

2021

Actividades de carácter no económico

Desarrollo y optimización de producto

Programa: Fondos GVA

Breve descripción.

Modelos de caracterización de comportamiento en productos sometidos a la acción de fluidos complejos.

Acrónimo del proyecto: SIMUPROD 2

Tabla de Contenidos

1	Introducción	3
2	Datos básicos del proyecto.....	4
3	Objeto del proyecto.	5
4	Metodología de trabajo.	6
4.1	Selección de los problemas.	6
4.1.1	Tornillo de Arquímedes.	6
4.1.2	Boquilla de pulverización de esprayado.....	6
4.2	Diseño y planificación de ensayos.	7
4.3	Métodos de simulación y configuración de cálculo.	7
5	Actividades desarrolladas	11
5.1	Desarrollo de simulaciones.	11
5.1.1	Cálculo multifásico depósito.	11
5.1.2	Cálculo ventilador con difusor.....	13
5.1.3	Cálculo del tornillo de Arquímedes	16
5.1.4	Cálculo de boquilla de esprayado.	18
5.2	Evaluación de los datos de simulación.	19
5.2.1	Resultados de la simulaciones tornillo de Arquímedes.....	19
5.2.2	Resultados de la simulaciones boquilla de esprayado.	19
5.2.3	Comparativa entre modelos de cálculo.	20
5.3	Desarrollo bancos de ensayo.....	21
5.4	Captura y tratamiento de datos de ensayo	23
5.4.1	Resultados ensayos con el tornillo de Arquímedes.....	23
5.4.2	Resultados ensayos con boquilla de esprayado.	24
5.5	Comparación y correlación entre los resultados de simulación y los ensayos.....	27
5.5.1	Tornillo de Arquímedes	27
5.5.2	Boquilla esprayado.....	28
6	Conclusiones.....	31
7	Elementos innovadores.....	32

1 Introducción

Este proyecto está encuadrado en la línea estratégica de actuación que lleva a cabo AIDIMME en el campo del desarrollo de productos y sistemas (diseño, cálculo, análisis, simulación, nuevas funcionalidades) cuyas sublíneas de trabajo son la optimización funcional y topológica, el modelado digital de productos y procesos, y las soluciones avanzadas de diseño para productos tradicionales.

El proyecto SIMUPROD 2 plantea una investigación sobre realización de modelos de caracterización de comportamiento en productos sometidos a la acción de fluidos complejos, mediante CFD basado en modelos SPH. También se abordará el estudio de aerodinámica externa mediante metodologías CFD basadas en Lattice Boltzman, y la influencia del uso de GPUs (Graphics Processing Unit) en el análisis y correlación física de sistemas CFD complejos con necesidades de cálculo de alto rendimiento.

Se especifican las características del banco de pruebas piloto desarrollado para el estudio de correlación de datos analíticos.

En el presente documento se recopilan las principales tareas realizadas durante la ejecución del proyecto SIMUPROD 2, con el objetivo de resumir los principales resultados obtenidos durante el año 2021 y difundir sus resultados.

2 Datos básicos del proyecto

PROYECTO: SIMUPROD 2 (Modelos de caracterización de comportamiento en productos sometidos a la acción de fluidos complejos.)

PROGRAMA EN EL QUE SE DESARROLLA:

Líneas de I+D independiente del Plan de Actividades de carácter no económico de AIDIMME 2021

LÍNEA ESTRATÉGICA:

DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE PRODUCTO. Desarrollo de productos y sistemas (diseño, cálculo, análisis, simulación, nuevas funcionalidades).

SUBLÍNEAS DE TRABAJO:

DOP1 Optimización funcional y topológica

DOP2 Modelado digital de productos y procesos

DOP3 Soluciones avanzadas de diseño para productos tradicionales

ACTIVIDADES DE I+D INDEPENDIENTES:

IVACE FONDOS FEDER (Abril 2020-Julio2021)	GYROSCOPE	Desarrollo de prototipos basados en principios giroscópicos para disminuir el riesgo de vuelco en escaleras y elementos de mobiliario con baja estabilidad.
IVACE FONDOS FEDER (Mayo 2020-Julio2021)	EASYPRONE	Desarrollo de dispositivos de ayuda a la posición prona.
CONSELLERÍA INNOVACIÓN UNI CI y SD 2021	PRESOST	Desarrollo de elementos constructivos prefabricados y de alta sostenibilidad.
IVACE FONDOS FEDER 2021-2022	SENSOESTANT	Desarrollo de prototipos basados en sensores para aumentar la seguridad en el uso de mobiliario con cajones, estanterías y elementos colgados en paredes.
FONDOS GVA 2021	SIMUPROD 2	Modelos de caracterización de comportamiento en productos sometidos a la acción de fluidos complejos.

3 Objeto del proyecto.

El uso de la simulación multifísica en el campo de la dinámica de fluidos es una metodología que ya tiene un gran desarrollo debido al incremento de la potencia del hardware de cálculo y su cada vez mejor relación prestaciones/precio. Esto ha permitido la mejora de las tecnologías de software implicadas en estos procesos, permitiendo la utilización de métodos que requieren el uso de elevados recursos de computación, métodos como el SPH y LBM son cada vez más utilizados y accesibles tanto en el ámbito de investigación como en el empresarial.

Por ello es de interés comprobar las prestaciones y capacidades en situaciones que requieren elevadas potencias de cálculo, como en flujos que tienen altas velocidades o cambios de velocidad y caudal variables, que pueden generar que el proceso de cálculo sea inestable.

El objeto del proyecto es investigar la generación de modelos de caracterización de comportamiento en productos sometidos a la acción de fluidos complejos, mediante CFD basado en smooth particle harness (SPH) para aplicaciones con altas velocidades y sistemas multifase. También se abordará el estudio de aerodinámica externa mediante metodologías CFD basadas en Lattice Boltzman (LBM), y la influencia del uso de GPUs (Graphics Processing Unit) en el análisis y correlación física de sistemas CFD complejos con necesidades de cálculo de alto rendimiento.

Generalmente, este tipo de análisis sobre productos sometidos a la acción de fluidos se utiliza en sectores tecnológicos de vanguardia como aeronáutico, aeroespacial, naval, ferroviario y automovilístico pero no está tan extendido al resto de sectores industriales donde se utilizan métodos simplificados que no estudian el comportamiento del fluido. Igualmente no es habitual la implementación de pruebas de laboratorio ni los ensayos sobre elementos con este tipo de necesidades salvo en el campo de la investigación o sectores muy específicos.

Por tanto, se plantea la realización de estudios sobre los elementos sometidos a la acción de fluidos en el banco de pruebas instrumentado y la realización de simulaciones numéricas CFD con distintas metodologías para tratar de obtener un modelo que se ajuste mejor a las pruebas realizadas evaluando las ventajas y desventajas entre los distintos métodos, con el fin de mejorar la comprensión de la predicción del flujo con geometrías complejas y con flujos multifásicos en problemas avanzados de dinámica de fluidos.

4 Metodología de trabajo.

El proyecto parte de la consideración de una serie de problemas en productos sometidos a la acción de fluidos complejos y la comparación entre las simulaciones realizadas y la caracterización de dichos problemas en banco de ensayo.

Tanto la selección de problemas, como las condiciones de ensayo y el método y configuración de cálculo se definieron inicialmente.

4.1 Selección de los problemas.

Se ha realizado una búsqueda de problemas en elementos cuyo funcionamiento o diseño está ligado a las características del flujo, al tiempo que son representativos de sistemas presentes en los sectores manufactureros. Se han seleccionado aquellos elementos de interés que, además, presentan una relativamente asequible caracterización mediante ensayo.

4.1.1 Tornillo de Arquímedes.

El tornillo de Arquímedes es una geometría relativamente compleja pero sobradamente conocida cuyo funcionamiento depende totalmente del entorno fluido. Se ha seleccionado por su interés en el estudio de elementos de bombeo (lodos en depuradoras, graneles, fluidos viscosos, etc.) y generación de energía. Aunque las geometrías de elementos de este tipo pueden ser muy variadas la tipología del cálculo con un elemento móvil en un medio fluido es similar. Igualmente las variaciones de las condiciones de funcionamiento se pueden controlar con el caudal al que se ve sometido.



Ilustración 1. Prototipo de ensayo de tornillo de Arquímedes.

4.1.2 Boquilla de pulverización de esprayado.

Las boquillas de pulverización son un elemento interesante para el estudio de fluidos complejos puesto que se trata de un problema multifásico. Se trata de un elemento en el que la geometría está completamente ligada al comportamiento del flujo. Además, las presiones de trabajo a las que funciona son muy elevadas y los orificios de tamaño muy reducido, lo cual complica la resolución de las simulaciones. Al igual que en el caso del tornillo, la variación de los caudales de producto y aire a presión permiten variar el funcionamiento y se pueden realizar distintos ensayos para comprobar su influencia.

Los fenómenos y geometrías vinculados a las boquillas de pulverización son asimilables a procesos y productos encontrados en la actividad de fabricación de muebles, acabado de superficies, dispersión de agentes bactericidas y virucidas, procesos y productos fitosanitarios, etc.



Ilustración 2. Boquillas de pulverización para ensayo.

4.2 Diseño y planificación de ensayos.

Una vez considerados los elementos a ensayar y las opciones para replicar el flujo del medio de ensayo, se ha decidido desarrollar:

- un banco para ensayos en agua para el tornillo de Arquímedes
- un banco para ensayos de viento para la boquilla de pulverización.

Se ha definido el plan de ensayos para establecer los parámetros de control de las condiciones del fluido y de las variables a medir (células de carga, tubo de pitot, caudalímetro, sensores de presión, etc). En el plan de ensayos se han generado las tablas donde se especifica el número de pruebas de los elementos junto con las condiciones de realización de los ensayos y donde se van recogiendo los valores medidos durante la realización. Esto ha ayudado también a priorizar la secuencia de las pruebas para optimizar el ajuste de las condiciones y facilitar la realización de los ensayos. Por ejemplo, en el caso de la boquilla de pulverización se ha priorizado el ajuste de la presión de la boquilla y se han realizado todas las pruebas pertinentes con esa presión variando las otras demás condiciones como regulador de producto o distancia de la muestra.

4.3 Métodos de simulación y configuración de cálculo.

La utilización de métodos que requieren el uso de elevados recursos de computación, como el SPH y LBM son cada vez más utilizados y accesibles tanto en el ámbito de investigación como en el empresarial. Por ello es de interés comprobar las prestaciones y capacidades en situaciones que requieren elevadas potencias de cálculo, como en flujos que tienen altas velocidades o cambios de velocidad y caudal variables, que pueden generar que el proceso de cálculo sea inestable.

Con este propósito se han realizado diversas simulaciones de fluidos utilizando software de análisis CFD basado en SPH y LBM, el uso de estas potentes herramientas de simulación permite la modificación de las variables de contorno como viscosidades y presiones para ajustar los resultados de la simulación.

Acusolve a diferencia de otros software de cálculo fluido dinámico que utilizan el método de volumen finito utiliza el método de elementos finitos que en general es más robusto y más preciso con mallados más bastos a costa de necesitar un tratamiento especial para mantener la conservación de masa y limitaciones a altas velocidades. En el caso de NanofluidX se utiliza el método de hidrodinámica de partículas suavizadas SPH. Este método tiene unas prestaciones mayores permitiendo el cálculo de flujos complejos con el inconveniente de que necesita de un hardware más potente.

Hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH)

La idea del método SPH se basa en reconstruir un campo continuo como una nube de partículas discretas que interactúan entre ellas, y que se utilizan para simular el flujo de fluido, el problema es tridimensional y la solución debe ser independiente del tiempo. Se plantea como un problema de interpolación 3D, interpolando datos dispersos de tal manera que podemos reconstruir un campo continuo en cualquier punto del espacio y el tiempo, se calcula la influencia de las partículas interactuando, partículas vecinas con la partícula considerada propietaria (partícula donde se reconstruye el campo), cada partícula incluye propiedades de masa, velocidad, etc, repitiéndose la ecuación dinámica de partículas en todo el dominio.

Para resolver el movimiento se utiliza la teoría de Newton, básicamente si se conoce la fuerza sobre cada partícula se calcula la aceleración de la misma, calculándose la trayectoria de cada una y simulando el efecto dinámico del conjunto, sobre cada partícula actuarán tres fuerzas, Fuerzas externas como la gravedad, Fuerzas generadas por diferencias de presión en el entorno fluido y fuerzas viscosas causadas por la diferencia de velocidad entre las partículas.

La fórmula básica que describe la aceleración incluyendo estos factores sería la siguiente:

$$\vec{a} = \vec{g} - \frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu \nabla^2 \vec{u}}{\rho}$$

Esta fórmula se resuelve mediante el uso de una función de Kernel suave, derivándose la función relacionada con velocidades, presiones y densidades en cada punto para después derivar la aceleración y como resultado obtener la respuesta del dominio fluido.

Método de Lattice Boltzman (LBM)

Este método tiene una concepción similar al SPH dado que se utiliza también una nube de partículas discretas y el cálculo se realiza resolviendo las interacciones microscópicas en el seno del fluido. A diferencia del LBM que plantea la resolución del movimiento de la partícula a partir de las fuerzas de interacción entre ellas, en el SPH se plantea la resolución de la ecuación cinemática Boltzman de forma reducida para simular el comportamiento dinámico del fluido sin resolver directamente la ecuación de continuidad de mecánica de fluidos.

La fórmula de la ecuación Lattice Boltzman (Wolf-Galdrow, 2000; Succi, 2001) se muestra a continuación:

$$f_i(\vec{r} + \vec{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\vec{r}; t) + \Omega_{ij}(f_j^{eq}(\vec{r}; t) - f_j(\vec{r}; t))$$

Donde f representa la probabilidad de que la partícula se encuentre en la posición r en el tiempo t cuya velocidad es c .

En la práctica, la aplicación de este método por software de simulación permite resolver problemas CFD con turbulencias de pequeña escala, problemas de transferencia de calor con convección o problemas de multifísicos que otros métodos no pueden abordar. Además tiene como ventaja que no se necesita un preproceso de mallado, la generación de las partículas es casi automática y los problemas que surgen en esta fase son menores que en el caso del mallado convencional. Como contrapartida, la resolución necesita de un hardware de altas prestaciones con tarjetas gráficas con unidades de procesador GPU ya que el proceso de cálculo consume muchos recursos.

Aceleración gráfica por GPU's en simulación multifísica de fluidos.

El software de NanofluidX utilizado emplea un modelo de lattice Boltzmann para resolver las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes, realizándose simulaciones con diferentes tamaños de malla, y realizando variaciones en número de Reynolds, estas simulaciones se comparan con la utilización de la CPU para el cálculo, se tratará de verificar la estabilidad y rendimiento del cálculo utilizando este método.

El método utiliza una gran cantidad de información durante el análisis, lo cual ralentiza mucho la CPU durante su aplicación, por ello el uso de la memoria compartida disponible en las tarjetas gráficas (GPU) y que permite su utilización como apoyo durante el proceso de ejecución del cálculo puede en muchos casos mejorar de forma importante la eficiencia del proceso, compensando el coste adicional de este tipo de hardware para la simulación de problemas de fluidos de forma más rápida.

La tecnología de determinadas tarjetas gráficas está específicamente diseñada para dar apoyo en la resolución de grandes problemas de computación utilizando las capacidades de proceso de las GPU, funcionando como apoyo de la CPU principal, ambas mantienen su propia memoria y los datos van pasando entre ellas.

En el software se utiliza un esquema BGK en su variante d3q19 dentro del modelo de Lattice Boltzmann para aproximar de forma eficiente las ecuaciones de Navier Stokes, por presentar un buen balance entre la memoria usada y el grado de precisión obtenido. El software de análisis permite gestionar los accesos a la memoria principal de la placa y a los otros tipos de memoria disponibles como memoria compartida y registros.

La placa gráfica utilizada es una Nvidia Quadro M 2000, con las siguientes características:

Especificaciones Nvidia Quadro M 2000	
GPU Memory	4 GB GDDR5
Memory Interface	128-bit
Memory Bandwidth Up to 106 GB/s	Up to 106 GB/s
NVIDIA CUDA Cores	768
System Interface	PCI Express 3.0 x16
Max Power Consumption	75 W
Thermal Solution	Active
Form Factor	4.376" H x 6.6 L Single Slot
Display Connectors	DP 1.2 (4)
Max Simultaneous Displays	4 DP 1.2 Multi-Stream
Max DP 1.2 Resolution	4096 x 2160 @ 60Hz
Graphics APIs	DirectX 122 OpenGL 4.53 Shader Model 5.0 Vulkan 1.03
Compute APIs	CUDA, DirectCompute, OpenCL

La CPU utilizada tiene un procesador de doble núcleo AMD Athlon 64 X2 Dual Core de 2,41 GHz y 4 Gb. de memoria RAM.

5 Actividades desarrolladas

Ya introducidas en el apartado anterior, las acciones realizadas durante el desarrollo del proyecto se pueden resumir en:

- Estudio y selección de los elementos y las condiciones de ensayo.
- Diseño y planificación de ensayos.
- Desarrollo de cálculos CFD y ajuste de los modelos de cálculo realizados con Acusolve y NanoFluid.
- Registro y evaluación de los datos de la simulación. (tiempo de preparación, tiempos de ejecución, registro de errores, etc.)
- Captura y tratamiento de los datos de ensayo. (caudal, velocidad del fluido, presión, sensor de par/fuerza, etc.)
- Comparación y correlación entre los resultados de la simulación y del ensayo.

5.1 Desarrollo de simulaciones.

Se ha preparado y puesto a punto el entorno de trabajo de Linux que necesita el software de simulación CFD para la utilización de GPU's (Graphics Processing Unit).

Se han elaborado distintos modelos de simulación de los elementos sometidos a la acción de fluidos utilizando el entorno del software de Altair Hypermesh y empleando los motores de cálculo de Acusolve y NanoFluid, y se lanzaron las primeras simulaciones.

Alguno de los modelos iniciales como el cálculo multifásico de un depósito se ha extraído de los ejemplos existentes en el propio software y otros como el ventilador con difusor de modelos de interés seleccionados con el objeto de comprobar los resultados obtenidos con las herramientas de simulación CFD objeto del proyecto.

5.1.1 Cálculo multifásico depósito.

En el caso de cálculos multifásicos hay ejemplos típicos: el llenado de un depósito es especialmente interesante porque combina el efecto de multifase entre agua y aire junto con el hecho de ser un problema transitorio. Es importante la realización de este cálculo mediante los distintos métodos que se estudian para verificar que los modelos se han preparado correctamente y comprobar que los resultados coincidan con los resultados ya conocidos.

El funcionamiento de la simulación se inicia en el llenado desde el estado de reposo del nivel de líquido en el tanque y posteriormente se generan las turbulencias debidas al chorro de llenado.

- Secuencia de llenado. Distribución de fase líquido (rojo)-gas (azul)

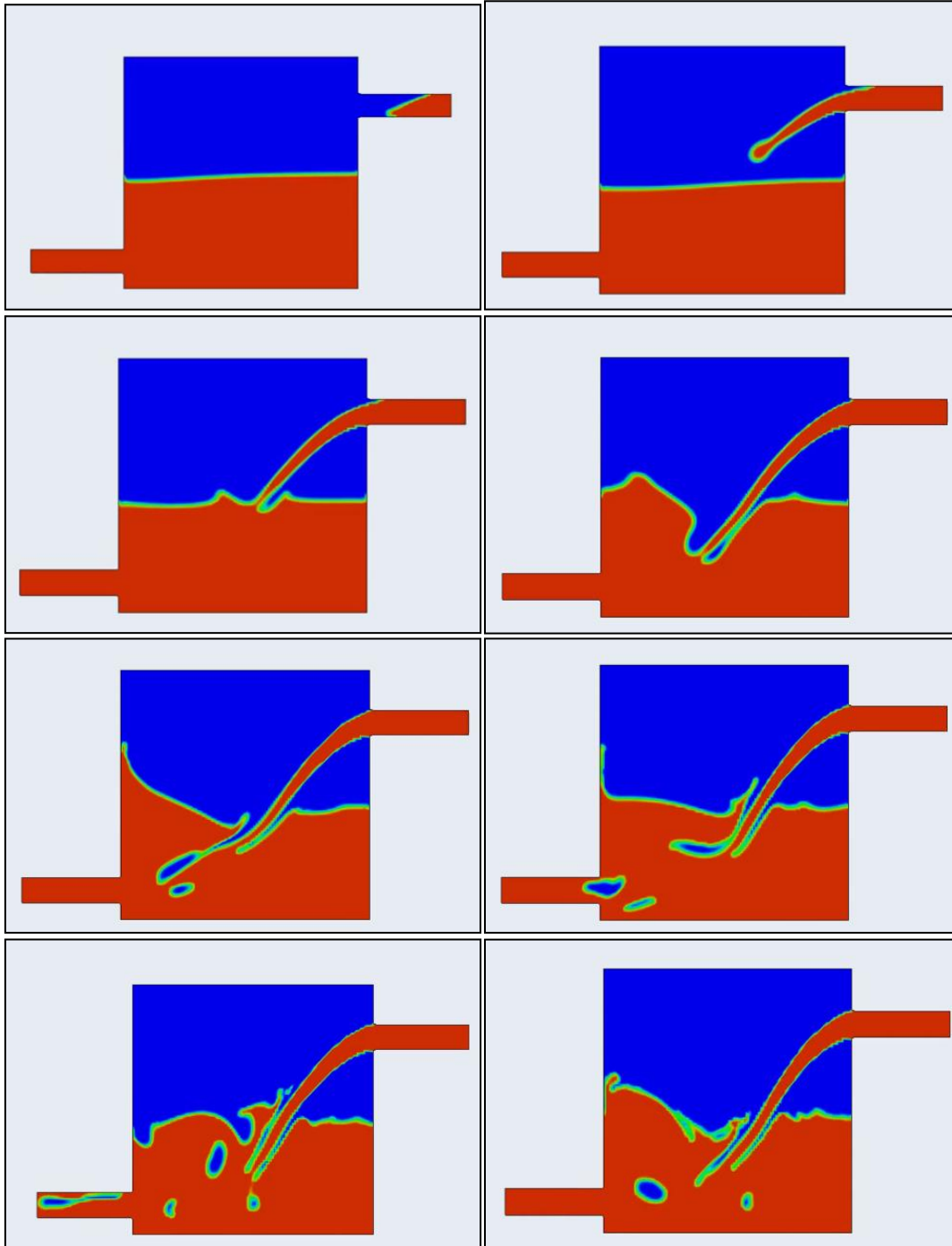


Ilustración 3. Secuencia de llenado 5-8. Distribución de fases.

Se puede visualizar también el perfil de velocidades donde se observa mejor las turbulencias generadas por el chorro:

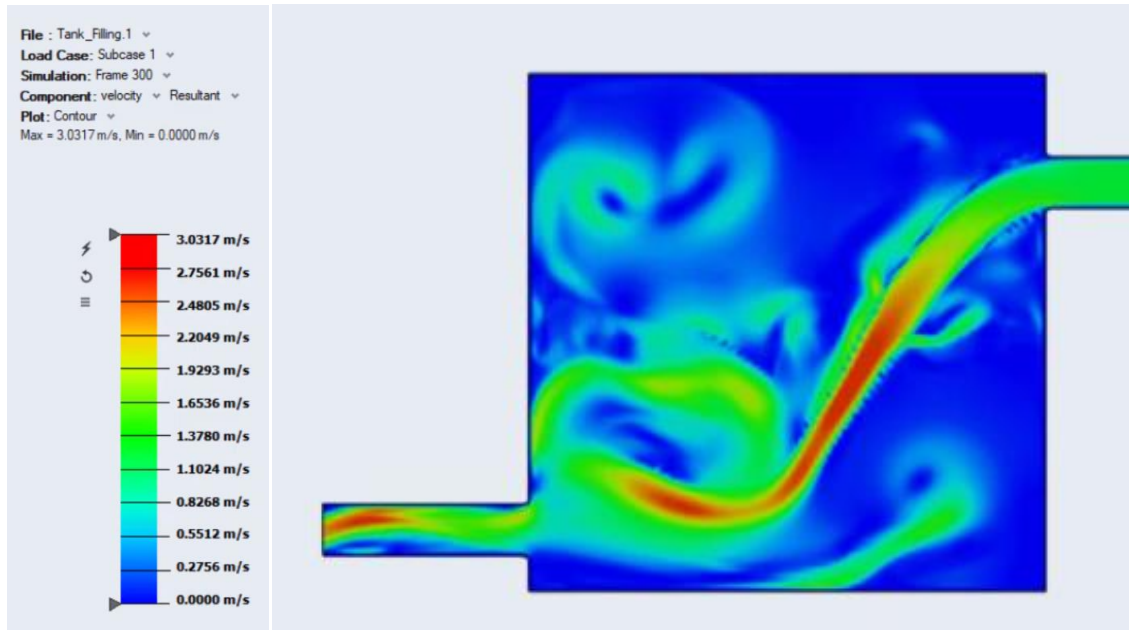


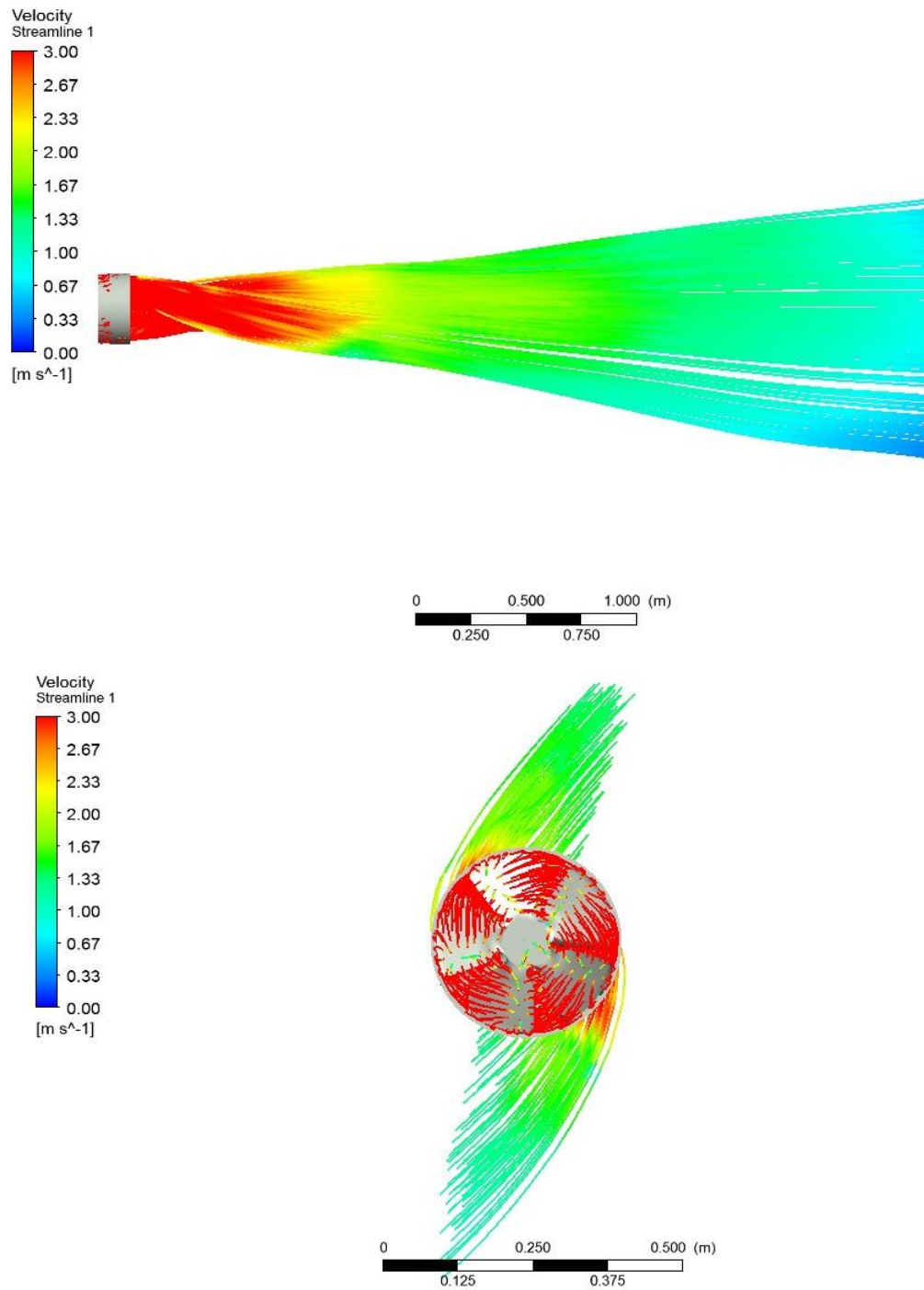
Ilustración 4. Distribución de velocidades simulación llenado de un tanque.

Tras las correcciones pertinentes debidas a errores en la elaboración del modelo, se ha conseguido que los valores obtenidos de distribución de velocidades y presiones, así como valores medios del caudal en la salida, coincidan con los valores de referencia. Por tanto, se han validado ambos métodos de cálculo utilizando este modelo de llenado de un tanque.

5.1.2 Cálculo ventilador con difusor

Un cálculo razonablemente típico es el de un ventilador con difusor. Se han realizado cálculos variando la geometría del difusor para controlar la apertura del abanico. En el primer caso el difusor focaliza el flujo del ventilador aumentando el alcance y velocidad del chorro en la zona central. En el segundo caso el abanico está mucho más abierto y el flujo abarca una zona más amplia a costa de disminuir el alcance y la velocidad en la zona central. Los resultados de este cálculo son concisos por Aidimme con anterioridad de otros estudios realizados y sirven de referencia para comprobar que la puesta en funcionamiento del entorno de cálculo es la correcta, contrastar resultados y comparar tiempos de ejecución.

- **Simulación difusor 1. Líneas de corriente con la distribución de velocidades.**



Il·lustració 5. Línies de corrent amb distribució de velocitats difusor 1.

- Simulación difusor 2. Líneas de corriente con la distribución de velocidades.

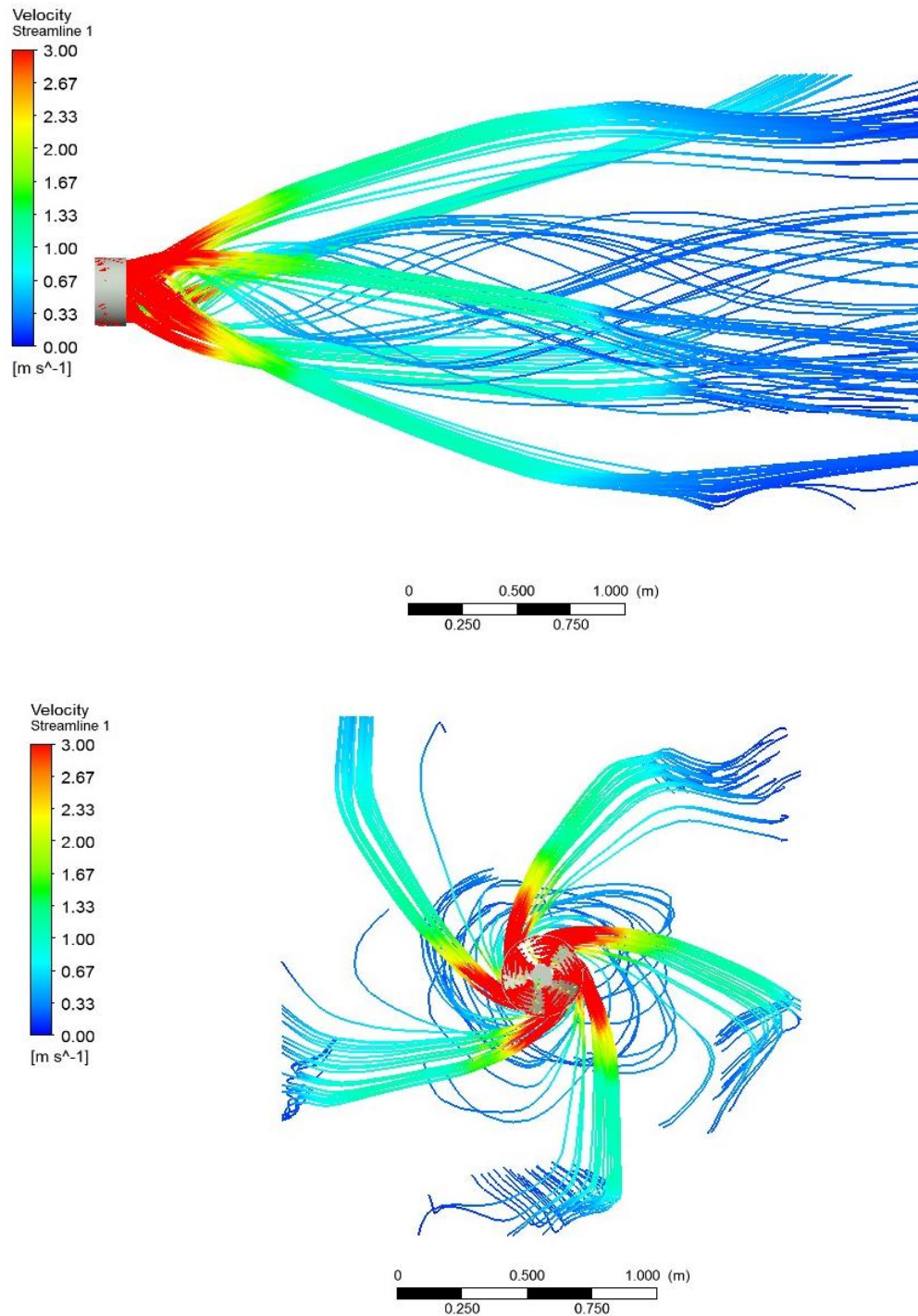


Ilustración 6. Líneas de corriente con distribución de velocidades difusor 2.

5.1.3 Cálculo del tornillo de Arquímedes

Se ha realizado el modelo de cálculo del tornillo de Arquímedes y se han obtenido resultados para distintos caudales para replicar los distintos puntos de funcionamiento ensayados mediante el banco de pruebas.

Se ha obtenido tanto la distribución de velocidades, líneas de corriente y distribución de presiones en las palas del tornillo

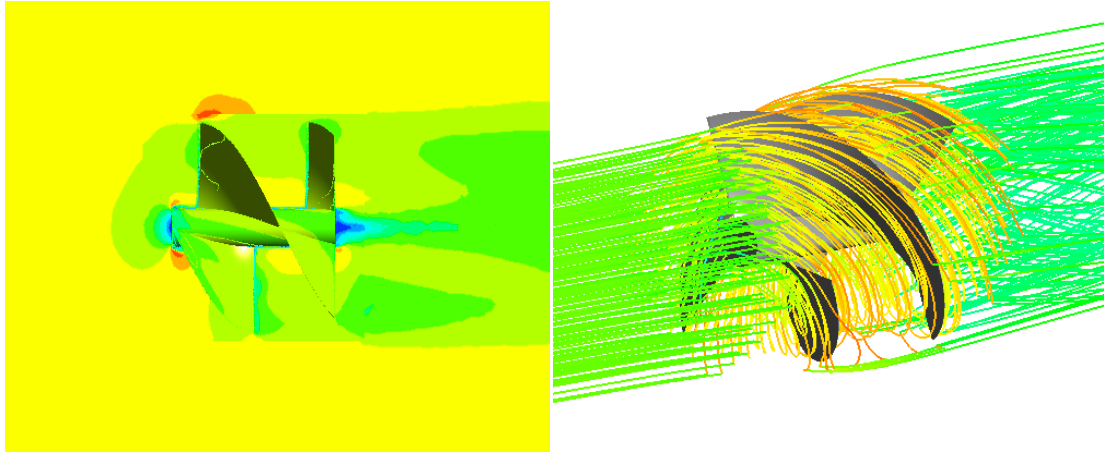


Ilustración 7. Distribución de velocidades (izquierda) y líneas de corriente (derecha)..

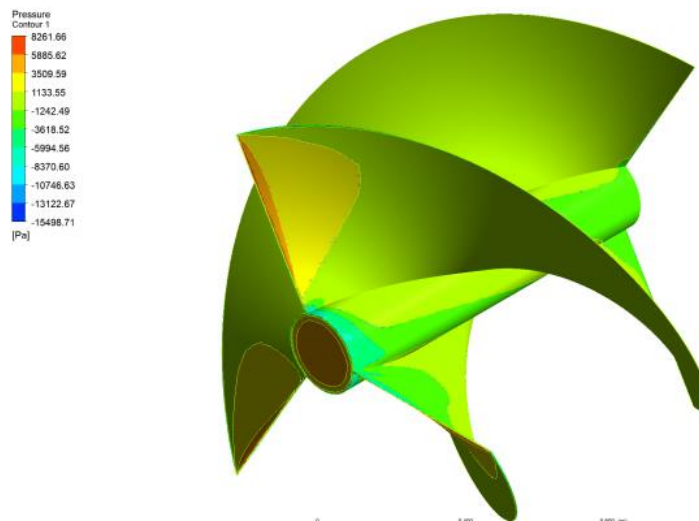


Ilustración 8. Distribución de presiones en las palas debidas a la presión del fluido.

A continuación se muestra dos ejemplos del cálculo del tornillo con distintas velocidades de giro:

- **Tornillo a 10 rpm**



Ilustración 9. Líneas de corriente con distribución de velocidad del tornillo a 10 rpm.

- **Tornillo a 50 rpm**

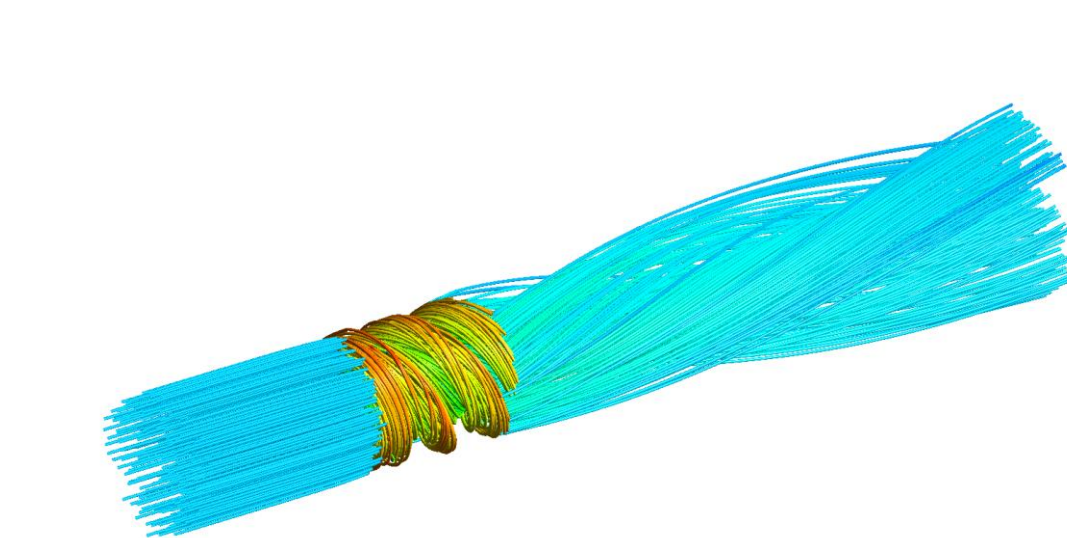


Ilustración 10. Líneas de corriente con distribución de velocidad del tornillo a 50 rpm

Las líneas de corriente siguen trayectorias similares y como cabe esperar las velocidades del fluido que se generan en el entorno del tornillo son mucho más elevadas. Comparando los resultados, cuando el giro del tornillo es a 50 rpm las velocidades son mayores que a 10 rpm y la estela tras el tornillo parece más compacta con lo cual la turbulencia en la salida es menor. Los resultados de caudal, presión y par en el eje de las simulaciones a distintas velocidades de giro se han registrado en las tablas análogas al plan de ensayo para compararlas posteriormente con los resultados de ensayo.

5.1.4 Cálculo de boquilla de esprayado.

Como ya se ha explicado en el apartado de selección de geometrías, el caso de la boquilla de esprayado es interesante porque combina la presencia de flujos de distintas fases con una geometría con entradas de dimensiones muy reducidas y con unas presiones de trabajo elevadas. Todos estos factores dificultan la resolución del problema ya que es necesario un mallado con tamaños de elementos muy pequeños en las entradas, aumentando con ello considerablemente el tiempo de cálculo y haciendo inviable el cálculo en algunos modelos de cálculo para las condiciones de funcionamiento que impliquen velocidades muy elevadas ($>0,3\text{Mach} \approx 100\text{m/s}$).

Se han obtenido las distribuciones de velocidades con el contorno del chorro de aplicación de producto:

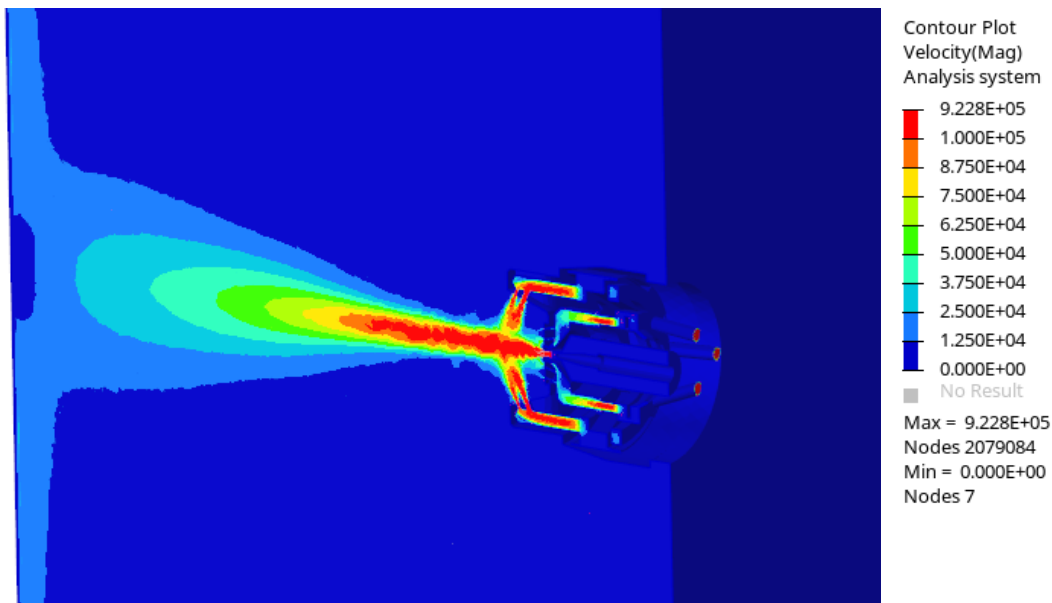


Ilustración 11. Distribución de velocidades boquilla de esprayado.

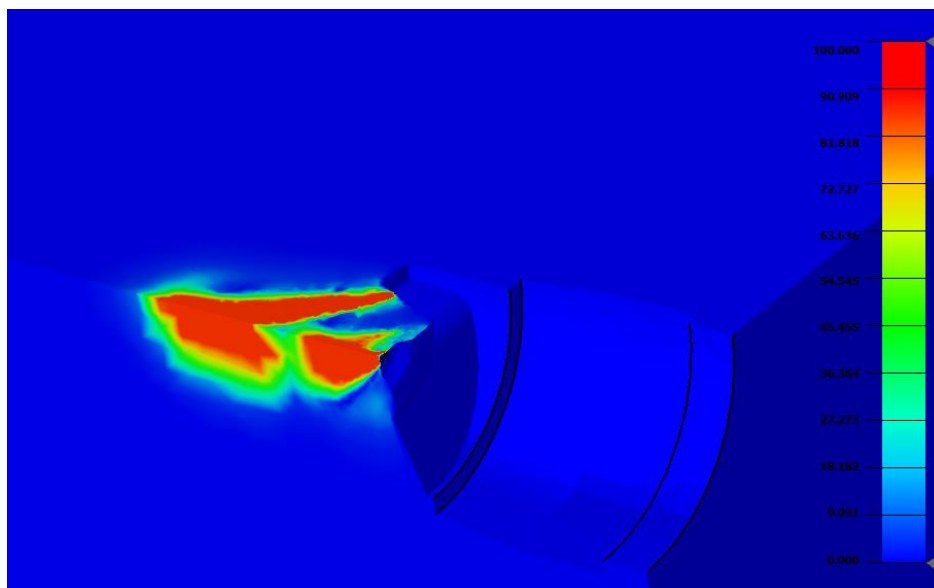


Ilustración 12. Distribución velocidades en modelo seccionado.

5.2 Evaluación de los datos de simulación.

Se ha preparado y puesto a punto el entorno de trabajo de Linux que necesita el software de simulación CFD para la utilización de GPU's (Graphics Processing Unit).

Se han registrado datos durante la resolución de los modelos con los distintos métodos con el objetivo de evaluar las limitaciones y precisión de los resultados así como el tiempo necesario para la resolución.

Con los datos obtenidos se ha estudiado la influencia en el análisis del software basado en el cálculo mediante partículas discretas con el uso de GPUs para la predicción del comportamiento de fluidos complejos y de las propiedades aerodinámicas, en simulaciones altamente transitorias.

5.2.1 Resultados de la simulaciones tornillo de Arquímedes.

La resolución de las simulaciones ha permitido obtener distintos resultados que en un primer análisis se han utilizado para ajustar los parámetros del cálculo referentes a las condiciones de contorno (presiones, velocidades,..) , características del fluido (densidad, viscosidad,..) y otras relacionadas con el método de cálculo.

Por otra parte se han obtenido los valores que se han empleado para la comparación con los resultados de ensayo. El caso del tornillo se ha hecho hincapié en los valores de velocidad de la turbina, el caudal y los pares resultantes en el tornillo para cada punto de ensayo.

CÁLCULO TORNILLO DE ARQUÍMEDES			
	Caudal	r.p.m Tornillo	Momento Par (Nm)
1	50	36	0,008
2	90	71	0,018
3	160	130	0,072
4	225	197	0,146
5	313	252	0,323

5.2.2 Resultados de la simulaciones boquilla de esprayado.

En el caso de la boquilla de esprayado, la obtención de resultados de la simulación comparables con los ensayos es más complicada porque no existen elementos donde medir la presión traducida a un par como en el caso del tornillo ni existe un volumen de control confinado donde medir caudales de salida, presiones u otro parámetro medible en el ensayo. Se ha decidido comparar los valores de caudal de entrada de aire y producto así como el perfil de pulverización comparado mediante las imágenes de los ensayos.

Inicialmente se han obtenido resultados de simulación para un punto de referencia y se han ajustado parámetros del fluido y del método de cálculo para corregir el comportamiento de la simulación. Posteriormente se han obtenido los resultados para los puntos de funcionamiento ensayados.

CÁLCULO BOQUILLA					
Producto		Aire		Abanico a 15cm de distancia	
Presión (bar)	Caudal (l/s)	Presión (bar)	Caudal (l/min)	Alto del abanico (mm)	Ancho de abanico
1	0,00130	1	98	10,02	2,93
1	0,00147	2	152	10,35	3,88
1	0,00167	3	181	12,63	4,43
1	0,00175	4	236	16,76	4,24

5.2.3 Comparativa entre modelos de cálculo.

Durante la realización de los modelos de cálculo se ha evaluado las capacidades y limitaciones de ambos métodos de cálculo.

En la siguiente tabla se muestra una comparación del rendimiento obtenido para los distintos casos estudiados del cálculo del tornillo de Arquímedes, ejecutados sobre hardware (CPU y GPU) y el incremento de velocidad alcanzado.

Modelo de cálculo	Número de partículas	Velocidad (RPM)	Time step (s)	Tiempo de cálculo (h)	Numero de CPUs/GPUs
Acusolve	1,34E+06	10	Variable	46	4
Acusolve	1,34E+06	50	Variable	73	4
NanofluidX	5,80E+06	10	1	33	1
NanofluidX	2,50E+06	50	0,3	65	1

En el caso de la boquilla de esprayado se han tenido dificultades con el software de Acusolve y no se alcanzaba una convergencia en la resolución que permita la comparación de los resultados ya que el error que se presentaba era demasiado elevado. Examinando el problema se ha llegado a la conclusión de que las altas velocidades alcanzadas en el modelo hacen inviable abordar el problema con este software.

5.3 Desarrollo bancos de ensayo

Se ha diseñado el modelo 3D de los bancos de ensayo de aire y agua junto con el utillaje, generando también la información necesaria para la fabricación de los componentes y seleccionado los elementos comerciales (ventilador, bomba, sensores, sistema de control, etc)

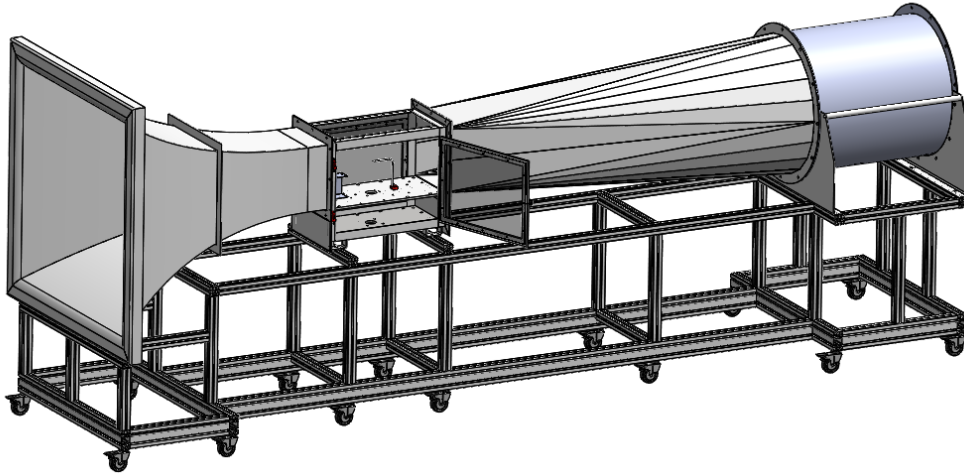


Ilustración 13. Modelo 3D banco de pruebas de viento.

Por ejemplo, la selección del ventilador se ha realizado en base a las características del flujo de aire en el volumen de trabajo. Se valoró un volumen útil de 300x300x600 mm y el flujo de aire con una velocidad máxima de 200 Km/h. Para el cálculo se tuvo en cuenta el caudal que aporta el ventilador de acuerdo a su diámetro y en base a ese caudal y al area de trabajo se obtuvo la velocidad de trabajo.

Medidas Area trabajo						Caudal Ventilador		Medidas Area entrada		
L (mm)	A (mm)	Area (m2)	Velocidad Km/h	Velocidad (m/s)	Nº Mach	m3/s	m3/h	Diam (m)	Area (m2)	Velocidad (m/s)
300	300	0,09	122,4	34	0,100	3,000	10800	0,5	0,1963	15,279
300	300	0,09	108	30	0,088	2,700	9720	0,5	0,1963	13,751
300	300	0,09	360	100	0,294	9,000	32400	0,5	0,1963	45,837
300	300	0,09	207	57,5	0,169	5,175	18630	0,63	0,3117	16,601

Ilustración 14. Extracto de la tabla para la selección del ventilador.

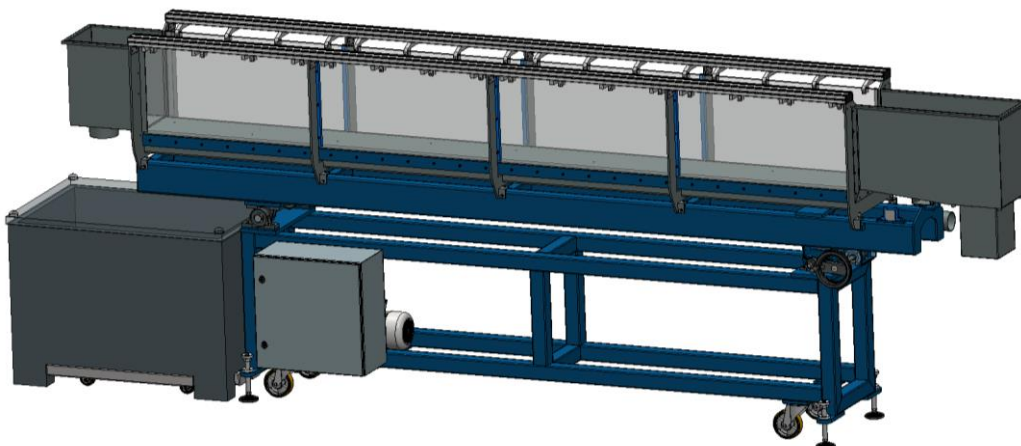


Ilustración 15. Modelo 3D banco de pruebas de agua.

Durante 2021 se han desarrollado los prototipos de banco de pruebas de laboratorio para realizar ensayos y correlacionar los resultados de la simulación. Así mismo se han fabricado prototipos de los elementos de estudio con geometrías complejas y se han realizado los ensayos reproduciendo las condiciones de la simulación.



Ilustración 16. Banco de ensayos de viento.

5.4 Captura y tratamiento de datos de ensayo

La adquisición de datos en los ensayos ha exigido seleccionar la instrumentación adecuada para la medida de las variables de comparación. También se ha realizado el montaje, ajuste y calibración de los propios aparatos de medida.

La ejecución de los ensayos sobre el tornillo y la boquilla de esprayado se han llevado a cabo recopilando los resultados que se muestran en los subapartados siguientes.

5.4.1 Resultados ensayos con el tornillo de Arquímedes.

Los ensayos sobre el tornillo de Arquímedes se han realizado modificando la velocidad de giro de la bomba que alimenta el conducto donde está montado el tornillo. Esta variación produce un cambio directo sobre el caudal al que se somete el tornillo.

La lectura de resultados se obtiene registrando el nivel de fluido que discurre por el conducto y el par generado en el eje del tornillo. El primer parámetro sirve para el ajuste de la simulación y el segundo para comparación de resultados.

ENSAYO TORNILLO DE ARQUÍMEDES					
	r.p.m Bomba	Caudal	r.p.m Tornillo	Altura	Par (Nm)
1	500	-	-	-	-
2	1000	90	66	45	0,0124
3	1500	160	120	55	0,0527
4	2000	225	182	55	0,1178
5	2850	313	230	55	0,2635

Para la interpretación de los resultados se representan mediante gráficas los valores de caudal, altura y par frente a las revoluciones del eje del tornillo:

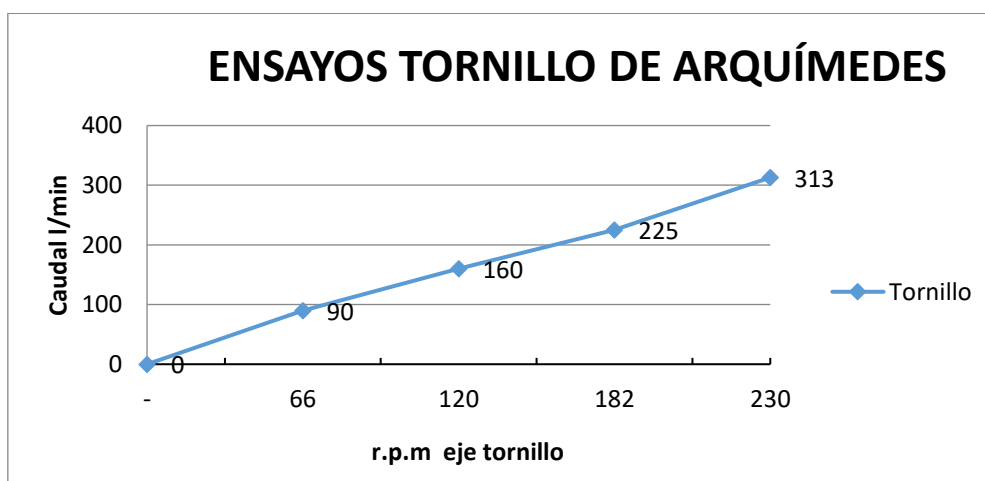


Ilustración 17. Gráfico caudal-velocidad del tornillo de Arquímedes.

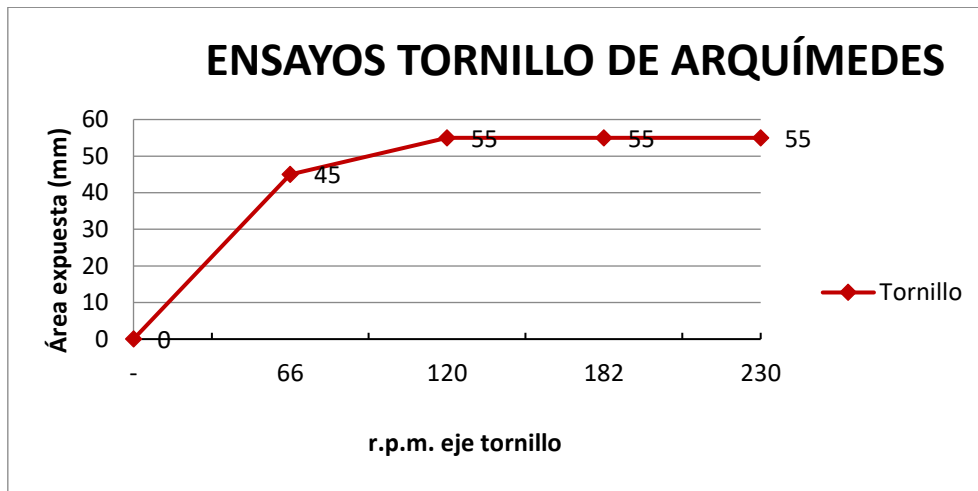


Ilustración 18. Gráfico área expuesta-velocidad del tornillo de Arquímedes.

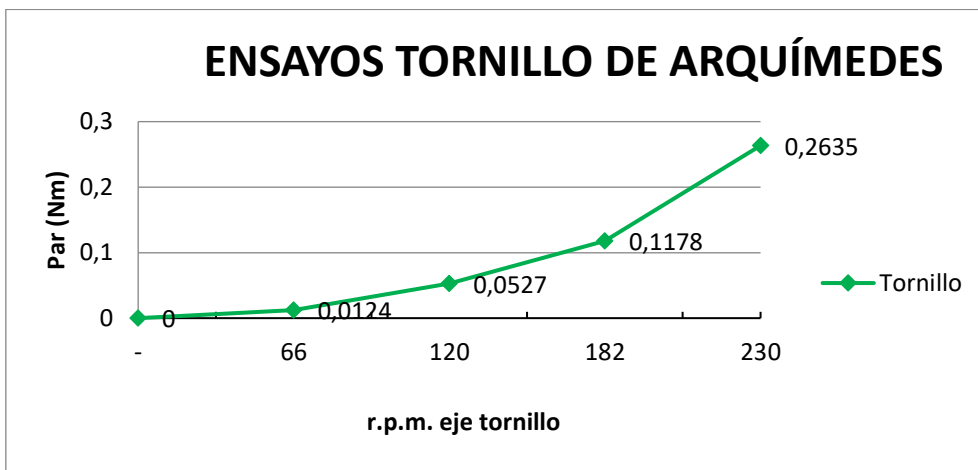


Ilustración 19. Gráfico par-velocidad del tornillo de Arquímedes.

5.4.2 Resultados ensayos con boquilla de esprayado.

Mediante los ensayos con la boquilla de esprayado se ha obtenido en primer lugar una medida de los caudales de aire a presión que entra en la boquilla. Este caudal sirve para obtener los valores de entrada en la simulación.

Tabla medida de caudal de aire			
Presión válvula abierta	Caudal de aire	Regulador de abanico	Regulador de producto
1,5	50	1	2
2	105	1	2
3	178	1	2
4	223	1	2
4,5	226	1	2
1,5	65	2	2
2	115	2	2
3	187	2	2
4	220	2	2
4,5	210	2	2
1,5	60	3	2
2	150	3	2
3	188	3	2
4	225	3	2
4,5	238	3	2
1,5	97	4	2
2	137	4	2
3	195	4	2
4	235	4	2
4,5	250	4	2

Posteriormente se han realizado pruebas de pulverización variando las presiones de aire y obteniendo medidas de gasto de producto e imágenes del perfil del abanico que genera la boquilla.

PRUEBAS BOQUILLA PROYECTO SIMUPROD 2													
Producto		Aire					Vueltas de regulador desde 0		Abanico a 15cm de distancia		Producto sobre probeta	Producto consumido	Transferencia de producto
Presión pintura	Nivel del deposito	Presión válvula cerrada	Presión válvula abierta	Temperatura de pulverización	Caudal de aire (l/min)	Regulador de abanico	Regulador de producto	Alto del abanico	Ancho de abanico	%			
1	Atmosférica	250-350	1,77	1,42	14,6	95	1	1	7,5	3	7,2	17,7	40,68
2	Atmosférica	"	"	"	"	"	2	1	8,5	3	7,1	16,4	43,29
3	Atmosférica	"	"	"	"	"	3	1	12	3	6,1	17	35,88
4	Atmosférica	"	"	"	"	"	4	1	13	2,7	6,2	19,8	31,31
5	Atmosférica	"	2,4	2	"	145	1	1	8	4	8,5	20	42,50
6	Atmosférica	"	"	"	"	"	2	1	10	4	8,1	19,1	42,41
7	Atmosférica	"	"	"	"	"	3	1	10	3,5	6,6	19,4	34,02
8	Atmosférica	"	"	"	"	"	4	1	12	4	5,7	21,7	26,27
9	Atmosférica	"	3,4	3	"	170	1	1	7,5	4-4,5	12,1	23,4	51,71
10	Atmosférica	"	"	"	"	"	2	1	11	4-4,5	8,6	21,7	39,63
11	Atmosférica	"	"	"	"	"	3	1	15	4,5-5	7,3	22,1	33,03
12	Atmosférica	"	"	"	"	"	4	1	17	4,5	-	-	-
13	Atmosférica	"	4,57	4	"	221	1	1	10	4	9,2	24,3	37,86
14	Atmosférica	"	"	"	"	"	2	1	17	4	5	22,9	21,83
15	Atmosférica	"	"	"	"	"	3	1	18	4,5	5,3	24,6	21,54
16	Atmosférica	"	"	"	"	"	4	1	22	4,5	5,9	23,7	24,89

Ilustración 20. Muestra de resultados obtenidos en los ensayos de la boquilla.



Ilustración 21. Ensayo boquilla de esprayado.

5.5 Comparación y correlación entre los resultados de simulación y los ensayos.

A lo largo del proyecto se han obtenido resultados de los ensayos que han posibilitado el ajuste de parámetros de los modelos de simulación así como la propia comparación y correlación entre ensayos y simulación.

5.5.1 Tornillo de Arquímedes

Los parámetros de estudio en el tornillo de Arquímedes son el caudal, la velocidad angular del tornillo y el par que provoca el agua sobre el eje del tornillo. En las siguientes ilustraciones se representa una muestra de la comparación del caudal y el par en función de la velocidad angular del eje del tornillo.

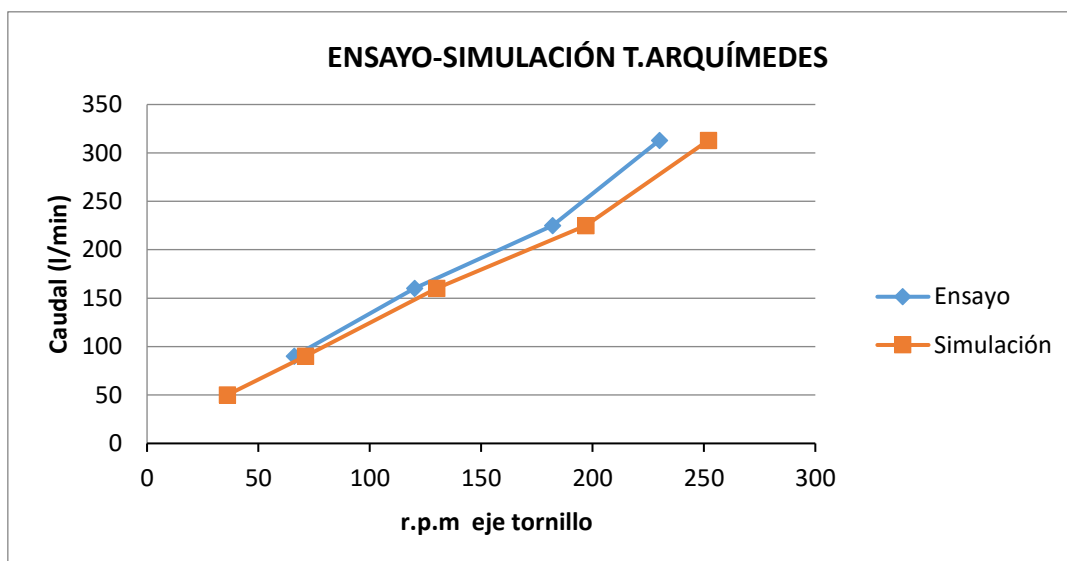


Ilustración 22. Comparativa de caudal en ensayo y simulación.

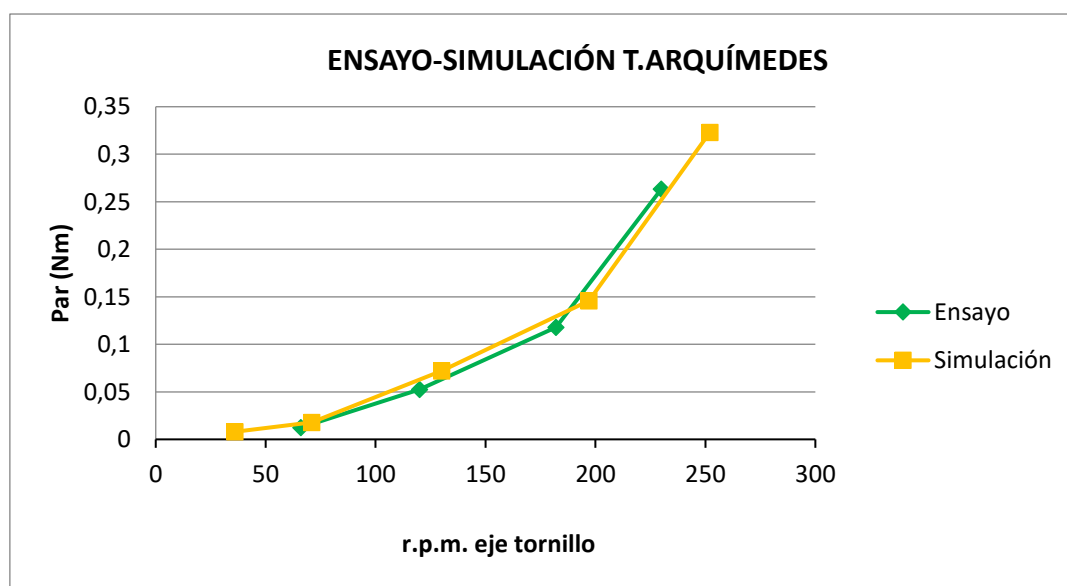


Ilustración 23. Comparativa de par en ensayo y simulación.

De la representación del caudal frente a velocidad angular del eje del tornillo se aprecia un aumento en la diferencia de resultados entre ensayo y simulación a medida que aumenta la velocidad angular. Probablemente esta diferencia se debe a que parte de las pérdidas del ensayo no se reflejan en la simulación y esto se magnifica a medida que se aumenta la velocidad.

La representación del par generado en el eje junto con la velocidad del eje del tornillo muestra una diferencia menos acusada que en gráfico anterior y no parece estar relacionada con la magnitud de la velocidad. Los valores del par de la simulación dibujan una tendencia que, al igual que en el caudal, está por encima de los valores del ensayo y puede deberse también al efecto de las pérdidas de energía más acusadas en el ensayo. Al considerar el par y no reflejar el caudal, la relación con la velocidad de giro no depende tanto de las características del caudal y más en la propia presión que ejerce el fluido en las palas del tornillo, de ahí que se obtenga una diferencia que no aumente con la velocidad de giro del eje.

5.5.2 Boquilla esprayado

La comparación de este caso de estudio se ha realizado utilizando las medidas de alto y ancho del abanico entre la simulación y los ensayos. También se ha podido comparar el perfil del abanico mediante la superposición de imágenes.

Los resultados recogidos en los apartados anteriores se han representado para el estudio comparativo como se muestra en las siguientes gráficas:

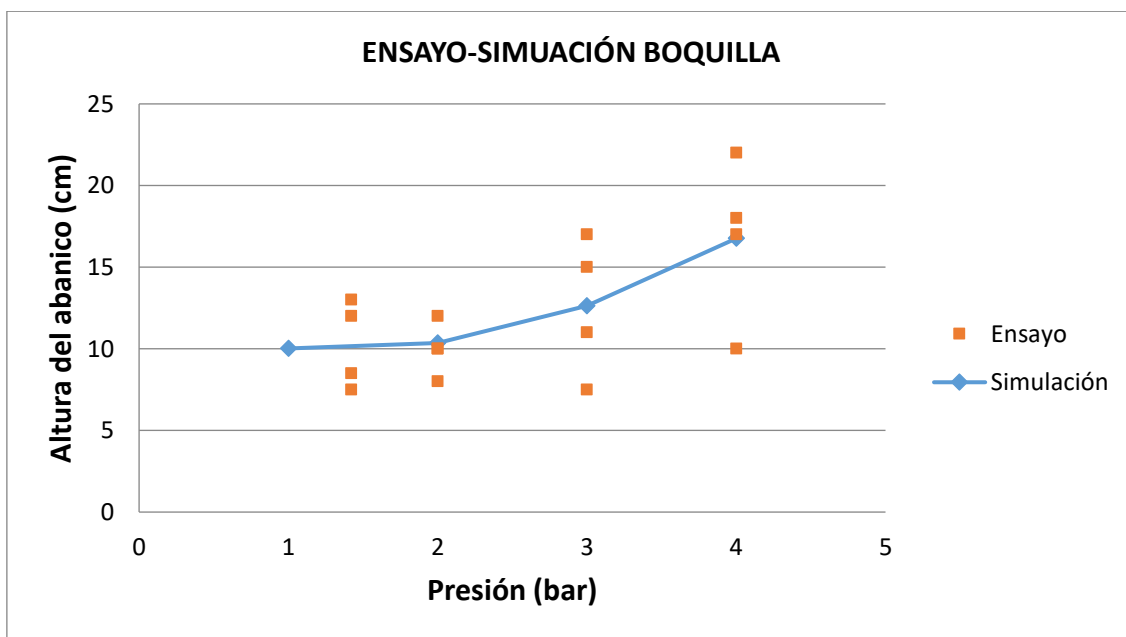


Ilustración 24. Comparativa altura de abanico en ensayo y simulación.

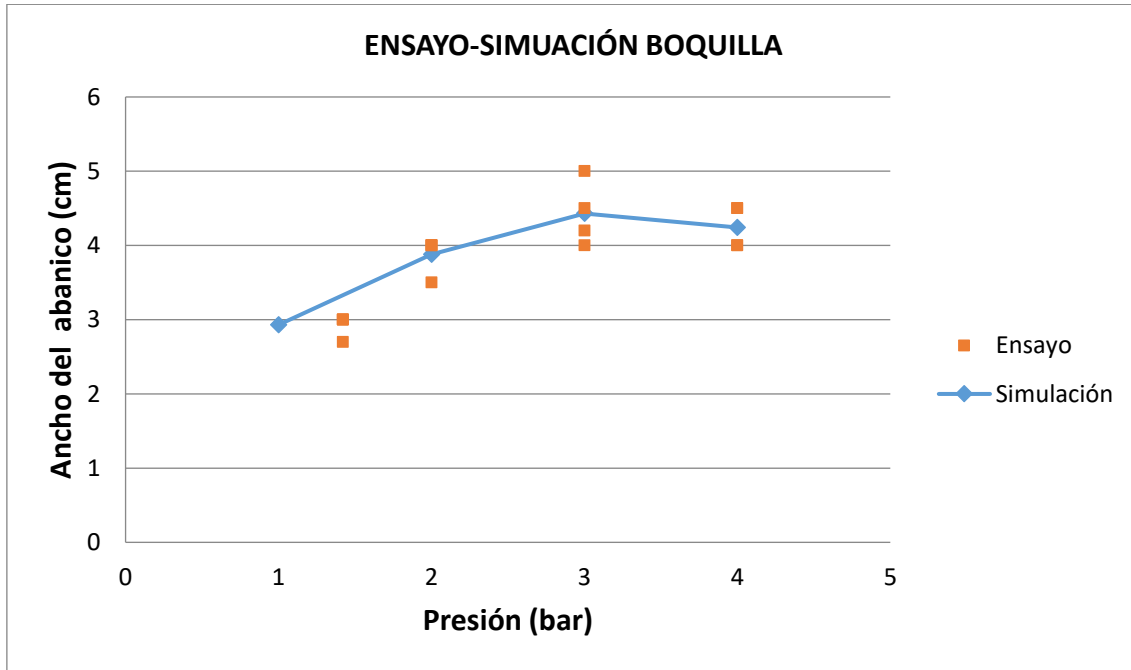


Ilustración 25. Comparativa ancho de abanico en ensayo y simulación

Respecto a los valores de altura de abanico se tiene una dispersión bastante grande en los resultados de ensayo pero se puede observar que los resultados de la simulación reflejan bien la tendencia. Se puede apreciar que existe un aumento de la dispersión de los valores a medida que se aumenta la presión de trabajo desde los 2 bar y que se muestra también una mayor dispersión si se disminuye.

El ancho de abanico tiene una dispersión menor ya que las diferencias entre las medidas de una misma presión son menores de 10 mm. Los valores de simulación siguen de manera bastante fiel la tendencia de las medidas en los ensayos a excepción de la presión por debajo de 2 bar.

Por tanto la simulación permite evaluar la tendencia del área del abanico en las diferentes presiones aunque sería interesante considerar una mejora en la evaluación del abanico en los ensayos que ayude disminuir la dispersión de los valores medidos.

Superposición de los abanicos:

Mediante la superposición de las imágenes de los abanicos se puede comprobar si el perfil del producto pulverizado en el ensayo se corresponde al perfil del cálculo mediante simulación. Este tipo de representación ayuda a comprobar si la simulación puede predecir el comportamiento de la boquilla en el reparto del producto así como la toma de medidas del abanico. También se puede evaluar la distribución velocidades en el abanico como en el caso que se muestra o bien la presión.

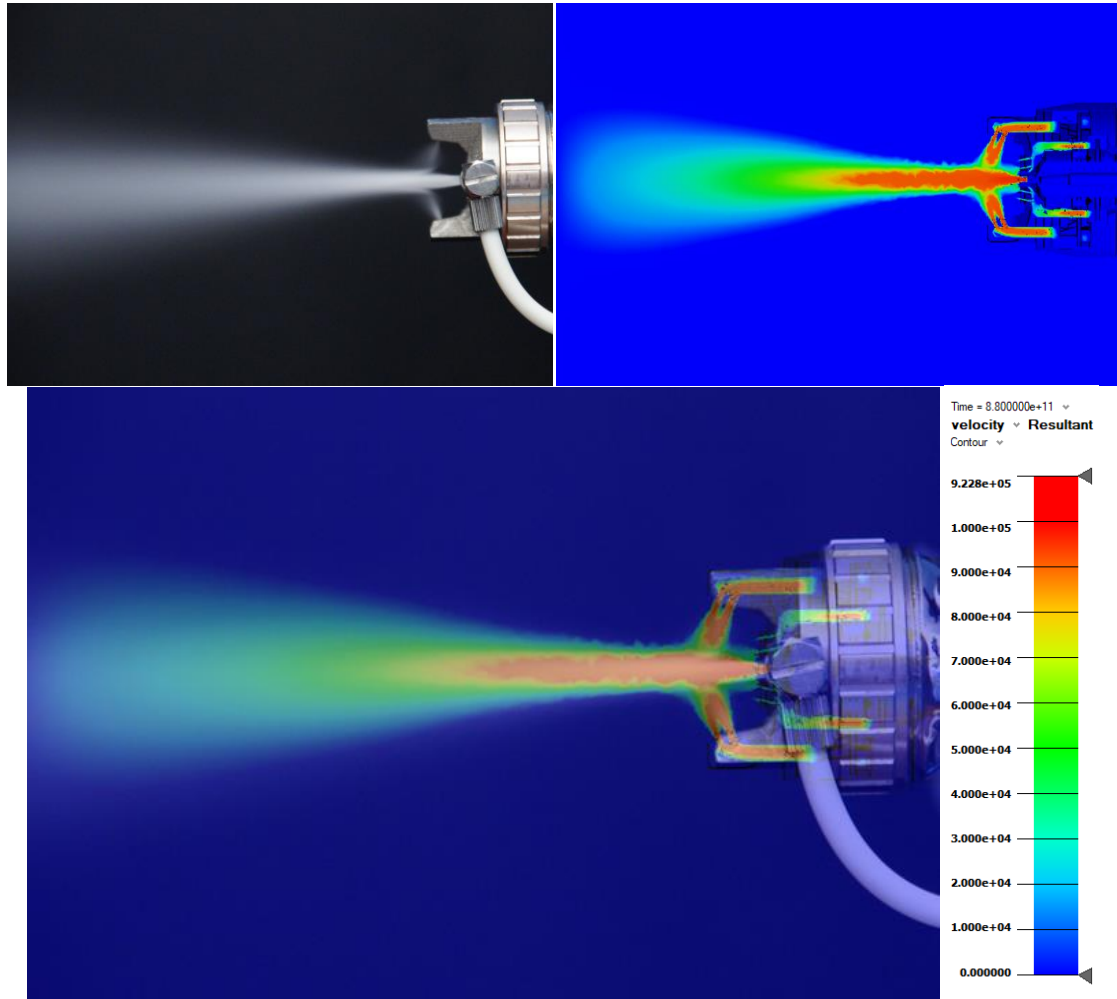


Ilustración 26. Superposición de imagen de ensayo y simulación.

6 Conclusiones

Las distintas simulaciones multifísicas realizadas sobre problemas de fluidodinámica computacional utilizando equipamiento hardware relativamente convencional utilizando una sola GPU y software especializado utilizando modelos de Lattice Boltzmann tridimensionales y el método de SPH, evidencian una notable mejora del rendimiento en problemas de fluidodinámica computacional compleja respecto al rendimiento equivalente para CPU. La utilización de memoria compartida permite alcanzar un aprovechamiento alto del ancho de banda de la placa, todo ello hace que se compensen los potenciales incrementos desde el punto de vista de coste del hardware utilizado, como inconveniente, el alto coste que todavía tiene el software específico asociado al uso de GPU hace que su uso sea mucho más adecuado en iteraciones para grandes modelos con física compleja. Las ejecuciones realizadas con el software avanzado tienen una moderada reducción del tiempo de cálculo como se refleja en el apartado de comparativa de modelos de cálculo de este documento. Así pues, el tiempo de cálculo no es un factor decisivo pero su principal ventaja es poder resolver problemas fluidodinámicos no abordables por software convencional ya bien sea por las condiciones del flujo o por el nivel de detalle que se requiere.

Uno de los inconvenientes encontrados es que el planteamiento de los ensayos, la puesta a punto de los equipos y la ejecución de los propios ensayos suponen un desafío que, pese a la mejora que supone la realización del proyecto, recomiendan la aplicación a problemas de flujos complejos y que requieren de un elevado nivel de detalle. Por ello habrá que encontrar el equilibrio de la solución estudiando específicamente cada caso en función de las necesidades planteadas, siendo más interesante en situaciones que requieren elevadas potencias de cálculo, como flujos que tienen altas velocidades o cambios de velocidad y caudal variables.

El desarrollo de un prototipo de banco de pruebas de laboratorio para el estudio de correlación de datos analíticos, mejora la comprensión de los fenómenos físicos implicados y facilita la obtención de modelos virtuales que sean capaces de aproximarse de forma más óptima al comportamiento real del sistema estudiado. Los datos obtenidos mediante el tornillo y la boquilla de pulverización, muestran que la metodología de ensayo y toma de datos es una herramienta útil para reproducir las condiciones del fluido y permiten validar el resultado de las simulaciones.

7 Elementos innovadores

La consecución del proyecto permite a AIDIMME adquirir unos conocimientos y experiencia en la realización de simulaciones de fluidos permitiendo el desarrollo de una metodología para evaluar el método de cálculo más adecuado. Así mismo, el proyecto ha contribuido al desarrollo del método experimental para este tipo de aplicaciones con la construcción del banco de pruebas de fluidos se puede evaluar la correlación de las simulaciones realizadas.

Las actividades realizadas dentro del proyecto han potenciado las capacidades técnicas de AIDIMME para resolver problemas en entornos fluidos que afecten a productos planteados por las industrias. De esta forma se posibilita el análisis en detalle del comportamiento de los productos para la obtención de diseños más eficientes y optimizados.

En definitiva, las metodologías y el conocimiento adquirido se ponen a disposición de las empresas de sectores relacionados con productos sometidos a la acción de fluidos como pueden ser bombas hidráulicas, generadores eólicos, ventiladores, sistemas de pulverización de líquidos, captadores solares, estructuras sometidas al viento, etc. Ofreciendo mejores herramientas y un mejor servicio en la resolución de problemáticas que puedan plantear, y así conseguir una mejora de sus productos, derivando en la reducción de los costes y plazos.

Entre las empresas colaboradoras e interesadas están: Valver Air Speed, Comet Ingeniería, Tam SL y Grupo Simetría.