



Estudio de la agitación en tanques de pulverizadores agrícolas mediante simulaciones informáticas

Jorge Badules¹, Mariano Vidal², Antonio Boné³, F. Javier García-Ramos⁴

- ¹ Escuela de Doctorado, Universidad de Zaragoza.
- ² Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza; anbone@unizar.es
- ³ Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza; vidalcor@unizar.es
- ⁴ Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza; fjavier@unizar.es

Resumen: Los pulverizadores agrícolas disponen en sus depósitos sistemas de agitación para garantizar una adecuada homogeneidad de la mezcla en lo relativo a concentración de materia activa y evitar la sedimentación de los productos en suspensión. El estudio empírico de la eficacia de estos sistemas, bien sea para garantizar la uniformidad de la disolución, bien para optimizar los propios agitadores, puede resultar muy costoso en tiempo y recursos. Como alternativa se utilizan simulaciones informáticas basadas en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). En el presente estudio, se han aplicado modelos CFD de cálculo numérico para estudiar el movimiento del fluido en el interior del depósito de un pulverizador comercial, comparando los datos de velocidad obtenidos con mediciones reales llevadas a cabo con un velocímetro acústico Doppler. Se concluye que, modelando adecuadamente, el CFD puede suponer una herramienta útil para el fabricante, ya que predice de forma correcta el comportamiento general del líquido dentro del depósito, incluyendo líneas de flujo principales o velocidades por zonas.

Palabras clave: modelización, CFD, depósito, velocidad

1. Introducción

Los plaguicidas son productos utilizados en todo tipo de cultivos para luchar contra las malas hierbas, insectos u hongos. La aplicación de estos productos requiere realizar una disolución en agua con las concentraciones recomendadas por el fabricante del producto, variables en función del tipo de producto y problema fitosanitario. Esta mezcla es almacenada en los tanques o depósitos de los pulverizadores agrícolas, que son las máquinas más usadas para la aplicación de los productos fitosanitarios en parcela.

Los tanques de los pulverizadores incorporan agitadores que mueven el líquido en el que se ha disuelto el producto, evitando sedimentaciones. Para el estudio de la agitación, existe un procedimiento normalizado, la norma ISO 5682-2 [1], que requiere, tras un tiempo de agitación, recoger muestras en varios puntos del tanque para medir la concentración de materia activa. La realización de esta prueba en la práctica no es sencilla. Adicionalmente, si se quisiera analizar la influencia que tienen sobre la agitación los parámetros que conforman el sistema de agitación (tipo de boquilla, caudal de agitación, nivel de agua en el depósito, etc.) los ensayos serían muy costosos tanto en tiempo como en recursos.

Por este motivo se han propuesto varias alternativas para estudiar los sistemas de agitación de los tanques, que exploran varias vías [2], como por ejemplo el empleo de medidores de

turbidez [3,4,5], el estudio de imágenes tomadas en depósitos transparentes [6], o estudiar la agitación de forma indirecta mediante la medición de velocidades dentro del depósito [7]. Otra vía diferente cuyo estudio se ha explorado es el empleo de la dinámica de fluidos computacional (CFD) [8]. El CFD es una técnica de cálculo numérico por ordenador mediante la que se pueden estudiar una gran variedad de problemas en los que intervienen fluidos. Su uso en el estudio de agitación de tanques, es teóricamente ideal, ya que permitiría a los diseñadores de estas máquinas probar diferentes soluciones de forma previa al desarrollo del primer prototipo, proporcionando una gran cantidad de información. Sin embargo, los resultados que se obtienen no siempre son concluyentes [9].

La principal vía de aplicación de los modelos CFD a los sistemas de agitación ha sido la estimación de velocidades del líquido en el interior del depósito y su posterior comparación con valores empíricos reales [10]. Otra vía de investigación ha sido intentar correlacionar la concentración de materia activa medida experimentalmente con la velocidad teórica calculada con CFD [11].

El objetivo del presente trabajo ha sido comparar los datos experimentales de velocidad medidos en el depósito de un pulverizador comercial, con los calculados por ordenador mediante CFD. La medición experimental se ha realizado con un velocímetro acústico Doppler [7] en diferentes condiciones de nivel de líquido en el depósito, presión en las boquillas de los agitadores y número de agitadores en funcionamiento

2. Materiales y métodos

2.1. Máquina y materiales

Para este estudio se ha usado un pulverizador hidroneumático con un tanque de 3000 L (GarMelet S.L.), de geometría cilíndrica partido por un rompeolas en forma de casquete esférico en dos cámaras interconectadas. El depósito tiene un hueco cilíndrico que lo atraviesa transversalmente y por donde pasa un eje motriz, según la Figura 1. Tiene 4 agitadores de efecto Vénturi en el interior del depósito, de dos modelos diferentes, que remueven el líquido y pueden funcionar bien simultáneamente o bien sólo los dos de mayor caudal, estando colocados cada uno en esquinas opuestas.

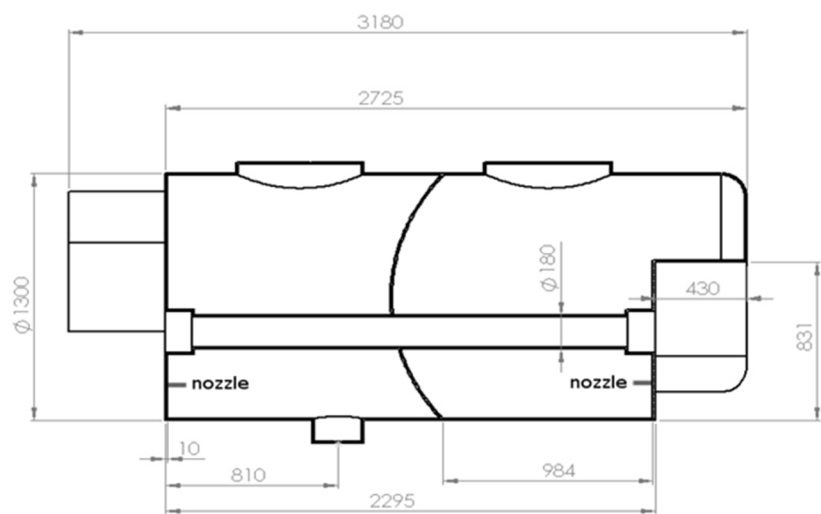


Figura 1. Corte longitudinal del depósito.

La medición de velocidades se ha realizado con un velocímetro acústico Doppler modelo 3D MicroADV 16 MHz de SonTek (San Diego, CA, USA). Este medidor dispone de tres sensores y un receptor, que mide la velocidad del fluido situado a 5 cm del mismo, según [7].

Para garantizar que el velocímetro se dispone exactamente en la coordenada deseada y que no se mueve durante la toma de datos, se tuvo el auxilio de una estructura metálica fabricada expresamente para el experimento donde se fijó el velocímetro.

2.2. Modelo informático

Para la resolución de todos los modelos se ha empleado como código CFD el programa ANSYS-Fluent (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA).

Tras estudiar varias posibilidades, se ha optado por realizar cálculos estacionarios en los que el volumen del modelo está ocupado íntegramente por agua, lo que disminuye los tiempos de cálculo y facilita la convergencia de los mismos. En ningún caso se modela el aire que queda en la parte superior del depósito no ocupada por el líquido. Por el contrario, esta estrategia tiene el problema de que necesita un modelo de cálculo diferente para cada volumen de agua en el depósito que se quiera estudiar (figura 2).



Figura 2. Perspectiva de diferentes mallados usados en los modelos de 1000, 2000 y 3000 L. El mallado es más fino en los agitadores y en las paredes del depósito que en el interior.

En otras palabras, un modelo en el que se pudieran implementar diferentes fases, permitiría usar un mismo mallado para cualquier volumen de agua en el depósito a estudiar, especificando en cada cálculo hasta dónde llega el nivel, pero esto requiere un gran esfuerzo computacional. Realizar varios modelos más simples es ventajoso siempre que lo que se quiera estudiar sea sólo la distribución de velocidades en el líquido del interior del depósito, si bien se deben asumir estas dos simplificaciones:

- El volumen del líquido en el tanque, es constante. Esto no sería correcto en el uso real de la máquina, pero sí en un ensayo como el realizado, ya que el agua que se inyecta en los agitadores proviene del circuito de retorno de la bomba que toma el agua del propio tanque.
- El oleaje es despreciable, también aceptable ya que el ensayo real es con la máquina parada.

En nuestro caso, al haber analizado el tanque, con 1000, 2000 y 3000 L, se necesitaron 3 modelos diferentes, cuyas características se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los modelos CFD

	Modelo 1000 L	Modelo 2000 L	Modelo 3000 L
Celdas	965.063	1.494.857	1.046.289
Tamaño mínimo de celda	4,42 x 10 ⁻⁴ m	4,55 x 10 ⁻⁴ m	4,75 x 10 ⁻⁴ m
Tamaño máximo de celda	0,025 m	0,025 m	0,035 m
Tipo de malla		No estructurada	
Remallado en paredes		SI, 6 capas	

Uno de los problemas que presenta esta simplificación, es la modelización de la lámina libre de agua en el tanque. Ni se puede imponer condición de contorno “pared”, ni es una superficie de salida de fluido. Como táctica, se ha optado por imponer condición de entrada de fluido, especificando que la masa de fluido que entra por ese contorno es cero.

El modelo de turbulencia adoptado ha sido el estándar $k-\varepsilon$, y en cuanto a funciones de pared se ha adoptado el modelo escalable. El esquema de cálculo utilizado es el de segundo orden, con el algoritmo SIMPLE.

En cálculo estacionario, los residuos de cálculo alcanzan rápidamente valores menores a 10^{-4} , a excepción de los de la ecuación de continuidad. Éstos nunca llegan a alcanzar dichos valores, y son más elevados cuanto mayor sea el número de celdas tenga el modelo (provocado por el volumen de agua en el tanque) y número de agitadores funcionando. Por este motivo se limitó el número de celdas del modelo de 3000 L incrementando el tamaño de las celdas en el interior del modelo. En este contexto, se considera que el cálculo ha convergido cuando los valores de dichos residuos son estables, que coincide cuando se estabilizan los valores monitorizados (figura 3). Para ello se necesitan unas 4 horas de cálculo en las que se calculan unas 1500 iteraciones con un ordenador de 16 GB de RAM con una CPU Intel i7 4820k.

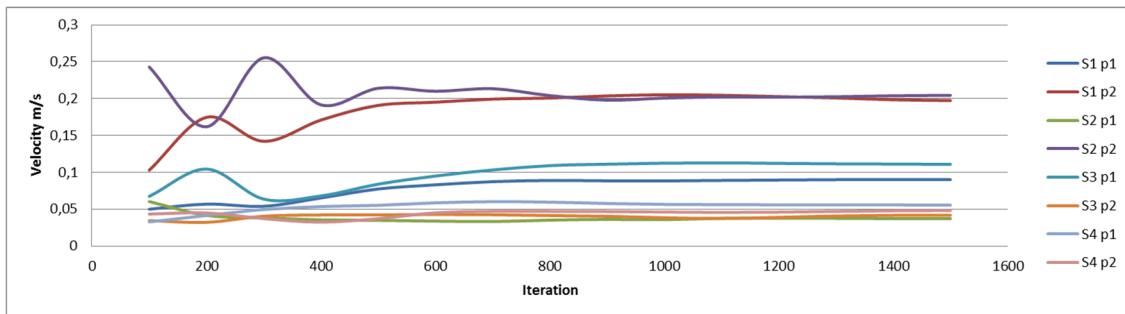


Figura 3. Gráfica que representa, en un modelo de 1000 L, la velocidad calculada en 8 puntos de muestra conforme avanzan las iteraciones de cálculo. Se concluye que en este caso, es suficiente con 1500 iteraciones, ya que el cálculo lleva estabilizado desde la iteración 900.

El punto crítico del modelo informático es la modelización de la boquilla del agitador. En un primer momento, se realizó una reproducción lo más exacta posible de la geometría de todos los elementos del depósito del pulverizador, lo que incluía disponer boquillas en los agitadores de 2,5 mm de diámetro de orificio, pero se observó que de esta forma se obtenían unos resultados inferiores en magnitud a los reales. De aquí se dedujo que el efecto de contracción del chorro en la boquilla no era despreciable, por lo que se introdujo un diámetro menor.

La condición de contorno “salida de fluido”, necesaria para el cálculo de los modelos, se dispuso cerca de la zona donde se extrae el líquido del depósito, en la zona inferior.

2.3. Recopilación de datos experimentales

El experimento real es el explicado en [7]. En el depósito indicado en el apartado 2.1 se establecieron 4 secciones de mediciones, y en cada sección, hasta 8 puntos de medida (en función del nivel de agua en el depósito), tal y como se indica en la figura 4.

El número de simulaciones realizado ha sido en total 18:

- 3 niveles de agua diferentes en el depósito: 1000, 2000 y 3000 L
- 3 presiones diferentes en las boquillas de agitación: 8, 10 y 12 bares
- 2 configuraciones diferentes de los agitadores: 2 y 4 boquillas simultáneas

Con 1000 L en el depósito, sólo se pudieron tomar medidas en los puntos 1 y 2, mientras que, con 2000 L, sólo en los puntos 1, 2, 3, 4 y 5. Las medidas en todos los puntos de muestreo (figura 4) sólo estuvieron disponibles por lo tanto con 3000 L de agua en el depósito.

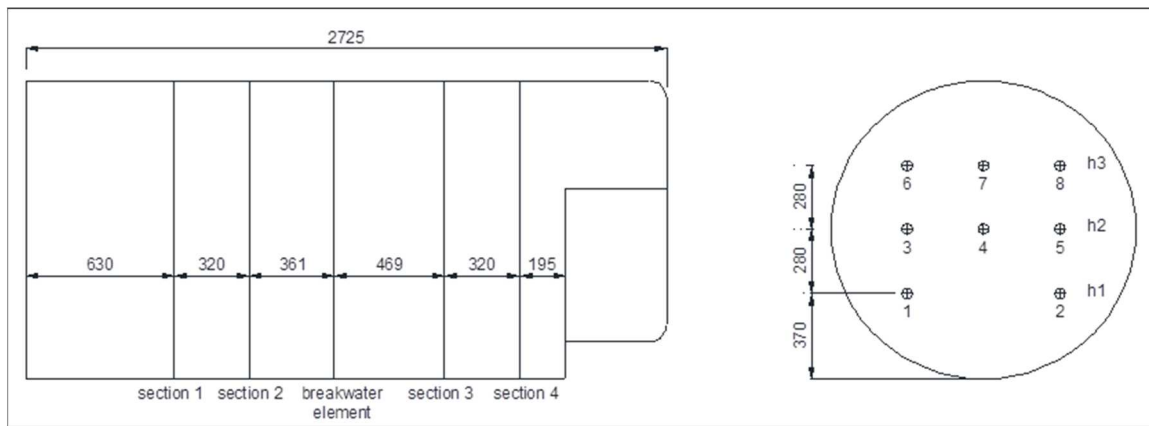


Figura 4. Ubicación de secciones y puntos de medida en el depósito del experimento.

3. Resultados y discusión

3.1. Influencia del nivel del depósito y presión del circuito de agitación

Si se realiza la media de velocidades de todos los puntos de muestreo, distinguiendo entre niveles del depósito y presiones del circuito de agitación (figura 5), la simulación CFD predice razonablemente bien que el factor más determinante en la velocidad de agitación es el nivel de agua en el depósito, de modo que la velocidad del fluido aumenta cuanto menor es el nivel de agua en el depósito. La influencia de la presión (y por lo tanto del caudal) en las boquillas de agitación es menos importante, aunque la tendencia es que a mayor presión mayor velocidad; esta tendencia se hace más acusada cuando disminuye el nivel de agua en el depósito.

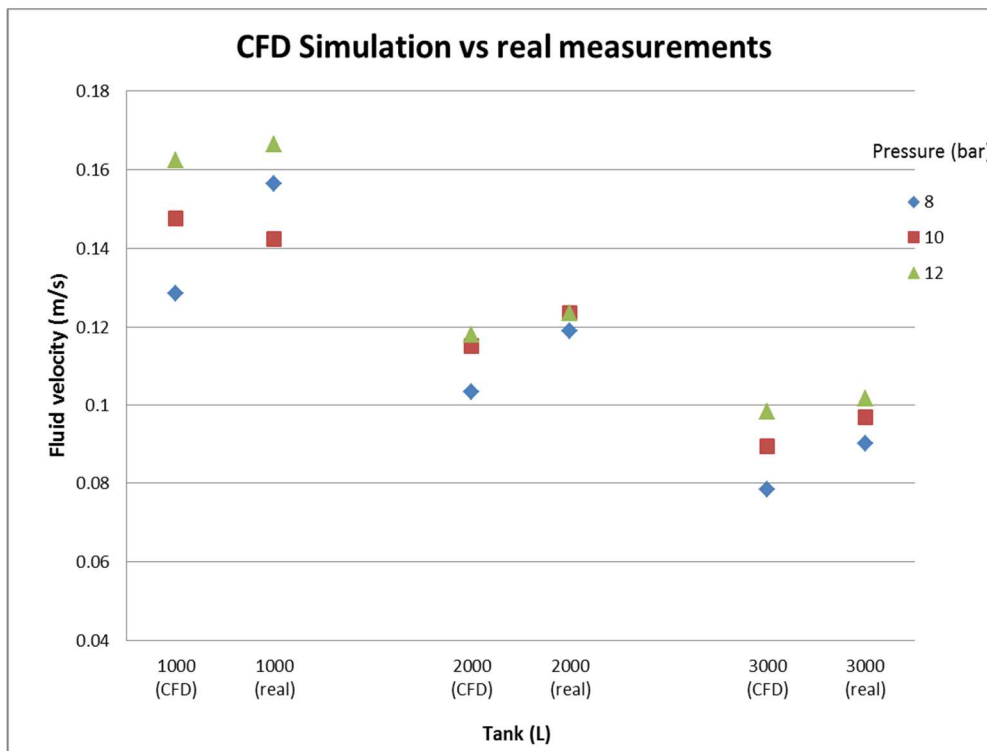


Figura 5. Velocidad del fluido según el nivel de agua en el depósito y la presión en el circuito de agitación.

3.2. Influencia del número de boquillas en funcionamiento

Si se estudia el número de boquillas en funcionamiento, la simulación CFD llega a las mismas conclusiones que el experimento real. La velocidad de agitación del fluido es similar con el depósito lleno, independientemente de que haya 2 o 4 boquillas funcionando. Pero cuando el nivel del depósito baja, es claramente más ventajoso usar sólo 2 boquillas. La conclusión obvia para el modelo de máquina empleado, es, que es innecesario para el fabricante montar 4 boquillas, simplificando la construcción y el coste de la máquina, ya que con ello no sólo no se obtiene una mejora de la agitación, sino que es contraproducente conforme disminuye el nivel de líquido en el depósito.

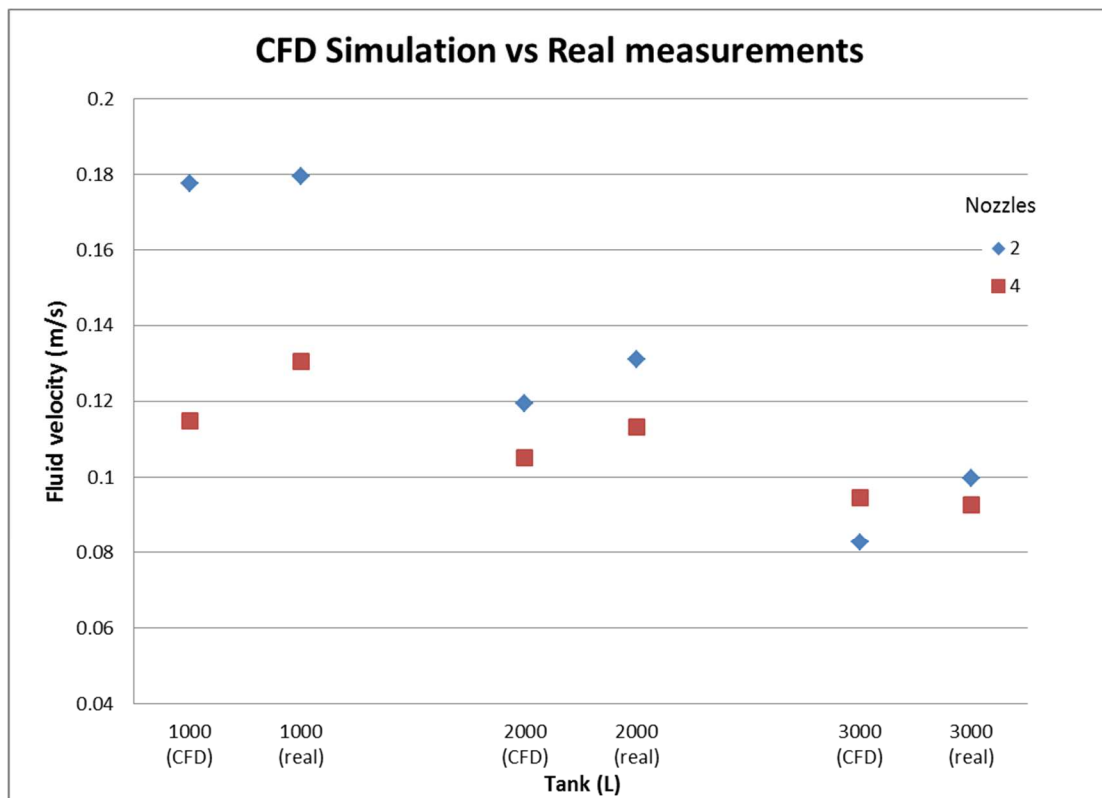


Figura 6. Velocidad del fluido según el número de boquillas en funcionamiento

La simulación CFD permite comprender el fenómeno que explica esta aparente paradoja. En el depósito estudiado, la alineación aproximada de los agitadores con los agujeros del rompeolas, hace que las corrientes generadas por un agitador tiendan a atravesar dicho agujero. Cuando sólo funcionan dos boquillas, lo hacen en esquinas contrapuestas del depósito, de forma que no existe interacción entre ambas. Pero cuando funcionan las 4, lo hacen enfrentadas 2 a 2 (figura 7), por lo que las corrientes generadas por unas tienden a contrarrestar las producidas por otras. Por lo tanto se deduce que la ubicación de las boquillas y de los agujeros del rompeolas central, son determinantes en el comportamiento del fluido dentro del depósito.

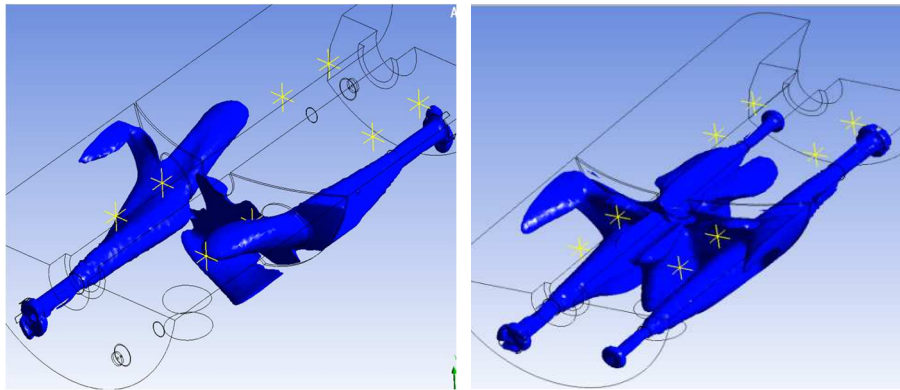


Figura 7. Diagrama de isovelocidades 0,2 m/s con 2 y 4 boquillas funcionando en un depósito con 1000 L de líquido.

3.3. Velocidades por planos y secciones

Si se comparan los datos realizando medias de velocidades de los puntos pertenecientes a una misma altura, se observa que las velocidades teóricas obtenidas en el modelo informático se ajustan bastante bien a las experimentales, aunque en la altura 2 (a 65 cm del fondo) se obtienen valores CFD sensiblemente inferiores a los determinados experimentalmente.

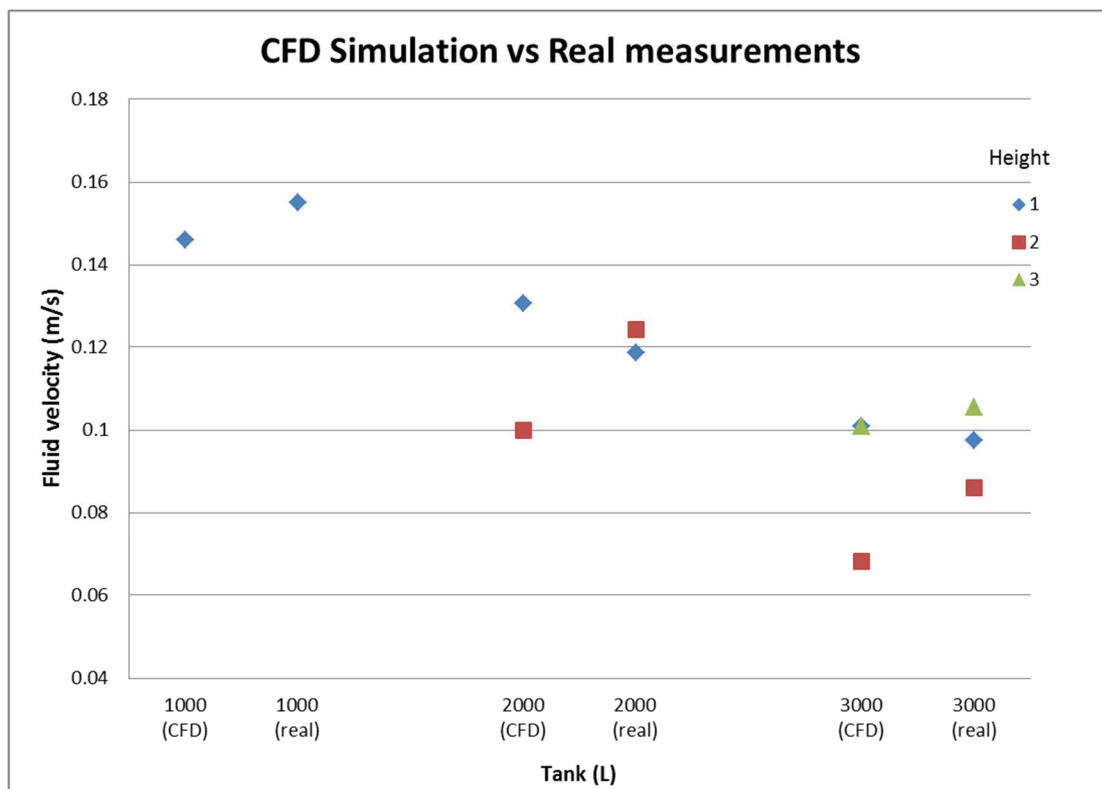


Figura 8. Velocidad del fluido según la altura de mediciones (1: 37 cm; 2: 65 cm, 3: 93cm)

Si se realiza el estudio por secciones, la simulación por CFD predice correctamente que la que se ha determinado como sección 2 en el depósito es la que presenta mayores velocidades en todo caso. También es correcta la simulación informática en determinar que a menor nivel de agua en el depósito, las diferencias de velocidad entre secciones aumentan.

Hay algunos aspectos en los que los resultados obtenidos se alejan de la medición real, como por ejemplo en la disparidad de comportamiento de las secciones 1 y 3 con el depósito lleno con 1000 L; la medición real indica que la velocidad de ambas secciones es significativamente diferente, mientras que la simulación informática la da similar para ambas y con un valor intermedio.

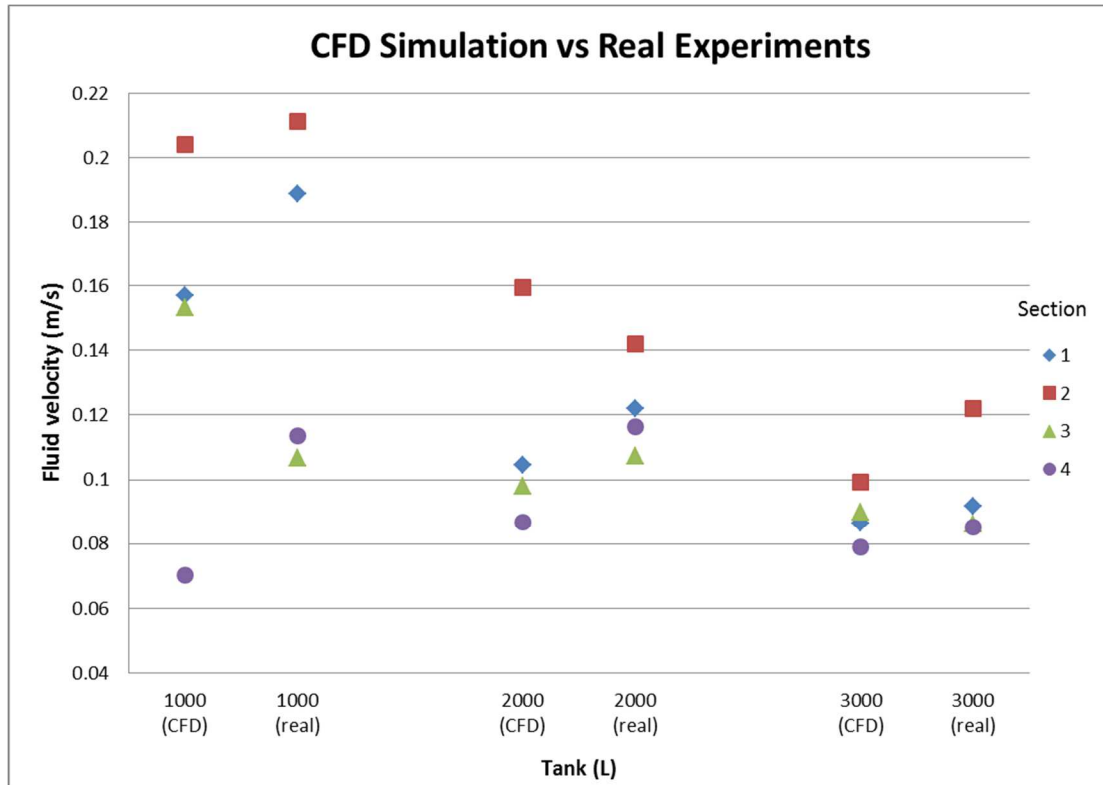


Figura 9. Velocidad del fluido según la sección de medición

3.4. Comparación por puntos de medida

Finalmente, se han comparado las velocidades medias observadas en los diferentes puntos de medición. Cualitativamente se observa que el que se ha denominado punto 1 es el que tiene las mayores velocidades, salvo en el caso del depósito con 3000 L en que es superado por el punto 7. La mayor disparidad es la velocidad del punto 5 en la simulación del depósito con 2000 L.

Debe mencionarse que las velocidades teóricas calculadas en la simulación CFD tienen siempre un intervalo mayor a las obtenidas en la medición. Así por ejemplo con 1000 L, tenemos una velocidad real media mínima de 0,15 m/s en el punto 2 y una máxima de 0,16 en el punto 1, mientras que en la simulación CFD nos da una velocidad mínima de 0,128 para el punto 2 y una máxima de 0,164 para el punto 1. En el caso del depósito con 3000 L, tenemos en la realidad una velocidad máxima de 0,133 m/s en el punto 7 y una mínima de 0,078 en el punto 5, mientras que la simulación CFD nos da unos valores de 0,136 y 0,065 respectivamente. En conclusión, las simulaciones CFD realizadas parecen infravalorar las velocidades mínimas.

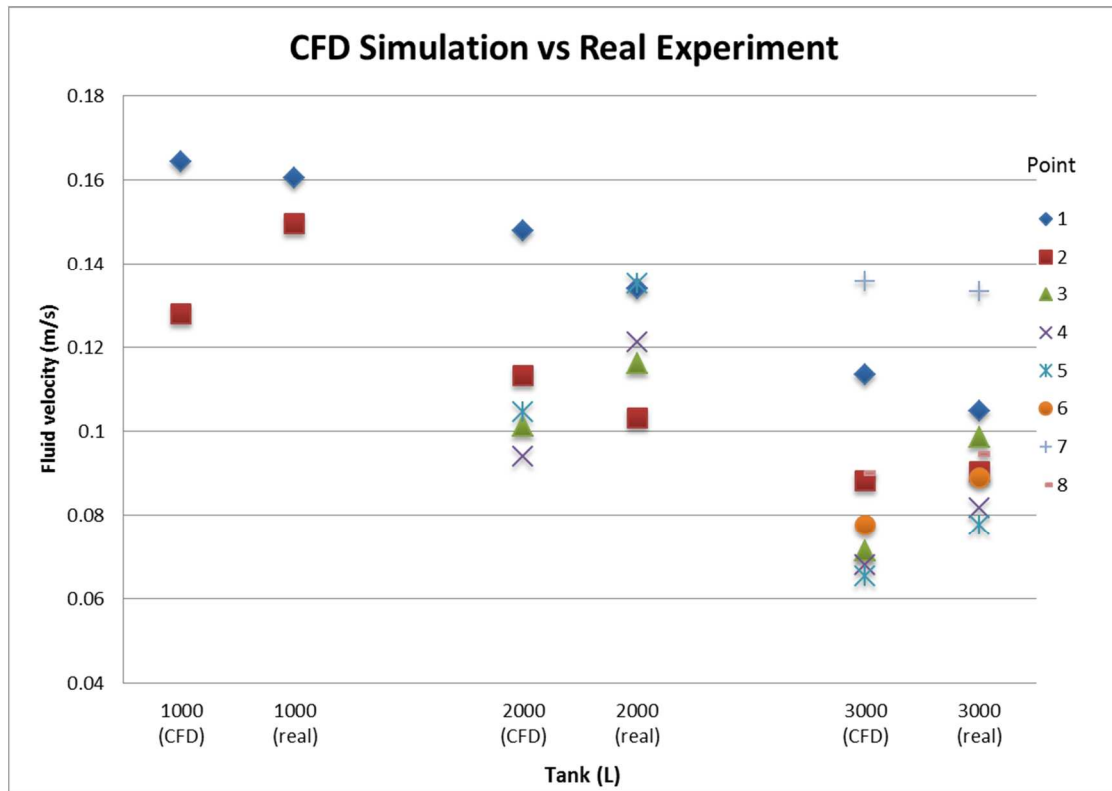


Figura 10. Velocidad del fluido según el punto de medición

3.5. Análisis cuantitativo de los errores

El criterio general de validez de modelos de CFD [12] es conseguir un error por debajo del 30 % calculado con la ecuación 1.

$$E = \frac{1}{N} \sum \frac{|V_m - V_c|}{V_m} \times 100$$

(1)

Bajo este criterio, la comparación de datos estimados y reales punto por punto arroja errores elevados (tabla 2) con errores tolerables en un tercio de ellos, lo cual iría en consonancia con otros autores [9] que también han obtenido un porcentaje de correlación punto a punto bajo en experimentos similares.

Tabla 2. Errores de los modelos considerando todos los puntos de medida

Modelo	Error (%)	% puntos con medidas < 30%
1000	47,89	25
2000	46,58	42
3000	42,41	38
Media	45,62	35

Sin embargo, las medias de velocidades obtenidas en el experimento real son muy similares a las medias de velocidades obtenidas mediante simulación CFD. En la comparación, por ejemplo, del modelo CFD de 1000 L a 10 bar con 4 agitadores, respecto del experimento real, la media de los valores es 0,116 y 0,125 respectivamente, lo que, al contrario que el análisis punto a punto, supone una aproximación bastante aceptable con un error del 7%. El caso expuesto es un ejemplo,

ya que en todos los casos (tabla 3), las medias obtenidas con CFD son aproximaciones muy buenas a las medias medidas experimentalmente.

Tabla 3. Porcentaje de error de las medias de velocidades entre mediciones reales y simulaciones informáticas.

Modelo	2 agitadores			4 agitadores		
	8 bar	10 bar	12 bar	8 bar	10 bar	12 bar
1000	20%	12%	8%	14%	7%	14%
2000	10%	4%	12%	16%	10%	5%
3000	23%	16%	14%	3%	1%	7%

Aunque es posible que la introducción del medidor dentro del depósito influya en las corrientes generadas en el líquido cuando éstas se miden experimentalmente, por la forma del velocímetro cabe esperar que la influencia sea pequeña. Una explicación a este hecho sería que el CFD magnifica los resultados de velocidades, tanto al alza como a la baja, de manera que los errores por exceso se compensan con los errores por defecto haciendo que el conjunto de valores no se desvíe de la media más de un 30 %.

4. Conclusiones

Los modelos CFD han permitido predecir de forma correcta el comportamiento general del fluido en el depósito considerando valores medios de velocidad en función de los parámetros del sistema de agitación (nivel de agua en el depósito, presión del circuito hidráulico y número de boquillas activas).

Por lo tanto, con la metodología empleada, el CFD se puede convertir en una herramienta útil de diseño para el fabricante, que permita la toma de decisiones relativas al diseño del sistema de agitación de forma previa a la fabricación del primer prototipo.

Sin embargo, la estimación de velocidades punto a punto sólo consigue estimar velocidades del fluido en el 35% de los puntos de medida con errores menores del 30%, mostrando una baja fiabilidad. La metodología descrita es útil para conocer el comportamiento del fluido pero no para estimar velocidades concretas en un punto.

5. Agradecimientos

Se agradece a la empresa GarMelet SL su colaboración en la realización del estudio.

Referencias

1. ISO. Equipment for crop protection - Spraying equipment -Part 2: Test methods for hydraulic sprayers; ISO 5682-2. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1997.
2. Balsari, P.; Tamagnone, M.; Allochis, D.; Marucco, P.; Bozzer, C. Sprayer tank agitation check: A proposal for a simple instrumental evaluation. Fourth European Workshop on Standardised procedure for the Inspection of Sprayers –SPISE 4- Lana (South Tyrol), March 27-29, 2012.
3. Ozkan, H.E.; Ackerman, K.K. Instrumentation for measuring mixture variability in sprayer tanks. *Appl. Eng. Agric.* 1999, 15 (1), 19-24
4. Ucar, T.; Ozkan, H.E.; Fox R.D.; Brazee R.D.; Derksen R.C. Experimental study of jet agitation effects on agrochemical mixing in sprayer tanks. *J. Agric. Eng. Res.* 2000, 78, 195-207.
5. Vondricka, J.; Schulze, P. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems. *T. ASABE.* 2009, 52(1), 61-66
6. Tamagnone, M.; Balsari, P.; Bozzer, C.; Marucco, P.; Assessment of parameters needed to design agitation systems for sprayer tanks. *Asp. Appl. Biol.* 2012, 114, 167-174.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA
3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

7. García-Ramos, F.J.; Badules, J.; Bone, A.; Gil, E.; Aguirre, J.; Vidal, M. Application of an acoustic Doppler velocimeter to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an agricultural sprayer. *Sensors* 2018(11):3715
8. Armenante, P.M.; Luo, C.; Chou, C.; Fort, I.; Medek, J. Velocity profiles in a closed unbaffled vessel: comparison between experimental LDV data and numerical CFD predictions. *Chem. Eng. Sci.* 1997, 52(20), 3483-3492.
9. Ucar, T.; Fox, R.D.; Ozkan, H.E.; Brazee, R.D. Simulation of jet agitation in sprayer tanks: comparison of predicted and measured water velocities. *T. ASAE*. 2001, 44(2) 223-230.
10. Chen, M.; Niao, B.; Pan, J.; Li, Q.; Gao, C. Improvement of the flow rate distribution in quench tank by measurement and computer simulation. *Mat. Lett.* 2006, 60, 1659-1664.
11. Micheli, G.B.; Padilha, A.; Scalon, V.L.; Numerical and experimental analysis of pesticide spray mixing in spray tanks. *Eng. Agric. Jaboticabal*. 2015, 35(6), 1065-1078.
12. Delele, M.A., 2009. Engineering design of spraying systems for horticultural applications using computational fluid dynamics. Universidad Católica de Leuven, Bélgica.