

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/362313404>

Simulación numérica de flujos cavitantes en inyectores/atomizadores con asimetría en la dirección del flujo

Conference Paper · November 2020

CITATIONS

0

READS

41

2 authors:



[Flavio Moll](#)

National University of Technology

11 PUBLICATIONS 50 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Miguel Coussirat](#)

National University of Technology, Mendoza, Argentina

51 PUBLICATIONS 1,237 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Simulación numérica de flujos cavitantes en inyectores/atomizadores con asimetría en la dirección del flujo

Miguel G. Coussirat¹; Flavio Moll²;

Resumen: El flujo cavitante está relacionado con flujos turbulentos y multifásicos con transferencia de masa entre el líquido y su fase gaseosa. La cavitación en los inyectores/atomizadores de presión afecta fuertemente el comportamiento del chorro de líquido/spray en su salida. El tipo de atomización inducida por cavitación permite desarrollar dispositivos más eficientes si este estado de cavitación está bien controlado. Los experimentos muestran que se alcanza una mejora en la calidad de la pulverización cuando hay un estado de cavitación completamente desarrollado en la boquilla. La cavitación desarrollada formada en la boquilla muestra tanto una forma compleja como un comportamiento no estacionario debido al complejo patrón de flujo asociado. Este trabajo trata del estudio numérico de boquillas con asimetría en la dirección de avance del flujo y secciones rectangulares tanto en entrada y de salida para casos en los que aparece el estado de cavitación completamente desarrollado. Una calibración cuidadosa de los modelos de viscosidad turbulenta seleccionados se convierte en una tarea importante para obtener predicciones de flujo precisas. Los resultados obtenidos muestran que es posible captar las principales características de la cavidad y las frecuencias representativas de las inestabilidades. Las conclusiones obtenidas podrían ser útiles para el diseño de inyectores de combustible ya que la simulación adecuada de la condición de flujo de cavitación desarrollada y las posibles frecuencias de resonancia, útiles para mejorar la atomización del flujo y la integridad del inyector, podrían capturarse con precisión mediante este tipo de modelado numérico.

Palabras claves: Cavitación desarrollada; Inyectores; Atomizadores; Turbulencia; Modelos de viscosidad turbulenta; Validación / Calibración.

¹ Grupo UTN LAMA- Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza, Argentina,

² Grupo UTN LAMA- Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza, Argentina,

Introducción

La aparición de cavitación dentro de un equipo fluidodinámico está directamente relacionada con la caída de presión local dentro del dispositivo. Comprender el fenómeno del flujo de cavitación tiene una gran importancia, ya que desempeña un papel importante en el desempeño del dispositivo, e.g. en la atomización del aerosol de combustible, que afecta en gran medida el rendimiento y las emisiones de los motores Diésel (Coussirat et al., 2016-2021). La cavitación es un fenómeno complejo que se presenta en los flujos de líquidos cuando la presión hidrodinámica, p_c en algún lugar desciende alcanzando la presión de vapor del líquido, p_v . Este nivel de presión baja provoca que el flujo de líquido inicial se convierta en un flujo de dos fases, es decir, burbujas de líquido de vapor. El inicio de la cavitación por vaporización del líquido puede requerir la existencia de tensiones inferiores a la presión de vapor debido a la tensión superficial de la burbuja. Sin embargo, la presencia de partículas de gas no disueltas, capas límite y turbulencia modificarán y a menudo enmascararán una desviación de esta presión crítica p_c de p_v . (Knapp et al. 1973, Brennen 1995-2005, Franc et al., 2005, (Coussirat et al., 2016-2018).

Debido al alto costo de los experimentos la opción del modelado numérico de este problema ha cobrado mucha importancia dando lugar al desarrollo de una importante rama de la ingeniería denominada Mecánica de Fluidos Computacional, (CFD son sus siglas en inglés). La CFD consiste en el desarrollo/uso de códigos numéricos que modelan flujos complejos de fluidos sobre la base física del fenómeno de flujo turbulento y cavitante en este caso, que involucra transferencia tanto de masa como momentum (Brennen 2005). Debido a que el flujo es turbulento, existen distintos submodelos de turbulencia, que se han adaptado y desarrollado específicamente para estudiar los flujos de cavitación. Los modelos de Simulaciones Promediadas de Reynolds + Modelo de Viscosidad Turbulenta (RAS+ EVM, en inglés) se vienen desarrollado desde hace tres décadas,

siendo ahora una opción común para trabajos de CFD (Coussirat et al., 2018-2021). Para el flujo de cavitación se usa el Modelado basado en Ecuaciones de Transporte (TEM, en inglés), junto con las formulaciones RAS + EVM antes mencionadas. TEM consiste en resolver una ecuación de transporte para la fracción de vapor, f_v , con términos fuente apropiados para regular la transferencia entre fases. La combinación de estos modelos se denomina frecuentemente modelado de flujo multifásico turbulento (RAS/EVM/TEM), y actualmente se encuentran disponibles varias formulaciones para uso industrial (Versteeg et al., 2007).

Un objetivo de este trabajo es continuar trabajos anteriores (Coussirat et al., 2018-2021) que se centraron en la calibración de los EVMs, ya que existe una estrecha relación entre la condición de inicio/desarrollo de la cavitación y el nivel de turbulencia en el flujo. La distribución espacial y la tasa de cambio en el nivel de turbulencia producido por la cavitación podrían estar relacionadas con algunas escalas de turbulencia propias presentes en el proceso, que conducen a un 'estado de turbulencia no estándar'. Por lo tanto, los flujos de cavitación no deben modelarse como flujos turbulentos simples con cizalladura (shear turbulent flows) ya sean estos flujos internos o externos, siendo común a todos éstos el desarrollo de capas límites o capas de cizalladura o corte (e.g., capas límites sobre sólidos, chorros capas de mezcla y estelas).

Debido a su geometría, los inyectores no están en ninguna de estas categorías de flujo, comúnmente, los EVM sin calibrar predicen un exceso del nivel de viscosidad turbulenta, μ_t cuando aparece la cavitación (Coussirat et al., 2016, Coutier et al, 2003), calculando así niveles más bajos para la presión dinámica produciendo un valor de presión absoluta más alto y menos cavitación. La sobreestimación de μ_t afecta directamente a la región de cavitación debido a las altas tensiones calculadas dentro del flujo, lo que limita tanto a la cavitación como a la distribución de velocidad en las zonas de recirculación.

Otro objetivo del trabajo es comparar los resultados de EVMs con los obtenidos mediante la técnica denominada Simulación de Grandes Vórtices (Large, Eddy Simulations, LES), ya que LES permite obtener una forma de cavidad más detallada en casos de cavitación poco desarrollada, pero requiere más recursos computacionales (Biçer et al, 2014, Biçer 2015, Coussirat et al., 2016-2021).

Para satisfacer los objetivos planteados en este trabajo, se modelará mediante EVMs el flujo interno cavitante dentro de un inyector Diesel de alta presión con una configuración de entrada de boquilla asimétrica y secciones cuadradas en la salida, ver Fig.1, para ver si es posible obtener una resolución suficiente en el patrón de flujo y la forma de la cavidad en estados de cavitación incipiente y desarrollado.

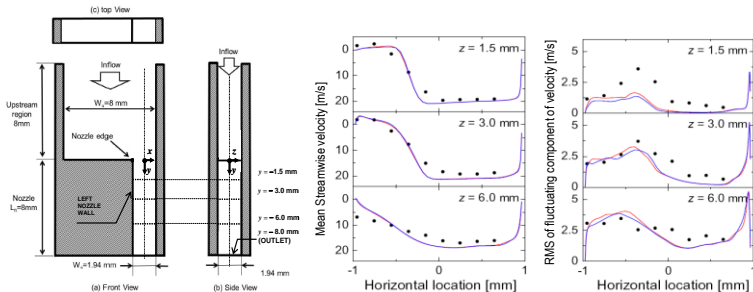


Fig.1. Geometría, condiciones de borde, experimentos y CFD para perfiles de las velocidades medias (i.e., mean streamwise), c_m y la desviación típica de las fluctuaciones de la c_m (i.e., C'_{RMS} , RootMeanSquare fluctuations), número de Reynolds, $Re=27,700$, ver Fig.2. **Nomenclatura:** •, Experimentos (LaserDopplerVelocimeter); CFD, modelo de LES, con modelos de SubGrid Scale (SGS) de: Smagorinsky (trazo rojo) y Vreman (trazo azul), Biçer 2015.

Se pretende así obtener una buena precisión en las predicciones que entregan los modelos RAS/EVM desarrollados para uso general, cuando se aplican a dispositivos de diseño donde aparecen flujos de cavitación. En trabajos anteriores se demostró que la calibración de los EVMs utilizados requieren de una atención especial y minuciosa basada en la relación biyectiva que hay entre la formación de la cavidad y el nivel de turbulencia que existe en

el lugar, lo que afecta a la presión reinante que es la que limita o no el crecimiento de la cavidad. Para analizar con más detalles la interacción de turbulencia y cavitación, se revisitaron nuevamente algunos de los experimentos utilizados en trabajos previos (Coussirat et al., 2016-2018). Para las tareas de calibración se utilizaron los datos experimentales de Biçer et al., 2014 y Biçer 2015 para los campos de velocidad media y de sus fluctuaciones, ver Fig.1 y Fig.2.

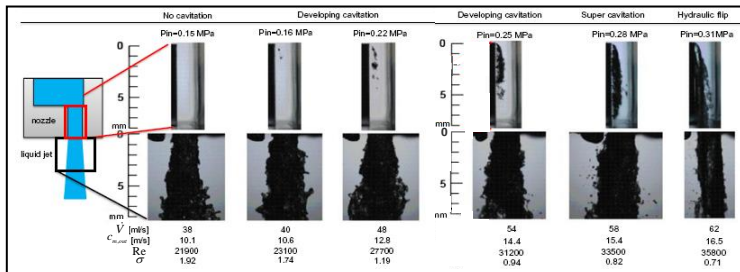


Fig.2. Patrones de flujos cavitantes (Biçer 2015). **Nomenclatura:** σ , Re, Números de Cavitación y de Reynolds, ver Ec. 1; p_{in} , presión entrada; p_{out} , presión salida (=1.0e+5Pa); p_v , presión vapor a 19C (=2,300Pa); ρ , densidad fase líquida a 19C(=998kg/m³); $C_{m,out}$, velocidad media salida; w_{out} , ancho boquilla; ν , viscosidad fase líquida a 19C (=1.35e-6m²/s).

Flujo turbulento y cavitante en toberas asimétricas: datos experimentales y desarrollos numéricos previos

Existe mucha información experimental relacionada con boquillas de entrada simétricas con diferentes tamaños y formas de secciones de salida (ver referencias en Coussirat et al., 2016-2018). También se dispone de información relacionada con boquillas de entrada asimétricas (Biçer et al., 2014 y Biçer 2015), Fig.1 y Fig.2. En estas bases de datos, además de la medida de campos de C_m y C_{RMS} hay imágenes de la forma de la cavidad cuando se cambian los parámetros de funcionamiento del equipo, siendo estos datos muy útiles para la calibración de códigos CFD.

La configuración experimental consistió en usar una bomba de émbolo para descargar agua del grifo filtrada a una temperatura ambiente de 19C en el aire ambiente a través de

una boquilla rectangular, Fig.1. El caudal de entrada (fase líquida) se midió con un caudalímetro insertado en el circuito hidráulico y se midió la presión estática aguas arriba de la boquilla con un manómetro tipo Bourdon. La velocidad c_m y su fluctuación c_{RMS} , (ambas en la dirección de la corriente y) se midieron usando un Velocímetro Láser Doppler (LDV) en tres posiciones ($y_1=-1.5$, $y_2=-3.0$, $y_3=-6.0$ mm, respectivamente), en el plano medio en profundidad del canal de la boquilla, marcado en la vista lateral, ver Fig.1. La forma de la cavidad se registró con una cámara de alta velocidad en la zona en donde se produce la cavitación en el interior de la boquilla (también hay registros de la atomización del flujo a la salida de la boquilla). La incertidumbre reportada en las mediciones fue de $\sim 1\%$ para el LDV y de $\sim 3.7\%$ para el caudal. No hay datos para el nivel de f_v en la cavidad ni medidas de presión local desafortunadamente. Detalles de estos experimentos pueden verse en Biçer 2015, en donde se generaron diferentes condiciones de cavitación cambiando el caudal, clasificándolos mediante el uso de los números de Reynolds, Re y Cavitación, σ calculados a partir de la Ec.1. Se destaca aquí que Re y σ no están estrechamente relacionados entre sí, (Sou et al., 2008), siendo ambos necesarios para la clasificación de flujo. La p_{out} permanece constante e igual a la presión atmosférica, porque allí hay ya un chorro libre (flujo subsónico con tensiones superficiales despreciables). De esta manera, se reproducen estados desde sin cavitación hasta el de cavitación desarrollada, Fig.2. La separación del flujo ocurre sólo en la entrada de borde afilado de la boquilla y la condición de cavitación incipiente aparece a lo largo de la pared izquierda de la boquilla en la zona de estrechamiento.

$$Re = c_{m,out} w_{out} / \nu ; \quad \sigma = (p_{out} - p_v) / (0.5 \rho c_{m,out}^2) \quad (1)$$

Más detalles del flujo puede verse en Coussirat et al., 2016 y Coussirat et al, 2021, donde también se demuestra que es posible capturar varias de las características de flujo bajo condición de cavitación incipiente (estado estacionario), mediante una cuidadosa calibración de los EVMs, siendo esta tarea necesaria por la estrecha relación entre la condición de inicio/desarrollo de la cavitación y el nivel de turbulencia en el

flujo. Como ya se señaló, la distribución espacial y la tasa de cambio del nivel de turbulencia producido por la cavitación podrían estar relacionadas con algunas escalas de turbulencia típicas del proceso, lo que lleva a un 'estado de turbulencia no estándar'. Luego, los flujos de cavitación no deben modelarse como casos de flujos de cizallamiento turbulentos, (Coussirat et al., 2018-2021). Note que la transición entre distintos tipos de cavitación es abrupta por la corta longitud de la boquilla, siendo esto un problema añadido para el modelado CFD, porque dificulta la definición de las condiciones de borde.

Se indicó que los EVMs no calibrados predicen en exceso el nivel de μ_t que conduce a valores más bajos para la presión dinámica, lo que produce un valor de presión absoluta más alto y menos cavitación. Esta sobreestimación μ_t afecta directamente a la región de cavitación debido a las altas tensiones calculadas, limitando tanto la cavitación como la distribución de velocidad en las zonas de recirculación (Shi et al., 2010, Biçer et al., 2014, Coussirat 2018-2021). También fue demostrado por Coussirat et al., 2016-2018 que existe una mayor dependencia del EVM utilizado para la turbulencia que de los modelos de cavitación en los resultados obtenidos para el estado de cavitación incipiente. Los modelos de cavitación utilizados han mostrado ligeras diferencias en la forma de la cavidad y los niveles de fracciones de vapor pronosticados. En Coussirat 2021 se demuestra que es posible obtener buenas predicciones del patrón del flujo cuando los inyectores no tienen simetría en la entrada a la boquilla, Fig.1. En esta situación, el flujo dentro de la boquilla tiene un patrón diferente al de una boquilla simétrica estudiada en Coussirat et al., 2018, demostrando que usando EVM para casos de cavitación incipiente es posible obtener resultados numéricos de calidad comparable a los obtenidos mediante LES. Se sabe que el modelado LES permite obtener una forma de cavidad más detallada en casos de cavitación poco desarrollada, pero requiere más recursos computacionales que el uso de EVMs.

La pregunta aquí es: *'¿es posible obtener una resolución suficiente en la forma de la cavidad en un estado de cavitación desarrollada (no estacionaria) mediante el uso de EVM?'* El

objetivo principal de este trabajo es dar respuesta a esta pregunta. Para ello se simularon casos en donde la cavitación ya se corresponde a $\sigma=1,19$ en donde la cavitación es del tipo desarrollada y presenta un comportamiento no estacionario, pero con un patrón oscilatorio del que es posible obtener frecuencias de desprendimiento de vórtices y compararlas contra datos experimentales, ver Fig.2.

Metodología

Todas las simulaciones que se llevaron adelante han sido de casos bidimensionales (2D), siguiendo la línea de trabajos previos ya realizados por los autores del presente trabajo. En lo que sigue se discuten resultados de algunas referencias que aportan elementos para la correcta definición del problema. Sou et al., 2014 Biçer et al., 2014 y Biçer 2015 Coussirat 2018-2021 simularon el caso de $\sigma=1,19$, como 2D, Fig.1, y bajo condiciones no estacionarias utilizando la opción RAS/EVM. Se seleccionaron tres modelos de turbulencia del tipo EVM, (i.e., Estándar $k-\varepsilon$, SST $k-\omega$ y RNG $k-\varepsilon$, ver detalles en Versteeg et al., 2007). Se destaca que Biçer 2015 utiliza las funciones Standard Wall para los EVM seleccionados y el amortiguamiento Van Driest para el modelado LES, (Sou et al., 2014). En contraste, Coussirat et al, 2018-2021 no utilizan funciones de pared cuando usan los modelos de la familia $k-\varepsilon$, remarcando que el modelo SST $k-\omega$ no hace uso de éstas. Las conclusiones de todos estos autores señalan que los EVM seleccionados dieron buenas predicciones para la longitud, el grosor de la cavidad y el desprendimiento de cavidades, pero utilizando mallas de discretización muy finas (tamaño de celda de $50 \times 50 \mu\text{m}$ y pasos de tiempo del orden de $O(10^{-8}\text{s})$). En los casos de cavitación desarrollada, el desprendimiento de cavidades también se simuló bien. Resultados de mayor calidad fueron obtenidos mediante LES, pero utilizando un tamaño de celda de malla mínimo de $\sim 4 \times 4 \mu\text{m}$ i.e., un orden de magnitud menor comparado con la malla usada para EVM (Sou et al., 2014, Biçer, 2015). Se concluyó que el uso de un modelo de turbulencia (EVM sin calibrar o LES) junto con una

mallas muy finas pueden simular el desprendimiento de cavidades y el flujo de chorro reentrante, pudiendo predecir cuantitativamente el espesor de la cavidad y su longitud, la velocidad media del flujo y sus fluctuaciones turbulentas. Esta combinación podría usarse para explorar los fenómenos de cavitación dentro de las boquillas de los inyectores de combustible, pero el principal problema aquí sigue siendo los altos requisitos computacionales para estas simulaciones no estacionarias, sobre todo cuando se utiliza la opción LES.

Calibración adecuada de los EVM, discusión

Se trata aquí de optimizar recursos computacionales utilizando mallas más gruesas, pero utilizando EVM bien calibrados para así mejorar la predicción de μ_t a efectos de lograr niveles adecuados de presión que disparen el efecto de cavitación, tratando de extrapolar los resultados ya obtenidos para casos de flujos estacionarios por Coussirat et al., 2016-2018. Cuando el efecto de cavitación se magnifica, el flujo se vuelve no estacionario y se comienza a ver un patrón de desprendimiento vorticoso fluctuante. En trabajos previos (Coussirat et al., 2016-2021) ya exploró la calibración mediante la manipulación de parámetros característicos, fundamentados en la física del problema. Se concluyó que el modelo SST $k-\omega$ bien calibrado permite obtener buenas predicciones de la cavidad para casos de cavitación incipiente mediante la manipulación del coeficiente de calibración β^* . El modelo SST $k-\omega$ es un modelo de turbulencia que calcula la μ_t del flujo y consta de dos ecuaciones de transporte para las cantidades turbulentas de: energía cinética turbulenta, k , y su tasa de disipación, ω (ver detalles en Versteeg et al., 2007). Existen varios parámetros de calibración en este modelo y sobre fundamentos físicos se seleccionó el parámetro β^* . Este parámetro es responsable del nivel calculado en la disipación de la energía cinética turbulenta, k , y la producción de su tasa de disipación ω . También controla las condiciones de contorno calculadas para k y ω en las paredes (Menter, 1994; Wilcox, 1998; Menter et al., 2003; Coussirat et al., 2018-2021,). El valor base para β^* ($= 0,09$) fue ya establecido por

Wilcox, 1988, examinando la denominada capa cercana a la pared (wall-layer). Todos los flujos reales poseen lo que se llama capa límite (CL). La estructura de la CL es compleja y para su estudio se la divide en distintas partes. Dentro de la CL, la capa cercana a la pared se define como la porción de la CL lo suficientemente alejada de la pared para hacer que la viscosidad molecular μ sea insignificante en relación con μ_t , pero lo suficientemente cerca de la pared como para que los efectos convectivos sean todavía insignificantes en relación con la velocidad a la que la turbulencia está siendo creada y destruida (i.e., estado de turbulencia de equilibrio). En estas condiciones las tensiones de corte de Reynolds, se definen como, $\tau_T = \rho \langle u'v' \rangle$, siendo $u'v'$ los momentos de 2^{do} orden de las fluctuaciones turbulentas de las velocidades medias c_m (en las direcciones x e y) para casos de flujos bidimensionales (2D). Estas τ_T representan transferencia de momentum en direcciones perpendiculares a las del flujo principal. Se remarca que estas τ_T son originadas por las fluctuaciones turbulentas de las velocidades que están correlacionadas entre ellas, son constantes en esa zona y se igualan a la llamada velocidad de fricción o velocidad de corte, u^* . Las τ_T se suman a las tensiones viscosas, definidas como $\tau = \mu \partial c_m / \partial y$ constituyendo esto parte de lo que se llama modelo de CL de tres capas, válido para flujos de cizalladura (White, 1991). Se muestra así que la transferencia de momento en la dirección perpendicular al flujo principal es proporcional al gradiente de velocidades medias en la dirección normal al flujo para el caso de flujos de cizalladura. La velocidad de fricción se define dimensionalmente como: $u^* = (\tau/\rho)^{0.5} = [(\mu/\rho)(\partial c_m/\partial y)]^{0.5}$, para flujo laminar; mientras que $u^* = (\tau_T/\rho)^{0.5} = (\rho \langle u'v' \rangle / \rho)^{0.5} = \langle u'v' \rangle^{0.5}$, para flujo turbulento. De estas expresiones puede verse que u^* está físicamente relacionadas con el transporte de momento desde un nivel a otro en la CL. Note que al ser la tensión de corte total $\tau + \tau_t$ constante (y considerada $\sim \tau_t$) en la zona cercana a la pared e igual a la velocidad de fricción implica que: $\tau_t / k = (\beta^*)^{0.5}$ lo que conduce al valor estándar de β^* , ya que una gran cantidad de medidas experimentales para casos de flujos de cizallamiento indican que la relación τ_t/k es

aproximadamente 3/10 (Towson, 1976), proveyendo así el valor base de 0,09 para β^*_∞ .

Resultados obtenidos

Coussirat et al., 2021 demostraron que a $\sigma=1,19$ todavía es posible una simulación estacionaria para comparar resultados experimentales y resultados CFD para los campos de velocidad media y fluctuante. Se ve también como la cavidad muestra un comportamiento no estacionario incipiente, con desprendimiento de estructuras vorticosas, Fig.3.

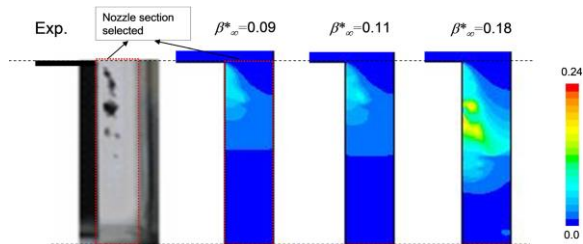


Fig.3: resultados CFD estacionario (M03, $\sigma=1.19$): Cavidad con f_v .

Nomenclatura: Exp., Experimentos (Biçer et al, 2014, Biçer 2015); Marco en rojo: volumen de control donde se midió/simuló mediante CFD; β^*_∞ , parámetro de calibración EVM SST (Coussirat et al., 2021)

Se demostró que las mejoras en las predicciones del campo de velocidad fluctuante provocan una predicción de la forma de la cavidad más precisa. El campo de velocidad media c_m no sufre fuertes variaciones cuando se realizó la calibración, pero el campo c'_{RMS} predicho se ve fuertemente afectado por la calibración (ver detalles en Coussirat et al., 2021). Este hecho destaca la estrecha relación entre el nivel de turbulencia y el fenómeno de inicio de la cavitación, porque se demostró que suprimiendo el nivel de μ_t mediante la calibración, aumenta la f_v predicha. También se demostró que distintos modelos de cavitación TEM ofrecen casi idénticos resultados, independientes éstos del EVM que se use para el modelado de la turbulencia. Pese a esto, se seleccionó el modelo TEM más completo (Singhal et al, 2002) para futuras aplicaciones. Los modelos TEM permiten el cálculo de la densidad del flujo

bifásico, mientras que el EVM SST $k-\omega$ calcula la viscosidad de la mezcla. En flujos de cizallamiento normalmente la relación μ_t/μ (i.e., tasa de viscosidad turbulenta respecto de la molecular de la mezcla) es de 100 a 200, se ve claramente cuán importante es el efecto del correcto modelado de la turbulencia, ya que asumiendo que el modelo TEM predice correctamente la fv , independientemente de su nivel en distintos lugares de la cavidad, la μ_t será siempre dos órdenes de magnitud superior en esa zona, afectando claramente al patrón de flujo y el campo de presiones estimado, el que a su vez dispara el efecto de cavitación, formándose así el ciclo interdependiente entre nivel de turbulencia y nivel de fv . El parámetro β^*_∞ permite calibrar este nivel de μ_t de forma exitosa, pero no directa ya que, como se señaló anteriormente afecta tanto la ecuación de k como la de ω en el modelo SST $k-\omega$.

El paso siguiente es el modelado de flujos en donde la cavitación ya esté desarrollada, lo que implica un modelado del tipo no estacionario. En el presente trabajo se utilizaron las mismas definiciones para el dominio de cálculo, Fig.1, y sólo se varió el caudal de entrada para tener un $\sigma=0,94$. Se usó una discretización temporal de 1^{er} orden con pasos de tiempo (Δt) de un orden de $O(10^{-6}s)$, i.e., dos órdenes de magnitud mayores que los de LES. La Fig.4 muestra resultados para el caso de $\sigma=0,94$ en donde ya es necesario una simulación no estacionaria. Puede verse claramente que se captura una estructura de desprendimiento de vórtices, tanto en la fv como en la tasa μ_t/μ . Desafortunadamente, los datos experimentales de Biçer et al., 2014 y de Biçer 2015 no muestran datos de nivel de fv ni de las frecuencias asociadas al desprendimiento. Para ver si estos resultados preliminares obtenidos están correlacionados con frecuencias típicas de desprendimiento para casos de flujos cavitantes en distintos dispositivos, se comparan con algunas referencias bibliográficas relacionadas con la experiencia que ya se posee al respecto. Puede señalarse que se sabe que la inestabilidad de la cavitación está correlacionada con señales de ruido de frecuencia alta, en un rango de f~5-10 kHz y baja, en un rango de f~100-

200Hz, (Escaler et al., 2006 y Coussirat et al., 2016). Por lo tanto, si los tiempos característicos de desprendimiento son de $O(10^{-2}s-10^{-4}s)$ se comprueba la buena selección del Δt para la simulación CFD.

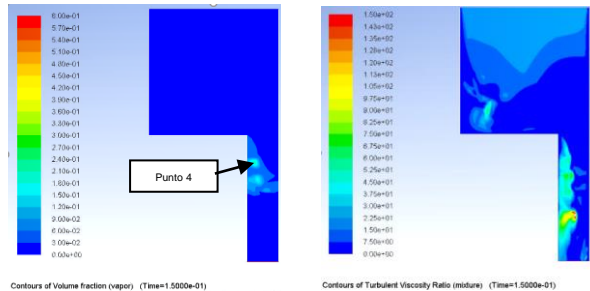


Fig.4: Resultados CFD no estacionario EVM SST $k-\omega$: $\sigma=0.94$, M03 ($\beta_{\infty}^*=0.18$, $\Delta t=5 \times 10^{-6}$): Izq.: Cavity con f_v . Der.: tasa de viscosidad turbulenta molecular, μ_t/μ_l , EVM SST (Coussirat et al., 2021). Nomenclatura: El Punto 4 señala donde se analizó la frecuencias de variación de fracción de vapor asociada al desprendimiento de estructuras vorticosas, típicas de procesos no estacionarios.

La Fig.5. muestra la señal de la variación temporal de la f_v obtenida en el Punto 4, con niveles de su variación que está en el rango de 0,2-0,55, lo que podría llevar a pensar que es bajo. Las fotografías sólo muestran el desarrollo de la cavity y no se poseen datos acerca del nivel de la f_v en los experimentos, no pudiendo tenerse una clara conclusión al respecto. Una transformada de Fourier de esta señal permite ver que la frecuencia fundamental es del orden de los 1000Hz para este caso, viendo que esta dentro de los rangos típicos para flujos cavitantes.

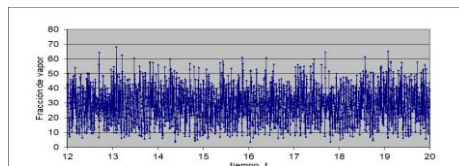


Fig.5: Resultados CFD no estacionario EVM SST $k-\omega$: $\sigma=0.94$, M03 ($\beta_{\infty}^*=0.18$, $\Delta t=5 \times 10^{-6}$): Obtención de la evolución de la variación de la fracción de vapor en el Punto 4, ver Fig.4. Frecuencia de desprendimiento ~ 1000 Hz

Conclusiones

Mediante CFD se ha logrado capturar la frecuencia de desprendimiento utilizando un EVM calibrado especialmente (SST $k-\omega$). Esta calibración es producto de la experiencia acumulada para la resolución de casos estacionarios de flujos cavitantes en boquillas (i.e., cavitación incipiente, levemente desarrollada, con un rango de $1,91 < \sigma < 1,19$). La frecuencias de desprendimiento obtenida están acordes a las frecuencias típicas de desprendimiento para casos de flujos cavitantes. La calibración usando el parámetro β^*_∞ permite ajustar el nivel de f_v obtenido en casos no estacionarios, debiendo buscar bases de datos en donde se cuente con medidas de la f_v dentro de la cavidad para evaluar con más precisión las calibraciones efectuadas.

El hecho de que el parámetro β^*_∞ afecte a las dos ecuaciones simultáneamente es un elemento a tener en cuenta en futuros trabajos, tratando de identificar la producción de efectos similares con parámetros de calibración que sean más locales de modo de tener un control aún mayor a la hora de efectuar la calibración.

Referencias:

- Coussirat, M., Moll, F., Cappa, F., and Fontanals A., (2016), '*Study of Available Turbulence and Cavitation Models to Reproduce Flow Patterns in Confined Flows*,' J. Fluids Eng., 138(9).
- Coussirat M., Moll F. and Fontanals A., (2018), '*Cavitating Flow Pattern Characterization in Square Section Injectors by Means Of CFD*,' Mec. Comput., Vol XXXVI:1163–1172.
- Coussirat, M., Moll, (2021), '*Recalibration of Eddy Viscosity Models for Numerical Simulation of Cavitating Flow Patterns in Low Pressure Nozzle Injectors*,' J. Fluids Eng. March, 143(3).
- Knapp R., Daily J. and Hammit F., (1970), '*Cavitation*,' McGrawHill, New York, USA.
- Brennen C., (1995), '*Cavitation and Bubble Dynamics*,' Oxford University Press, New York, USA.
- Franc J. and Michel J., (1995), '*Fundamentals of Cavitation*,' Spinger, Germany.
- Brennen C., 2005, '*Fundamentals of Multiphase Flows*,' Cambridge University Press, California, USA.

Versteeg H. and Malalasekera W., (2007), *'An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method'*, 2nd Ed., Addison-Wesley.

Coutier-Delgosha, O., Reboud, L. and Y. Delannoy, Y., (2003), *'Numerical Simulation of the Unsteady Behaviour of cavitating Flows'*, Int. J. Numer. Meth. Fluids 42 pp 527–548.

Biçer B., Sou A., (2014), *'Numerical Simulation of Turbulent Cavitating Flow in Diesel Fuel Injector'*, Proceedings of the 3rd Intern. Symp. of Maritime Scie., Nov.10-14, Kobe, Japan.

Biçer B., (2015), *'Numerical Simulation of Cavitation Phenomena inside Fuel Injector Nozzles'*, PhD Thesis, Kobe University, Japan.

Sou, A., Maulana, M., Isozaki, K., Hosokawa, S., and Tomiyama, A., (2008), *'Effects of Nozzle Geometry on Cavitation in Nozzles of Pressure Atomizers'*, J. Fluid Sci. Tech., 3(5), pp. 622–632.

Shi J. and Arafin M., (2010), *'CFD Investigation of Fuel Property Effect on Cavitating Flow in Generic Nozzle Geometries'*, ILASS–Europe2010, 23rd Ann. Conf. on Liquid Atomiz. and Spray Syst., Czech Republic.

Menter F., 1994, *'Two Equations Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications'*, AIAA Journal, 32(8), pp. 1598–1605.

Wilcox D., 1998, *'Turbulence Modeling for CFD'*, DCW Industries, Inc., La Cañada, California.

Menter F., Kuntz M., and Langtry R. , 2003, *'Ten Years of Industrial Experience With the SST Turbulence Model'*, Turb., Heat and Mass Transfer, Vol.4, K. Hanjalic, et al., eds., House, pp. 625–630.

Wilcox D., 1988, *'Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models'*, AIAA Journal 26(11).

White, F. (1991) *'Viscous fluid flow'*. 2nd ed., McGraw-Hill, Inc.

Townsend, A. A., 1976, *'The Structure of Turbulent Shear Flow'*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, England, pp. 107-108.

Singhal, A., Athavale, M., Li, H., and Jiang, Y., 2002, *'Mathematical Basis and Validation of Full Cavitation Model'*, ASME J. Fluids Eng. 124(3), pp. 617–624.

Escaler X., Egusquiza E., Farhat M., Avellan F., Coussirat M., 2006, *'Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines'*, Mechanical Systems and Signal Processing 20(4), pp. 983–1007.