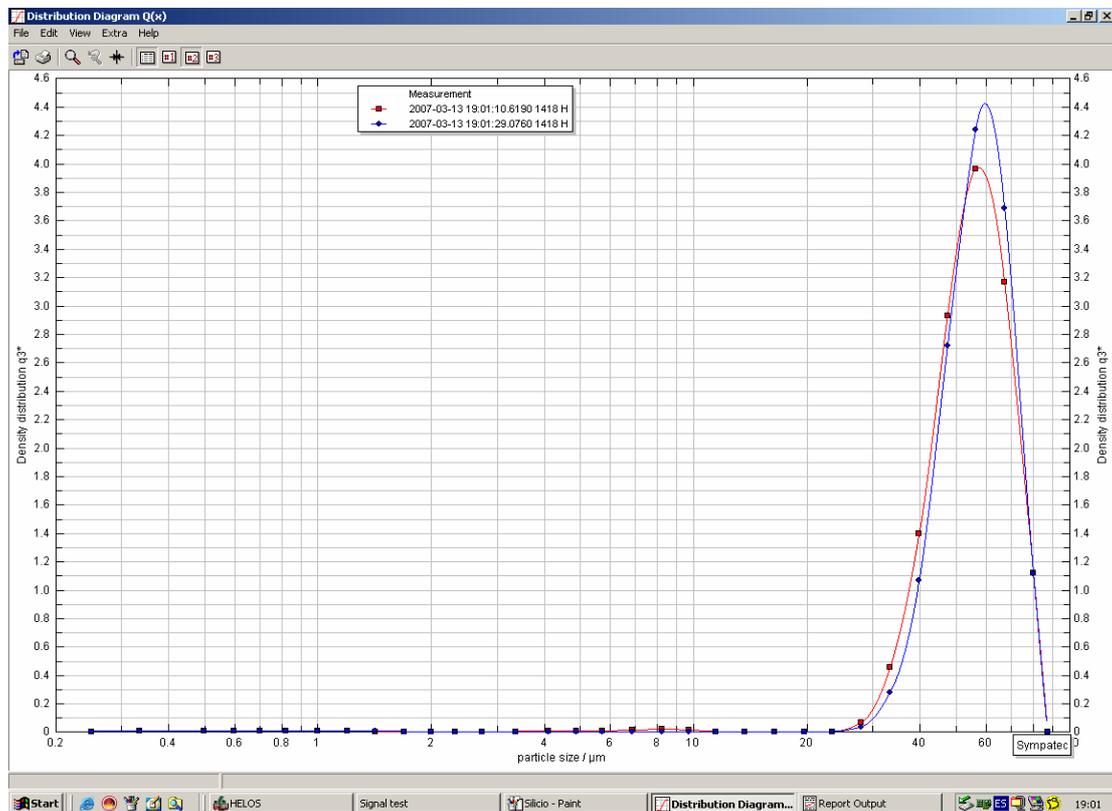


Fig.3. Representación densidad de distribución frente al tamaño de gota.

En este caso, se observan en la gráfica las curvas correspondientes a dos chorros, para la curva azul se tiene un diámetro medio de gota de unas 60 micras, y para la roja de poco más de 55 micras. Puede observarse como la campana está muy centrada en torno a ese valor medio, demostrando de esta forma la monodispersión, con valores de GDS en torno a 1.1 - 1.2.

3.2 Tipos de partículas y diámetros

Como se ha comentado anteriormente, existen distintos tipos de partículas. Dependiendo de los tipos de fluidos con los que se trabaje, se tendrá un tipo de partícula u otro. Se diferencia entre flow focusing tridimensional y flow focusing plano.

3.2.1. Flow focusing tridimensional.

a) Gotas

En el caso de tener como fluido enfocado, un líquido, y como enfocante un gas, las partículas generadas serán gotas de enfocado dentro del seno del fluido enfocante, por ejemplo, en el caso de tomar como enfocado agua, y como enfocante aire, se obtendrían gotas de agua en aire. Se puede demostrar [1] que la expresión que determina el tamaño de la gota es la siguiente:

$$d_g = 1.89 \cdot \sqrt{Q_d} \cdot \sqrt[4]{\frac{8 \cdot \rho_d}{\pi^2 \cdot \Delta P_g}} \quad (4)$$

donde d_g es el diámetro de la gota, ρ_t y Q_d la densidad de enfocante y caudal de enfocado respectivamente y ΔP_g , es la diferencia de presiones que sufre el fluido enfocante. Puede verse en esta fórmula, un hecho importante que caracteriza a la técnica flow focusing, este hecho consiste en la independencia del tamaño de la gota con la geometría del dispositivo si el control se realiza con el caudal de enfocado y con la diferencia de presiones del enfocante. Tampoco aparecen ni la tensión superficial, ni la viscosidad puesto que el aporte de estos parámetros al diámetro de la gota puede ser considerado despreciable frente al aporte de la diferencia de presiones. En esta fórmula se observan dos partes diferenciadas, por un lado, el número 1.89, conocido como número de Raileigh, y el resto de la fórmula se puede demostrar que es el diámetro del chorro antes de romper. Por tanto, puede verse que el diámetro de la gota viene a ser aproximadamente el doble del diámetro del chorro:

$$d_g = 1.89 \cdot d_j \quad (5)$$

b) Emulsiones

Si los fluidos enfocante y enfocado son ambos líquidos, inmiscibles entre sí, se obtienen emulsiones de enfocado dentro del seno del fluido enfocante. Por ejemplo, la generación de emulsiones de aceite dentro de agua. En este caso el control del tamaño de la emulsión se realiza mediante los caudales de ambos líquidos, la expresión es la siguiente [3]:

$$d_g = 1.89 \cdot \frac{D}{\sqrt{1 + \frac{Q_s}{Q_d} \cdot \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_d}}}} \quad (6)$$

donde ρ_d y ρ_s , son las densidades de enfocado y enfocante respectivamente, y Q_d y Q_s son sus caudales, y D es el diámetro de la placa de salida. Puede verse como en este caso el diámetro de la gota depende de la geometría, puesto que depende de D . Esto es así debido a que el control se hace en caudales. Sin embargo, es sencillo pasar de esta fórmula a la anterior teniendo en cuenta la expresión que relaciona el incremento de presiones del enfocante con la energía cinética, y sabiendo que el caudal es el producto de la velocidad por el área de paso. Por tanto, para gotas y emulsiones se tiene la misma fórmula lo que cambia es el tipo de control del caudal de enfocado.

c) Burbujas

El caso contrario al primero, es decir, el enfocado es un gas y el enfocante es un líquido. En este caso se producen burbujas de gas dentro de un seno líquido. La expresión del diámetro de la burbuja se puede demostrar [4-5] que viene determinado por la fórmula:

$$d_b = 1.1 \cdot D \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_d} \right)^{0.4} \quad (7)$$

donde d_b es el diámetro de la burbuja, D es el diámetro de la placa de salida, y Q_s y Q_d son los caudales de enfocante y enfocando respectivamente. En este caso, por el mismo motivo que en el caso anterior, aparece la geometría en la fórmula. Finalmente, a modo de resumen se muestra una tabla que recoge los datos anteriores de las partículas simples.

Tipo de partícula	Tipo de enfocado	Tipo de enfocante	Diámetro de la partícula
Gota/Emulsión	Líquido	Gas/Líquido	$d_g = \sqrt{Q_d} \cdot \sqrt[4]{\frac{8 \cdot \rho_d}{\pi^2 \cdot \Delta P_g}} *$ $d_g = \frac{D}{\sqrt{1 + \frac{Q_s}{Q_d} \cdot \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_d}}}} **$
Burbuja	Gas	Líquido	$d_b = 1.1 \cdot D \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_d} \right)^{0.4}$

* Control de enfocante en presión.

** Control de enfocante en caudal.

d) Partículas complejas

Para presentar la generación de partículas complejas nos centraremos en el caso de tres fluidos, al igual que antes, inmiscibles entre sí. El principio por el que se forman este tipo de partículas puede verse en la figura siguiente, Fig.4:

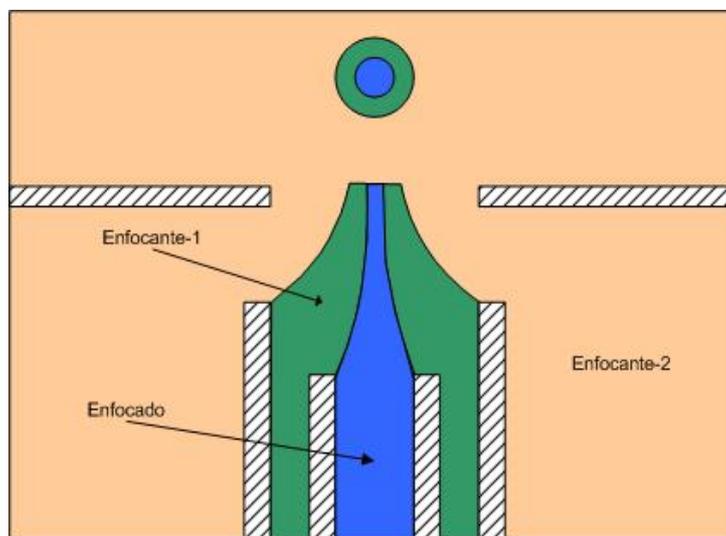


Fig.4. Sección de un nebulizador de partículas complejas. Pueden verse los tres fluidos. En azul el fluido enfocado, en verde el enfocante-1 y en marrón el enfocante-2.

En la figura se observa la sección del dispositivo, en la que el color azul representa el fluido enfocado, en verde el enfocante-1, y en marrón el enfocante-2. El enfocado es

estrangulado por el enfocante-1, y su vez este conjunto es enfocado por el enfocante-2. Dicho enfocado-2 será el seno en que se formen y acumulen las partículas complejas.

Como vemos, las partículas complejas tienen, en este caso, dos partes diferenciadas. Un núcleo formado por el fluido enfocado, y una cáscara que recubre el núcleo, que forma la cápsula por el primer fluido enfocante-1.

El uso común de partículas simples se reduce a la realización de microencapsulaciones. En dicho caso, las ecuaciones que rigen el diámetro del núcleo, d_n , y el diámetro de la cápsula, d_c , son:

$$d_n = \frac{1.89 \cdot D}{\sqrt{\left(1 + \frac{Q_3}{Q_2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}}\right) \cdot \left(1 + \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}\right) - \frac{Q_3}{Q_2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}}}} \quad (8)$$

$$d_c = \frac{1.89 \cdot D}{\sqrt{\left(1 + \frac{Q_3}{Q_2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}}\right) - \frac{Q_3}{Q_2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}} \cdot \left(1 + \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}\right)^{-1}}} \quad (9)$$

donde Q_1 es el caudal de enfocado, Q_2 es el de enfocante-1 y Q_3 es el de enfocante-2; ρ_1 es la densidad de enfocado, ρ_2 la de enfocante-1 y ρ_3 la enfocante-2. Y D es el diámetro de la placa de salida.

En el desarrollo se considera como primera aproximación que el efecto de la tensión superficial es despreciable frente a la energía cinética.

Por tanto, el espesor e de la cápsula formada por el enfocante-1 se determina como:

$$e = \frac{1}{2} \cdot (d_c - d_n) \quad (10)$$

3.2.2. Flow focusing plano

En el caso de flow focusing plano, el dispositivo tiene la siguiente forma. Las paredes de este dispositivo son paralelas y de sección rectangular.

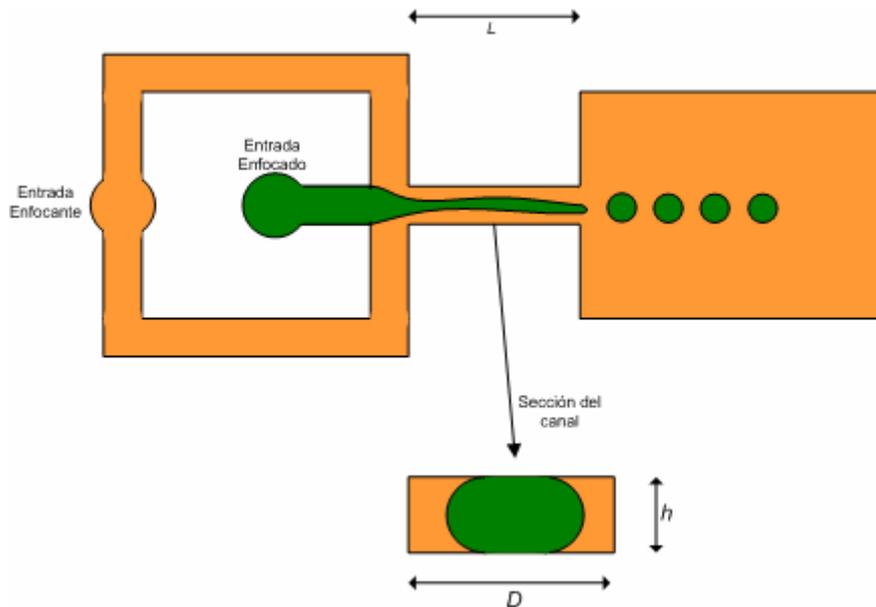


Fig.5. Configuración de un nebulizador flow focusing plano de partículas simples.

a) Gotas y emulsiones

Para este caso, se puede demostrar que la fórmula del diámetro del chorro w [6] es, suponiendo densidades de fluidos iguales:

$$w = \frac{D}{1 + \frac{Q_s}{Q_d}} \quad (11)$$

Donde D es el ancho del canal, Q_s es el caudal de enfocante y Q_d el de enfocado.

Y para el diámetro de las gotas, para las condiciones de [7] se obtiene esta otra expresión:

$$l = 2.35 \cdot a \cdot \left(\frac{Q_d}{Q_t} \right)^{0.25} \quad (12)$$

Donde l es el diámetro de la gota, a la anchura de canal, Q_d el caudal de enfocado y Q_t el de enfocante.

b) Burbujas

En este caso la expresión que determina el volumen de la burbuja V_b tiene la siguiente forma [8].

$$V_b = \frac{P}{q \cdot \mu \cdot \frac{L}{h^4}} \quad (13)$$

Donde P es a diferencia de presiones de enfocado y μ la viscosidad de enfocante, q el caudal de enfocante, h la altura de canal y L su longitud.

A continuación se presenta una tabla resumen de las expresiones presentadas:

Gota/Emulsión	Líquido	Gas/Líquido	$l = 2.35 \cdot a \cdot \left(\frac{Q_d}{Q_i} \right)^{0.25} *$
Burbuja	Gas	Líquido	$V_b = \frac{P}{q \cdot \mu \cdot \frac{L}{h^4}}$

* Caso [7].

Para el caso a) la expresión del diámetro del chorro viene sujeta a la suposición de sección cuadrada de chorro. Pero el chorro en flow focusing plano no siempre será cuadrado [9-10]. Para el caso de sección circular se tiene la expresión cuyo desarrollo se presenta.

- Dedución del diámetro del chorro

En el siguiente desarrollo se supone sección de canal rectangular de altura h y ancho D y sección del chorro circular.

Sabiendo que la diferencia de presiones entre la entrada y la salida para el líquido enfocado es:

$$P_d - P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot v_d^2 \quad (14)$$

Donde v_d es la velocidad de enfocado y ρ_d su densidad. P_d es la presión a la entrada del enfocado y P_a la presión a la salida.

Y que la velocidad es el cociente entre el caudal y el área de paso:

$$v_d^2 = \left(\frac{4 \cdot Q_d}{\pi \cdot d^2} \right)^2 \quad (15)$$

Donde d es el diámetro de chorro.

Sustituyendo se obtiene:

$$P_d - P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot \left(\frac{4 \cdot Q_d}{\pi \cdot d^2} \right)^2 \quad (16)$$

Haciendo el mismo análisis para el fluido enfocante se tiene:

$$P_t - P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_t \cdot v_t^2 \quad (17)$$

Donde v_t es la velocidad de enfocante y ρ_t su densidad. P_t es la presión a la entrada del enfocante y P_a la presión a la salida.

Y teniendo en cuenta que la sección de paso del fluido enfocante es:

$$A = D \cdot h - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (18)$$

Donde D es la anchura de canal y h su altura.

Y sabiendo que la velocidad es el cociente entre el caudal y el área de paso, sustituyendo se obtiene la siguiente expresión:

$$P_t - P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_t \cdot \left(\frac{Q_t}{D \cdot h - \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \right)^2 \quad (19)$$

Por otro lado sabemos que:

$$P_t - P_d = \frac{2 \cdot \sigma_d}{d} \quad (20)$$

Donde σ_d es la tensión superficial de enfocado.

Suponiendo en primera aproximación que la tensión superficial es despreciable se deduce que:

$$P_t = P_d \quad (21)$$

Igualando (16) y (19) y despejando el diámetro del chorro, se obtiene la expresión final.

$$d = \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{D \cdot h}}{\sqrt{1 + \frac{Q_t}{Q_d} \cdot \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_d}}}} \quad (22)$$