

Capítulo 5

Elección de las partículas de sembrado

5.1. Introducción

La técnica Láser Doppler se basa en la indispensable presencia de partículas en el fluido, como medio para estimar su velocidad. Recordemos que estos sistemas realmente no miden la velocidad de las moléculas que forman el fluido, que sería lo más riguroso, sino la velocidad de las partículas que transportan en su seno. Estas pueden ser, en algunos casos muy particulares. Generalmente en casi todas las aplicaciones, el sembrado será introducido y generado de una forma artificial, para asegurarse de que cumpla ciertos requisitos indispensables para que la velocidad de las partículas sea igual a la del fluido, y para que su posterior detección sea posible.

El primero requisito, que las partículas sigan en su movimiento cualquier fluctuación o turbulencia del fluido que pueda aparecer en el experimento, será la condición más importante que tienen que cumplir las partículas elegidas, para que el seguimiento del fluido por parte del sembrado sea lo más fiel posible.

El segundo requisito es que el sistema tiene que ser capaz de obtener niveles de señal a ruido a la salida del módulo fotodetector lo suficientemente grandes para que el subsistema encargado de detectar y estimar la velocidad pueda generar medidas lo más exactas posibles, con el mínimo error, para una determinada potencia del láser, tamaño y posición de la apertura receptora. En una configuración determinada, para que se maximice la potencia recibida, los elementos dispersores deberán ser lo más grande posibles.

Además de estos dos factores imprescindibles, también tendremos que tener en cuenta que el número de partículas detectadas sean suficientes para que la resolución tem-

poral de la velocidad del fluido, relacionada con la concentración de partículas y con el tamaño de la zona de medida, pueda modelar cualquier proceso dinámico temporal de interés.

Observando los diferentes requisitos a cumplir por parte de las características de las partículas en un fluido, podemos ver que por una parte necesitamos tamaños pequeños, para un buen seguimiento del fluido, y por otra parte tamaños lo suficientemente grandes, para que la energía dispersada sea la mayor posible. Por tanto, aparece una situación de compromiso, que se deberá resolver en cada caso particular.

En este capítulo, presentaremos de una forma resumida las ecuaciones que modelan el movimiento de una partícula, de un cierto tamaño, densidad y índice de refracción, en un fluido caracterizado por su viscosidad dinámica y por su densidad, para obtener todos aquellos parámetros que nos puedan ayudar en la elección del tipo y de las características del sembrado a utilizar.

No pretendemos en ningún momento describir de una manera exhaustiva las teorías que están inmersas en el comportamiento dinámico. Solo queremos presentar, a manera de resumen, las variables principales y dar una idea aproximada de los factores de dependencia para justificar la elección del sembrado.

5.2. Movimiento de partículas en el seno de un fluido

Una de las aproximaciones que se han tomado desde un principio, y que supone una simplificación de los fenómenos que aparecen en la descripción del movimiento de una partícula en un fluido, han sido:

- **Forma esférica.** Esta suposición no siempre será exacta, ya que en el caso de sembrado natural no tiene porque cumplirse. Pero en el caso de sembrado artificial, como somos nosotros mismos los que podemos elegir, existen comercialmente formas esféricas en sus catálogos. A pesar de todo, si las partículas no fuesen totalmente esféricas, debido a que el tamaño de la zona de dispersión es generalmente del orden de 80-100 micras, y las partículas no podrán ser demasiado grandes para que puedan seguir al fluido, aproximadamente las podremos considerar esféricas.
- **No existen interacciones entre partículas.** Para mantener una separación entre partículas lo suficientemente grandes para evitar cualquier fenómeno de interacción entre ellas, habitualmente una buena regla empírica es que al menos exista entre partículas 1000 diámetros como separación media. Recordemos que

de la elección de este parámetro dependerá directamente de la resolución temporal de la velocidad.

Si aplicamos las anteriores aproximaciones, la ecuación del movimiento de una partícula en un fluido [Bas88], en el caso de un perfil homogéneo de velocidad sobre el sembrado y sin considerar fuerzas de sustentación, conocida como la ecuación Basset-Boussinesq-Oseen [CST98], aplicada para aplicaciones láser Doppler en [ABDT03] y [Mey91], se puede plantear de la siguiente forma

$$\underbrace{\frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \frac{dv_p}{dt}}_1 = \underbrace{3\pi\eta_f a_p (v_f - v_p)}_2 + \underbrace{\frac{\pi d_p^3 \rho_f}{6} \frac{dv_f}{dt}}_3 + \underbrace{\frac{\pi d_p^3 \rho_f}{12} \frac{d(v_f - v_p)}{dt}}_4 + \underbrace{\frac{3d_p^2 \sqrt{\pi\rho_f\eta_f}}{2} \int_{t_0}^t \frac{d(v_f - v_p)}{dt'} \frac{dt'}{\sqrt{t - t'}}}_5 + \underbrace{F_{ext}}_6 \quad (5.1)$$

donde v_f , ρ_f y v_p , ρ_p son las velocidades y densidades del fluido y de la partícula respectivamente, η_f la viscosidad dinámica del fluido, a_p el diámetro de la partícula y F_{ext} las fuerzas externas.

De esta ecuación podemos observar diferentes términos:

1. Fuerzas de aceleración que actúan sobre la partícula.
2. Fuerzas viscosas de resistencia del fluido o de Stokes.
3. Fuerzas de gradientes de presión debidas a aceleraciones del fluido.
4. Fuerzas de aceleración por la masa virtual.
5. Término de Basset, donde expresa las fuerzas viscosas motivadas por la inestabilidad dentro del fluido, respecto al estado permanente.
6. Fuerzas externas al fluido actuando sobre la partícula.

Una solución de la ecuación anterior (5.1) para el caso particular de que las fluctuaciones de la velocidad del fluido sean caracterizadas como variaciones sinusoidales, representadas por su pulsación ω_f (para una dimensión), y despreciando los términos 5 y 6, por el hecho de que en la mayoría de situaciones la densidad de la partícula será mayor que la del fluido, obtenemos la ecuación (5.2) del movimiento, y la expresión de la velocidad de la partícula para este caso en (5.3)

$$\frac{\pi}{6}d_p^3\left(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f\right)\frac{dv_p}{dt} + 3\pi\eta_f a_p v_p = \frac{\pi}{4}d_p^3\rho_f\frac{dv_f}{dt} + 3\pi\eta_f a_p v_f \quad (5.2)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{(3\pi\eta)^2 + \frac{1}{16}(\pi\rho_f d_p^2 \omega_f)^2}{(3\pi\eta)^2 + \frac{1}{36}[\pi(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f)d_p^2 \omega_f]^2}} v_f \sin(\omega_f t + \varphi) \quad (5.3)$$

El error relativo de la velocidad e_v se puede definir como

$$e_v = \frac{v_f - v_p}{v_f} \quad (5.4)$$

y la relación de velocidades en función del error relativo es

$$\frac{v_p}{v_f} = 1 - e_v \quad (5.5)$$

Substituyendo la ecuación (5.4) en (5.3), obtendremos el valor del error relativo de la velocidad en función de las características de la partícula y del fluido, llegando a la expresión

$$e_v = 1 - \sqrt{\frac{(3\pi\eta)^2 + \frac{1}{16}(\pi\rho_f d_p^2 \omega_f)^2}{(3\pi\eta)^2 + \frac{1}{36}[\pi(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f)d_p^2 \omega_f]^2}} \quad (5.6)$$

Para el caso de que la relación entre la densidad de la partícula respecto a la del fluido sean muy elevadas $\rho_p/\rho_s \gg 1$, la ecuación (5.6) para una pulsación de corte ω_c , para un error $v_p/v_f = 1 - e_v$ que pueda ser tolerado, tenemos

$$\frac{v_p}{v_f} = 1 - e_v = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_c^2 \tau_o^2}} \quad (5.7)$$

donde el tiempo característico τ_o se define como

$$\tau_o = \frac{\rho_p d_p^2}{18\eta_f} \quad (5.8)$$

Si ahora, calculamos la frecuencia de corte $f_c = \omega_c/2\pi$, de la respuesta dinámica de la relación de amplitudes de la velocidad de la partícula-fluido, la ecuación (5.7) nos queda como

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_o} \sqrt{\frac{1}{(1-s)^2} - 1} \quad (5.9)$$

donde esta expresión refleja la frecuencia umbral en que las partículas siguen a las oscilaciones de la velocidad con una amplitud de $(1-s)$.

5.3. Tamaño óptimo de las partículas

Ahora que ya tenemos las ecuaciones necesarias para modelar el movimiento de las partículas en el seno de un fluido, podemos encontrar la expresión que nos permita obtener que diámetro máximo a_p de la partícula es necesario, para un determinado error de seguimiento entre la velocidad de la partícula respecto a la del fluido $(1-s)$, siga las fluctuaciones o turbulencias del fluido en función de f_c . Despejando de la ecuación (5.9), tendremos que el diámetro máximo será

$$a_p < \sqrt{\frac{9\eta_f}{\pi\rho_p f_c} \sqrt{\frac{1}{(1-s)^2} - 1}} \quad (5.10)$$

Observando la ecuación (5.10), podemos notar que para un determinado tipo de fluido, caracterizado por su viscosidad η_f , una fuerte variación de su velocidad y un mínimo error, la partícula cada vez tendrá que ser más pequeña. Por tanto disponemos de un solo parámetro de diseño, que nos pueden ayudar en la elección, como es la densidad de la partícula ρ_p .

Si queremos que el límite sea lo más grande posible, podemos escoger aquellas sustancias que posean una viscosidad del fluido respecto a la densidad de la partícula η_f/ρ_p lo más grande posible. En los dos casos de experimentación más utilizados, como pueden ser en agua $\eta_f = 10^{-3}Pas$ y en aire $\eta_f = 15 \cdot 10^{-6}Pas$, la elección será totalmente diferente. En el primer caso, las partículas deberán tener una densidad lo más grande posible (líquidos), mientras que en el segundo caso todo lo contrario (gases). En la tabla 5.1 presentamos para diferentes tipos de partículas, sus densidades.

Así pues ya tenemos una primera cota, que nos limita el diámetro máximo de la partícula del sembrado, en función únicamente de las características del fluido y la partícula.

Además hemos de cumplir otra condición igual de importante que la anterior. El receptor debe generar a la salida del módulo fotodetector, una mínima cantidad de señal que pueda ser susceptible a ser detectada. Esta condición necesaria, la podremos cumplir

Cuadro 5.1 Densidades de diferentes partículas de sembrado.

Partículas Sembrado	ρ_p [Kg/m ³]
<i>TiO₂</i>	3900
<i>Al₂O₃</i>	3800
<i>SiC</i>	3300
<i>Vidrio</i>	2600
<i>Poliestireno</i>	1600
<i>S – HGS</i>	1400
<i>HGS</i>	1100
<i>Poliamida – 12</i>	1030
<i>DEHS</i>	912
<i>Microesferas</i>	700
<i>Microbolas</i>	100

si elegimos una potencia de los haces incidentes lo suficientemente grande, un tamaño de la apertura receptora y un ángulo de recepción determinados, que genere la máxima potencia de señal respecto al ruido, con un tamaño de los elementos dispersores lo suficientemente grandes. En los capítulos 7 y 8 se han presentado un estudio exhaustivo de como afectan todos estos parámetros.

En definitiva, un buen seguimiento ($a_p \Downarrow$) frente a una buena calidad de señal dispersada ($a_p \Uparrow$) será el objetivo en todo experimento, situación de compromiso entre dos condiciones enfrentadas.

5.4. Tiempo de establecimiento

Otro parámetro que puede ser importante es el tiempo que tarda la partícula en seguir al fluido con una cierta velocidad, en el justo momento que se introducen dentro de él. Si consideramos el caso particular de fluidos estacionarios, se puede obtener de la ecuación (5.2) despreciando el penúltimo término, la siguiente ecuación

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \left(\rho_p + \frac{1}{2} \rho_f \right) \frac{dv_p}{dt} + 3\pi\eta_f a_p v_p = 3\pi\eta_f a_p v_f \quad (5.11)$$

Así, a partir de 5.11, podemos conocer la relación v_p/v_f

$$\frac{v_p}{v_f} = \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (5.12)$$

donde τ se define como

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\eta_f} \left[1 + \frac{\rho_f}{2\rho_p} \right] = \tau_o \left[1 + \frac{\rho_f}{2\rho_p} \right] \quad (5.13)$$

y el error relativo s como

$$s = \frac{v_f - v_p}{v_f} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.14)$$

Substituyendo en la ecuación (5.14), podemos obtener el tiempo necesario para que la partícula siga al fluido desde una velocidad cero, con un error relativo s ,

$$t = -\ln s \cdot \tau_o \left[1 + \frac{\rho_f}{2\rho_p} \right] \quad (5.15)$$

5.5. Requisitos adicionales

Hemos visto y presentado de una manera resumida las principales características del movimiento de una partícula en un fluido, que nos han permitido obtener de una manera aproximada, qué tamaño máximo ha de tener el sembrado, para que éste siga a la velocidad del fluido, con un cierto error s , en el caso que las partículas sean esféricas y no exista interacción entre ellas.

Pero, ¿Que características deben cumplir las partículas, además de lo visto anteriormente? Aparte de las consideraciones propias de un sistema electro-óptico de medida como un sistema láser Doppler, las partículas han de cumplir ciertas propiedades en función del tipo de experimento [ML91].

Influencia del índice de refracción El índice de refracción de las partículas de sembrado n_p , de parte real $\Re\{n_p\}$ y de parte imaginaria $\Im\{n_p\}$, van a influenciar en la calidad de la señal recibida. Como pudimos ver en el capítulo 7, en función de la posición de la apertura receptora, su influencia puede ser importante, como es el caso de recepción por retrodispersión (RD) o casi despreciable en el de detección hacia delante (DHD). La luz dispersada por una partícula es una combinación de tres tipos de fenómenos, difracción, reflexión y refracción. Para el caso de DHD, las contribuciones de la difracción y refracción son muy importantes, y por tanto como el efecto de la reflexión es muy pobre, podemos afirmar que el valor del

Cuadro 5.2 Índices de refracción de diferentes partículas de sembrado.

Partículas	n_p
TiO_2	2.65
SiC	2.65
ZrO_2	2.20
Al_2O_3	1.76
MgO	1.74
<i>Poliestireno</i>	1.59
$NaCl$	1.54
ZrF_4	1.54
<i>VidrioBorosilicato</i>	1.52
<i>Poliamida – 12</i>	1.50
<i>Talco</i>	1.50
<i>Esferas recubiertas de metal</i>	0.199 -j 3.4314

índice de refracción del sembrado no va a influenciar demasiado. Ahora bien, en el caso de RD, la contribución más importante de la señal recibida, es debida a la reflexión, mientras que la refracción y difracción no juegan un papel dominante. Si queremos obtener una muy buena dispersión para el caso RD, tendremos que escoger partículas que tengan de índice de refracción n_p lo más grande posible. Tenemos dos posibles soluciones:

1. $\Re\{n_p\} \uparrow\uparrow$ y $\Im\{n_p\} \downarrow\downarrow$. En este caso, para partículas dieléctricas, como para dióxido de titanio (TiO_2).
2. $\Re\{n_p\} \downarrow\downarrow$ y $\Im\{n_p\} \uparrow\uparrow$. Partículas metálicas que tienden a tener altos valores de la parte imaginaria o esferas de vidrio recubiertas por metales.

Toxicidad de las partículas Además de las características típicas de las partículas presentadas, los aspectos de seguridad y respeto al medioambiente, han de ser consideradas. Existen tipos de sembrados que cumplen con los requisitos de buen dispersor y buen seguimiento. Pero a veces, estas sustancias pueden producir efectos nocivos [Bro85].

Si nos paramos a pensar, las partículas son de tamaños pequeñísimos, y por tanto pueden ser inhalados por el usuario o operador del sistema, pudiendo provocar efectos sobre el cuerpo humano indeseados. Un caso particular, es la utilización

de partículas fluorescentes como material de sembrado de fluidos. Estas partículas tienen la ventaja de producir incrementos de la SNR del sistema láser Doppler espectaculares, basándose en un proceso inelástico, cuando se excitan por un láser (p.e. verde), absorben dicha energía incidente para emitir a una frecuencia diferente (p.e. naranja). Con este proceso además, se evita todas las posibles reflexiones indeseadas disminuyendo el ruido en el fotodetector. EL problema está en la toxicidad de las sustancias, como puede ser la rhodamina [SS77]. Otro efecto que se deberá tener en cuenta, es la contaminación medioambiental que puede producirse cuando estas partículas sean introducidas en un entorno abierto.

Temperatura Otra también muy importante, que la partícula no se vea afectada por las condiciones del experimento, como puede ser la temperatura. La partícula elegida habrá de soportar esas condiciones en todo momento, sobre todo en la medida de llamas o fluidos a muy alta temperatura. El conocimiento del punto de fusión será clave en estos casos (Tabla 5.3).

Cuadro 5.3 Punto de fusión de diferentes partículas de sembrado.

Partículas Sembrado	Punto de Fusión [°C]
<i>ZrO₂</i>	2980
<i>SiC</i>	2700
<i>Al₂O₃</i>	2015
<i>TiO₂</i>	1750
<i>NaCl</i>	801
<i>VidrioBorosilicato</i>	740
<i>Poliamida – 12</i>	175

5.6. Elección del tipo de sembrado

Una vez presentadas las principales propiedades de las partículas que se deberán introducir artificialmente en el fluido para que su detección sea posible, cumpliendo los requisitos de gran dispersión de energía y de un buen seguimiento del fluido, vamos a justificar la elección del sembrado utilizado en todos los experimentos realizados en esta tesis.

- ✓ Para maximizar los niveles de señal detectados, hemos realizado todas las medida con el sistema 2D-LDA, para el caso que el receptor esté colocado en detección hacia delante (DHD). Esto supone que el índice de refracción de las partículas no será importante.
- ✓ El fluido elegido, ha sido agua destilada de viscosidad $\eta_f = 10^{-3}Pas$ y de densidad $\rho_f = 1000kgm^{-3}$.
- ✓ La temperatura de los experimentos se han realizado a temperatura ambiente, y por tanto no necesitamos ninguna restricción en cuanto a puntos de fusión ni riesgos de explosión. La temperatura media del laboratorio es de 22°C.
- ✓ Las velocidades del fluido están entre 0-3m/s, en un tubo de sección circular y por tanto en régimen laminar (no existen turbulencias). De esta manera, las turbulencias o remolinos que pueden aparecer serán muy pequeñas, y por tanto el tamaño máximo para que el sembrado siga a la del fluido será relativamente grande.
- ✓ Sembrado no tóxico.

Para cumplir con todos estos requisitos, hemos utilizado los catálogos de diferentes fabricantes de sembrados artificiales, particularmente el de la empresa danesa DANTEC [Dyn02b], presentadas en la tabla 5.4.

Cuadro 5.4 Tipos de sembrado comerciales Dantec [Dyn02b].

Specifications

	PSP Polyamid Seeding Particles	HGS Hollow Glass Spheres	S-HGS Silver Coated Hollow Glass Spheres	FPP Fluorescent Polymer Particles	EMS
Mean diameter (μm)	5, 20, 50	10	10	10, 30, 75	40
Size distribution	1 - 10 μm 5 - 35 μm 30 - 70 μm	2 - 20 μm	2 - 20 μm	1 - 20 μm 20 - 40 μm 50 - 100 μm	30 - 50 μm
Particle shape	non-spherical but round	spherical	spherical	spherical	spherical
Density (g/cm^3)	1.03	1.1	1.4	1.5	0.03
Melting point ($^{\circ}C$)	175	740	740	250	~ 150
Refractive index	1.5	1.52	-	1.68	-
Material	Polyamid 12	Borosilicate glass	Borosilicate glass	Melamine resin based polymer	Copolymer

Para el caso particular de la medida de agua, una de las partículas mas acordes con las condiciones de los experimentos realizados, la mejor solución es utilizar partículas de Poliamida-12 (PSP-20, diámetro= 5-35 μm , 250 gramos, Ref.80A4011).

Estas, ha sido producidas por procesos de polimerización y por tanto será casi esféricas. Además, son partículas microporosas y eso hace que su elección para el caso de utilizarlas en agua sea altamente recomendable, sin toxicidad alguna.

A partir de la ecuacion 5.12, nos permitirá calcular que frecuencias de variación máximas podrán aparecer en el fluido, para conseguir un determinado error de seguimiento, con partículas de Poliamida-12, y de la ecuacion 5.10, podremos saber que tamaño máximo del sembrado debemos utilizar en función de esas variaciones.

En la figura 5.1 representamos la relación v_p/v_f en función de la frecuencia de oscilación de la velocidad del fluido, para diferentes tamaños de partículas de Poliamida-12 de densidad $\rho_p = 1,03 gr/cm^3$ en agua ($\eta_f = 10^{-3} Pas$) y en la figura 5.2 en el aire ($\eta_f = 15 \cdot 10^{-6} Pas$).

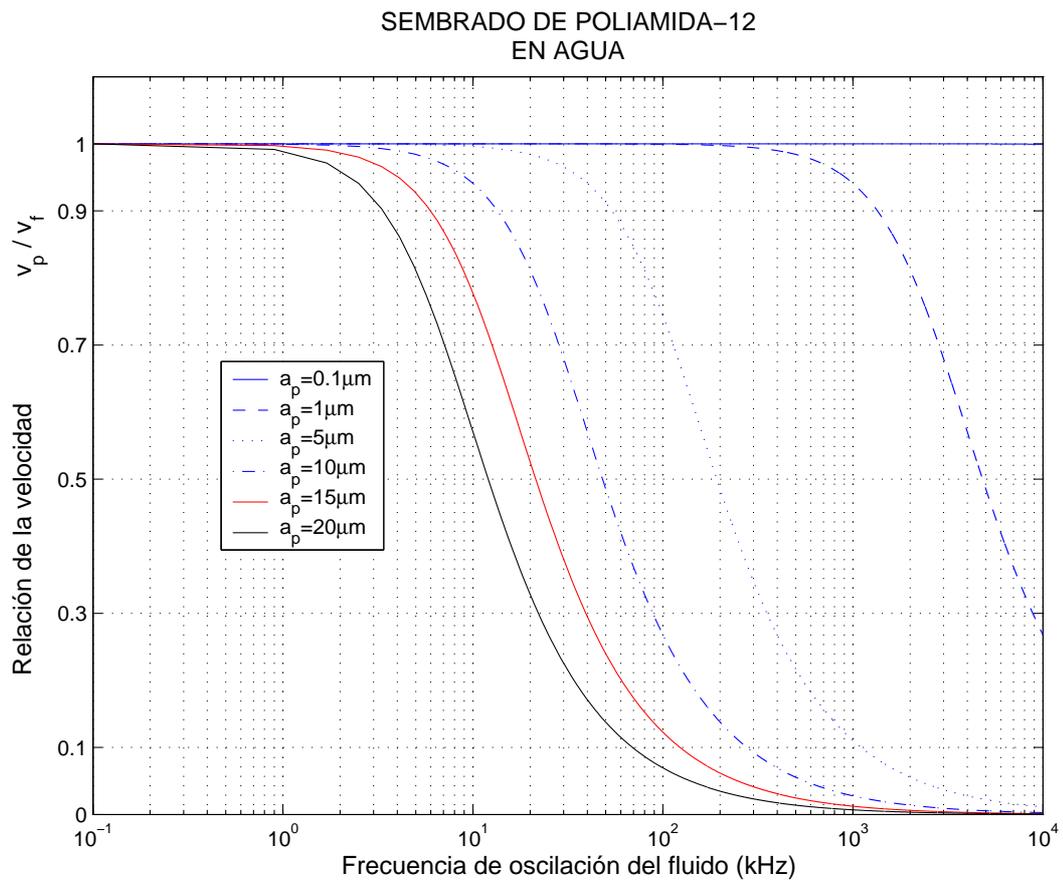


Figura 5.1 Respuesta de seguimiento en agua

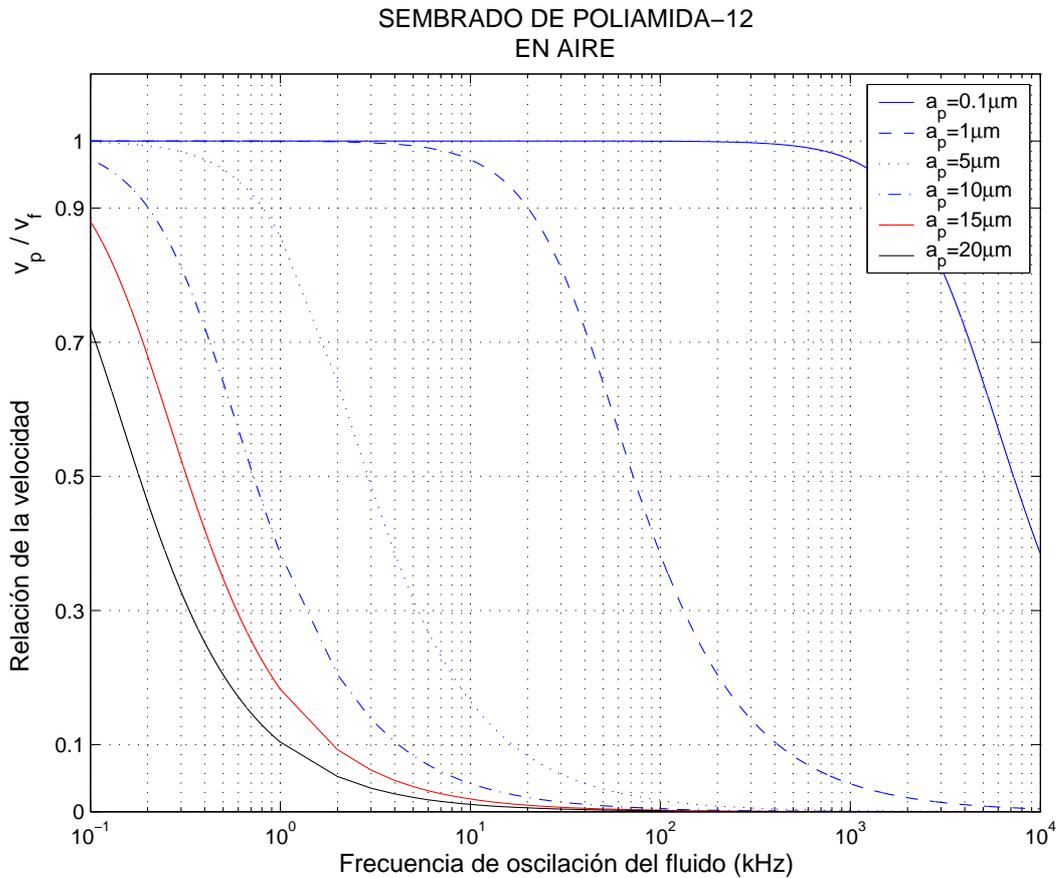


Figura 5.2 Respuesta de seguimiento en aire

Podemos observar, que si queremos un error de seguimiento de la velocidad de partícula respecto a la del fluido pequeño (próximo a la unidad), para un tamaño de partícula determinado, necesitamos que las turbulencias o variaciones del fluido sean igual de pequeñas. Para el caso de diferentes diámetros de la partícula, cada vez que sean más grandes, el error de seguimiento será mayor.

Si comparamos los resultados del error en función del tipo de fluido, agua y aire, vemos que para mantener un mismo error, para el caso del aire (figura 5.2) necesitamos que las partículas sean mucho más pequeñas que en el caso del agua (figura 5.1).

En la figura 5.4, calculamos el tamaño de las partículas de sembrado, en función de la variación del fluido (en agua y aire).

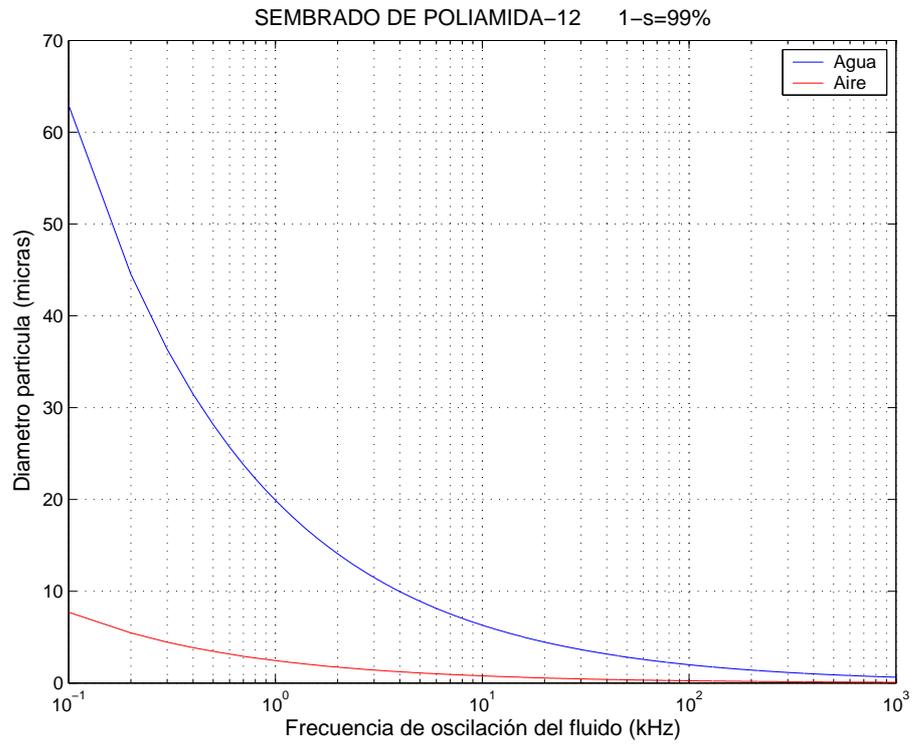


Figura 5.3 Diámetro de la partícula para diferentes niveles de turbulencia en agua y aire

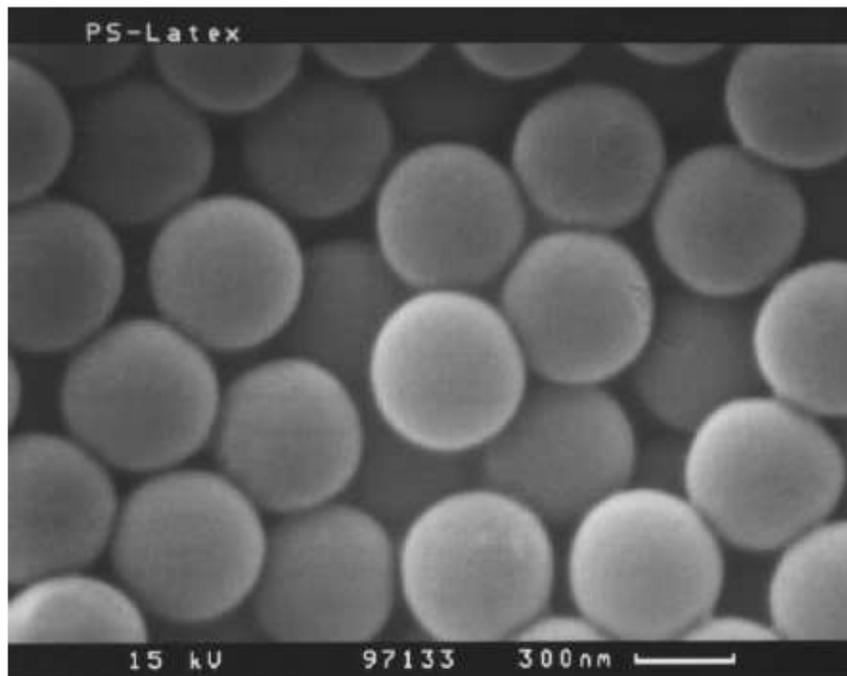


Figura 5.4 Foto de microscopio electrónico de partículas de poliestireno (PS) [RWB99]

