

MODELO VOF DE UN INYECTOR BI-SWIRL DE UN MOTOR COHETE

VOF MODEL OF A BI-SWIRL INJECTOR FOR A ROCKET ENGINE

Axel Schubert^a, Pedro Garcia Delucis^a, Lucas S. Liba^a, Agustín Beceyro^b, Dan Etenberg^b
y Patricio Pedreira^a

^a*Departamento de Ambiente y Movilidad, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Lavardén 315, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina*

^b*LIA Aerospace, Durham, Reino Unido, <https://lia-aerospace.com>*

Resumen.

La inyección de propelentes líquidos en la cámara de combustión de motores cohete presenta varios desafíos entre los que se destacan la correcta atomización y la mezcla del oxidante y el combustible. Los inyectores bi-swirl son una opción atractiva para esta aplicación debido a su excelente capacidad de atomización. La atomización se logra gracias al diseño centrífugo del inyector, que produce dos láminas cónicas concéntricas. Estas láminas disminuyen su espesor dando inicio a la propagación de inestabilidades y la posterior atomización. Sin embargo, es difícil predecir el ángulo de descarga del inyector. Esto es particularmente importante con propelentes hipergólicos donde la combustión se inicia en la zona de contacto entre los compuestos y es deseable conocer con exactitud donde esto ocurrirá. Este trabajo presenta el modelado por CFD de un inyector bi-swirl utilizando el método Volume of Fluid (VOF) implementado en la suite OpenFOAM. Los resultados del modelo fueron comparados con experimentos realizados en un banco de ensayos de inyección. El ajuste de la amortiguación de la turbulencia, requerido por el modelo interfacial, fue necesario para mejorar las predicciones del ángulo de descarga. Además, fue posible lograr un buen ajuste con un único valor de amortiguación.

Palabras clave: Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), inyectores biswirl, propulsión aeroespacial, *volume-of-fluid* (VOF), simulación numérica, diseño de inyectores.

Abstract. The injection of liquid propellants into the combustion chamber of rocket engines presents several challenges, among which the correct atomization and mixing of the oxidizer and fuel stand out. Bi-swirl injectors are an attractive option for this application due to their excellent atomization capability. Atomization is achieved through the injector's centrifugal design, which produces two concentric conical sheets. These sheets decrease in thickness, leading to the propagation of instabilities and subsequent atomization. However, predicting the discharge angle of the conical sheets is difficult, especially with hypergolic propellants. This work presents the CFD modeling of a bi-swirl injector using the Volume of Fluid (VOF) method implemented in the OpenFOAM suite. The model's results were compared with experimental data obtained from an injector test bench. Adjusting the turbulence damping, required by the interfacial model, was necessary to improve discharge angle predictions.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), biswirl injectors, aerospace propulsion, *volume-of-fluid* (VOF), numerical simulation, injector design.

1. INTRODUCCIÓN

Los inyectores de tipo swirl son empleados para la inyección y atomización de propelentes en la cámara de combustión en sistemas de propulsión aeroespacial (Yang *et al.*, 2011). Estos están compuestos por una cámara de swirl (*Swirl chamber*) con canales de entrada tangenciales y un orificio de salida. El propelente ingresa a la cámara de swirl de forma tangencial a la cámara, lo que provoca que el líquido adquiera velocidad angular. Debido a este proceso, se forma un núcleo de aire alrededor de la línea central del atomizador para números de Reynolds superiores a 3500 Lee *et al.* (2010). El líquido sale hacia la cámara de combustión, a través del orificio de salida, en forma de una fina lámina cónica hueca Kang *et al.* (2018). Más adelante, esta delgada lámina de líquido se vuelve inestable y se descompone en forma de gotas. La morfología de esta lámina cónica varía con la presión de inyección y pasa por diferentes etapas a medida que ésta aumenta, reduciendo la longitud de fragmentación y aumentando el ángulo de salida hasta llegar al régimen desarrollado Ghorbanian *et al.* (2003). Además, el diámetro medio de las gotas es proporcional al espesor de la lámina Bazarov *et al.* (2008). Estas características son cruciales a la hora de determinar la eficiencia del atomizador y tienen un impacto directo en el rendimiento del inyector. Sin embargo, la predicción de estas características es una tarea compleja debido a que en la literatura se presentan diversas correlaciones que arrojan resultados cuantitativamente disímiles, ver Kang *et al.* (2018), y no parece existir un acuerdo sobre cuales parámetros geométricos son determinantes en la morfología del flujo inyectado. En este contexto, la realización de un modelo de mecánica de fluidos computacional se presenta como una alternativa atractiva para el diseño de inyectores dado que permite la integración de todos los parámetros geométricos del mismo en un único modelo Li *et al.* (2011). El presente trabajo se estructura de la siguiente manera. Primero se presentan los parámetros geométricos de los inyectores tipo swirl y se describe el caso particular de un inyector bi-swirl. Luego se presentan los resultados experimentales de un inyector bi-swirl existente. Finalmente se introduce el modelo de mecánica de fluidos computacional, el proceso de validación del modelo y los resultados obtenidos.

2. INYECTOR SWIRL

En un inyector swirl se pueden distinguir dos características macroscópicas que influyen significativamente en el régimen de trabajo y en la eficiencia de la combustión posterior: el coeficiente de descarga ($C_d = \frac{\dot{m}_l}{0,25\pi d_0^2 \sqrt{2\rho_l \Delta P_l}}$) y el ángulo de la capa cónica (α). Los parámetros geométricos del inyector afectan notablemente estas características, por lo que es importante entender su relación. En la Fig. 1, se presentan todas las dimensiones relevantes del inyector que serán referenciadas a lo largo de esta sección.

Se definen dos parámetros geométricos importantes a la hora de describir un inyector. En primer lugar se encuentra la constante del inyector $K = \frac{A_t}{d_0(D_s - D_t)}$. Además, se encuentra la característica geométrica del inyector $A = \frac{(D_s - D_t)d_0}{4nR_t^2}$.

da Silva Couto *et al.* (2009) observó que, aunque un incremento en la caída de presión del inyector inicialmente reduce el C_d , este eventualmente se estabiliza en un valor constante, dependiendo únicamente de los parámetros geométricos K y A . Estos parámetros afectan el C_d de manera opuesta: mientras que un aumento en A reduce el C_d (Yang *et al.*, 2012), un aumento de K lo incrementa (Jeng *et al.*, 1998). Existen correlaciones empíricas que permitan predecir el valor de C_d en base a los parámetros geométricos y la velocidad de entrada del líquido a la cámara de swirl V_0 , tales como las presentadas en Jones (1982) y Benjamin *et al.* (1998), entre otros.

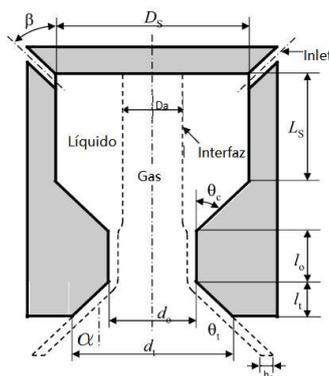


Figura 1: Parámetros geométricos de un inyector tipo swirl.

Por otro lado, el aumento del número y ángulo (β) de *inlets* y de A tienden a incrementar α (Xue et al. (2004), Yang et al. (2012), Rashid et al. (2012), Xue et al. (2002)), mientras que el aumento de K lo disminuye (Jeng et al., 1998). Por su parte, Sakman et al. (2000) estudió el impacto del aumento de la longitud del orificio l_0 y observó que este reduce α . En cambio, Xue et al. (2004), Amini (2016), Xue et al. (2002), Sakman et al. (2000) y Hutt (2000) estudiaron el efecto del aumento del ángulo de convergencia de la cámara, θ_c , coincidiendo en que este también disminuye α . Algunas expresiones para el cálculo de α se pueden encontrar en Rizk y Lefebvre (1987) y Benjamin et al. (1998), entre otros.

En la Tabla 1 se muestra un cuadro que sintetiza el efecto en los parámetros operativos al aumentar el valor de las características geométricas. Si bien existe un acuerdo entre las tendencias de las características, en la Sección 3 se verá que los resultados cuantitativos obtenidos con las correlaciones de los trabajos de referencia presentan discrepancias significativas.

Efecto en el coeficiente de descarga C_d		
Característica geométrica del inyector	A	Disminuye C_d
Constante del inyector	K	Aumenta C_d
Efecto en el ángulo de descarga α		
Ángulo de los puertos tangenciales	β	Aumenta α
Constante del inyector	K	Disminuye α
Número de inlets	n	Aumenta α
Característica geométrica	A	Aumenta α
Longitud del orificio de salida	l_0	Disminuye α
Ángulo de convergencia	θ_C	Disminuye α
Ángulo de divergencia	θ_T	Aumenta α

Tabla 1: Síntesis de parámetros geométricos del inyector

Un caso de particular interés de inyectores de tipo swirl es el inyector axial biswirl, que consta de dos cámaras de swirl, exterior e interior, dispuestas de forma concéntrica. Dependiendo del diseño específico, el oxidante o el combustible puede inyectarse en la cámara central. El diseño de un inyector biswirl se enfoca en los parámetros de la cámara de swirl interior (Long et al., 2002). Una vez que el combustible y el oxidante alcanzan el orificio de salida, se busca la intersección de ambas capas cónicas de líquido para lograr la atomización y mezcla de ambos componentes.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para las pruebas experimentales se tomó un inyector tipo *biswirl*. Se observa en la Fig. 2 que la cámara exterior posee cuatro puertos de entradas mientras que la interior tiene dos (se indica para referencia la posición del puerto de entrada de la cámara exterior).



Figura 2: Vista en corte del inyector estudiado.

Para la caracterización del inyector, se llevaron a cabo ensayos en un banco de pruebas cuyo esquema se muestra en la Fig. 3. El sistema consta de dos líneas (*oxidizer* y *fuel*) que pueden operar de forma independiente. Para los ensayos ambas líneas se operaron con agua destilada. La línea de inyección cuenta con sensores de presión (0-15 bar) y caudalímetros (0-0.5 kg/s) en cada rama de inyección. El ángulo de inyección se mide con una cámara digital de alta resolución montada cuidadosamente a la salida del inyector.

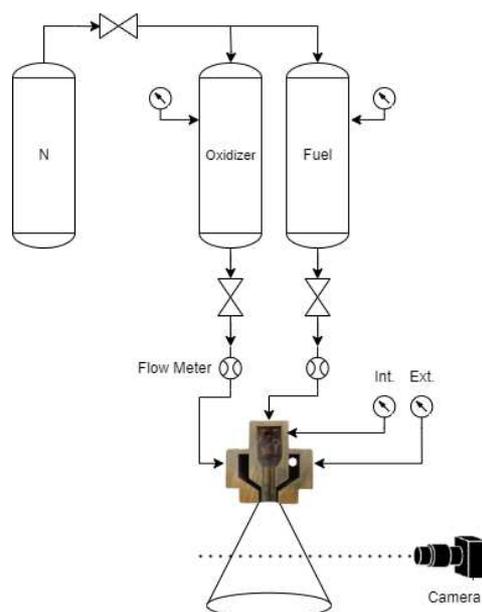


Figura 3: Diagrama método experimental.

4. MÉTODOS NUMÉRICOS

El proceso de atomización de un inyector puede dividirse en dos etapas: atomización primaria y fragmentación de la capa cónica de fluido. Los métodos numéricos de captura de interfaz, como *Volume-of-Fluid* (VOF), *front-tracking* y *cell-marker*, son utilizados para la atomización primaria (Ketabdari, 2016). Sin embargo, cuando el fluido se fragmenta en pequeñas gotas, para

capturar la interfaz de estas se requiere una malla muy refinada, lo que aumenta el costo computacional. En esos casos, se pueden utilizar métodos Lagrangianos de seguimiento de partículas (LPT) que permiten usar mallas menos refinadas. Por lo tanto, un modelo numérico completo de la atomización requiere un enfoque acoplado entre ambos métodos (Heinrich y Schwarze, 2020). Como este trabajo se centra en la atomización primaria, se adoptó un enfoque VOF en *OpenFoam* versión 11 con el algoritmo *incompressibleVOF*, el cual resuelve las ecuaciones de transporte de fase, continuidad y momento según lo descrito por Damian (2012)

4.1. Turbulencia

La turbulencia fue representada utilizando un modelo RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) para acotar el costo computacional. En particular, se empleó el modelo $k - \Omega SST$ ampliamente utilizado en la literatura para este tipo de casos (Kumar y Agarwal (2024)). Según Prades et al. (2020), los modelos de turbulencia RANS, empleados en el contexto de VOF, tienden a sobre estimar la energía cinética turbulenta en las interfaces líquido-gas. Una solución a este problema es el uso del método de amortiguación de la turbulencia (*turbulence damping*) en la interfaz. Este método agrega un término adicional de difusión en la ecuación de ω del modelo $k - \omega$, el cual depende de $\delta = \frac{\Delta x^2}{6B}$, donde B es la constante adimensional de Egorov y Δx es el tamaño característico de la malla. El valor δ debe ser validado experimentalmente Frederix et al. (2018).

4.2. Discretización

La evaluación de las derivadas temporales de las ecuaciones de transporte se realizó empleando el esquema implícito de primer orden, salvo para la discretización temporal de la ecuación de transporte de fases, que está predefinida en OpenFOAM para el método VOF. Aquí se emplea el esquema temporal explícito MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*) que cuenta con limitadores y garantiza que el valor de α esté limitado entre 0 y 1 (Damian, 2012).

La discretización de los términos espaciales se realizó con esquemas de segundo orden. El término de compresión de la ecuación de transporte de fases se discretizó utilizando el método MPLIC. Este método permite la interpolación de la interfaz entre fluidos mediante cortes superficiales que dividen cada celda para que coincida con la fracción de volumen de la fase en esa celda (Greenshields, 2021).

4.3. Algoritmo de solución

La solución del sistema de ecuaciones presentado en las secciones anteriores se realiza utilizando el algoritmo PIMPLE, este surge de combinar los métodos SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) y PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) para resolver ecuaciones de flujo tanto en estado estacionario como transitorio (CFD Direct, 2024).

5. MODELO COMPUTACIONAL DE UN INYECTOR BISWIRL

En esta sección se presenta el modelo y resultados de las simulaciones del inyector biswirl desarrollado para estudiar la incidencia de los parámetros geométricos del inyector en el coeficiente de descarga y ángulo de salida.

5.1. Dominio y condiciones de borde

El modelado del inyector biswirl se realizó elaborando un modelo tridimensional de cada zona del inyector (interna y externa) por separado. Se muestran en la Fig. 4a y en la Fig. 4b los nombres asignados a las superficies de las mallas de los inyectores interior y exterior.

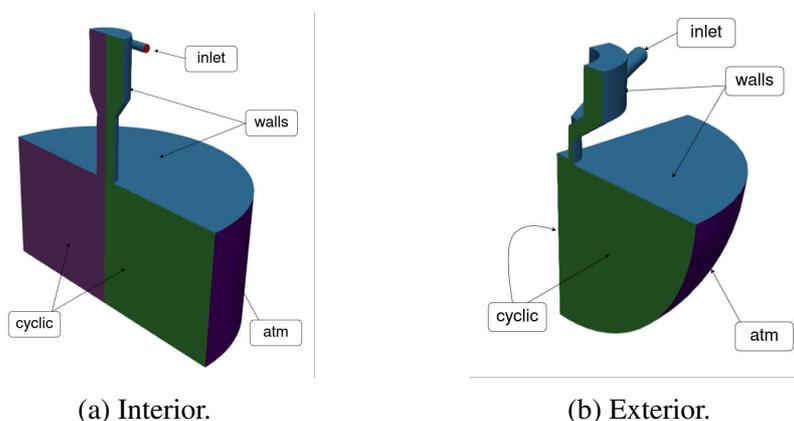


Figura 4: Superficies de las mallas.

En las paredes se estableció un gradiente nulo de presión y velocidad relativa nula. En las secciones de entrada se estableció la velocidad media calculada a partir del caudal observado experimentalmente. Para la turbulencia se emplearon condiciones de borde de bajo número de Reynolds que emplean modelos bien establecidos para los valores de k y ω (Kalitzin *et al.*, 2005). Debido a la simetría de revolución del problema, para las caras laterales se utilizó la condición de borde periódica *cyclic*, la cual vincula dos caras separadas y las trata como si estuvieran físicamente conectadas cuando se resuelven las ecuaciones. Para ello, las superficies a vincular, tanto en geometría como en malla, deben ser idénticas. En la Tabla 2 se listan el resto de las condiciones de borde empleadas.

Boundary	α	U	p_{rgh}	k	ω	ϵ	nut
inlet	fixedValue	flowRateInletVelocity	zeroGradient	fixedValue	fixedValue	fixedValue	fixedValue
walls	zeroGradient	noSlip	zeroGradient	kqRWallFunction	omegaWallFunction	epsilonWallFunction	nutkWallFunction
cyclic	cyclic	cyclic	cyclic	cyclic	cyclic	cyclic	cyclic
atm	inletOutlet	inletOutlet	fixedValue	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet

Tabla 2: Condiciones de borde de la malla

5.2. Estrategia de Mallado

Las mallas utilizadas se muestran en la Fig. 5. Estas se realizaron sin refinamiento adaptativo y utilizando la condición de borde de simetría axial estándar (*cyclic*). En la Tabla. 3 se presentan los resultados del estudio de convergencia de malla realizado. Se observa que a partir de 200,000 elementos para el inyector exterior y 450,000 elementos para el inyector interior el ΔP entre la entrada y la salida del inyector converge con una diferencia menor al 1%, por lo que la malla utilizada corresponde con estas cantidades de elementos. En todos los casos se observó la formación del núcleo de aire en el lado interno del inyector. También se realizó un estudio de convergencia temporal en el cual se determinó que para números de Courant menores a 3 no se observaban diferencias en los resultados.

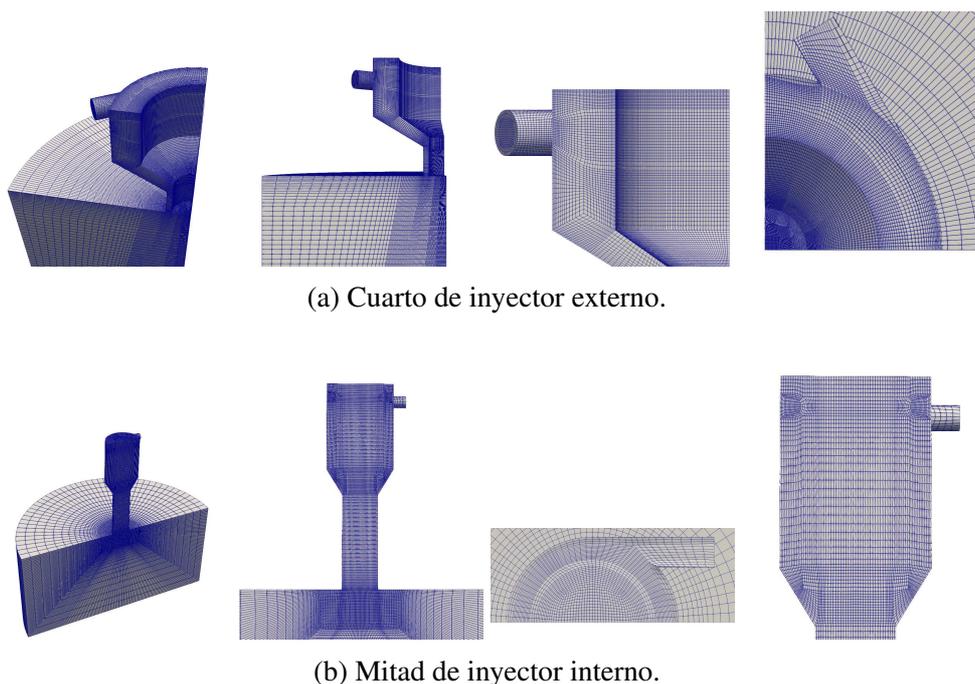


Figura 5: Mallas del inyector con simetría.

Interior						
Número de elementos	26000	53000	96000	200000	500000	1600000
ΔP [bar]	9.19	8.9	8.1	7.54	7.47	7.52
Diferencia (%)	3.16 %	8.99 %	6.91 %	0.93 %	0.67 %	-
Exterior						
Número de elementos	115000	225000	450000	890000		
ΔP [bar]	7.38	7.15	6.94	6.97		
Diferencia (%)	3.12 %	2.94 %	0.43 %	-		

Tabla 3: Convergencia de malla para ambos inyectores.

5.3. Resultados

Se presentan los resultados de las características macroscópicas observadas en las pruebas experimentales, tales como el coeficiente de descarga, la caída de presión y el ángulo de cono, según se muestran en la Tabla 4. Los resultados presentados se obtuvieron con un único valor de amortiguación de turbulencia, $\delta = 1e - 6$.

		INTERIOR				EXTERIOR				
		\dot{m}_l	ΔP	C_d	α	\dot{m}_l	ΔP	C_d	α	
Experimental	<i>Test3</i>	0.088	13.16	0.108	99	<i>Test4</i>	0.334	16.31	0.171	105
		CFD	0.088	10.2	0.123		94	0.334	15	0.178
Experimental	<i>Test6</i>	0.076	9.9	0.107	95	<i>Test5</i>	0.292	12.17	0.173	102
		CFD	0.076	7.5	0.124		93	0.292	12	0.174
Experimental	<i>Test8</i>	0.062	6.58	0.108	94	<i>Test7</i>	0.239	7.92	0.176	100
		CFD	0.062	5	0.123		92	0.239	7.8	0.177
Experimental	<i>Test12</i>	0.046	3.48	0.11	92	<i>Test11</i>	0.171	3.76	0.182	98
		CFD	0.046	2.7	0.125		89	0.171	3.8	0.181

Tabla 4: Comparación de resultados experimentales y numéricos para las diferentes pruebas.

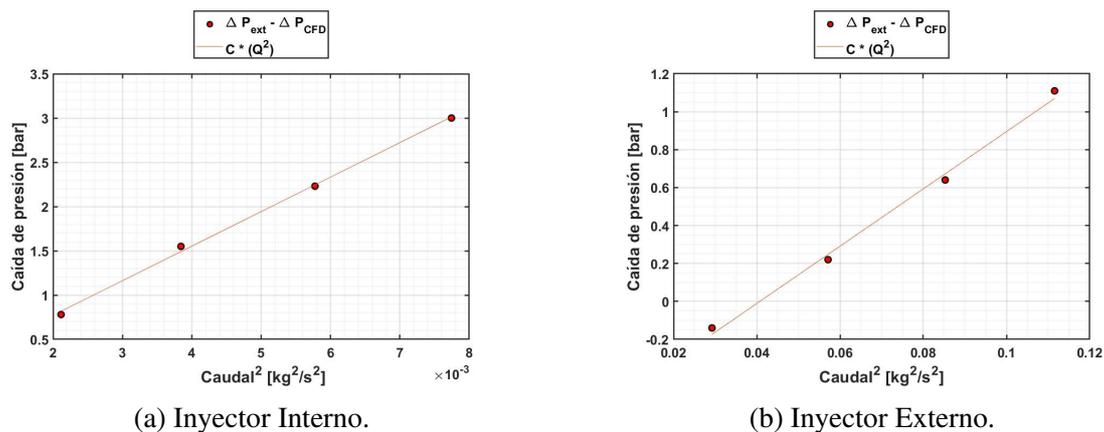


Figura 6: Diferencia de presión entra la entrada del inyector (CFD) y la medición experimental vs. el cuadrado del caudal.

Para ambos inyectores se observa una buena concordancia entre los ángulos de cono medidos y simulados. Salvo en una condición, donde la diferencia entre ambos valores es de 5° , las diferencias son menores a 2° , siempre en defecto. En cuanto a la caída de presión, en el inyector externo se observan valores muy próximos a los experimentales. Sin embargo, existen diferencias apreciables para el inyector interno. Los autores estiman que esto puede ser debido a la geometría del plato de inyección del banco de ensayos, que produce una caída de presión adicional. Para corroborar esto, la Fig. 6 presenta la relación entre la diferencia de presión (simulada/experimental) vs. el cuadrado de la velocidad en la sección de entrada. La relación lineal que existe entre ambos sugiere que existe una relación de pérdidas según describe la Ecuación de Bernoulli (White y Xue, 2021). La Fig. 7 y la Fig. 8 presentan una comparación entre los resultados experimentales, los obtenidos mediante simulaciones, y las correlaciones empíricas. Para el caso del C_d , se analizaron las correlaciones propuestas por Jones (1982) y Benjamin et al. (1998), mientras que para α se consideraron las formuladas por Rizk y Lefebvre (1987) y Benjamin et al. (1998). En ambos casos, tanto para el inyector interior como para el exterior, se observa que las correlaciones proporcionan una idea cualitativa, pero no cuantitativa, de los resultados esperados. En cambio, el modelo CFD replica de mejor manera los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

En la Fig. 9 se muestra el campo de fracción de masa de agua (*alpha.water*) para el inyector biswirl. Se observa que las láminas cónicas no se intersectan y que en el inyector interior se genera el núcleo de aire. La aparición del núcleo del aire en las simulaciones está estrechamente vinculada al valor de *turbulenceDamping*. Un valor bajo resulta en un núcleo de aire con una interfaz oscilante, mientras que un valor alto evita la formación del mismo.

Por último, se muestra el campo de velocidad sobre un corte en la sección media del inlet en la Fig. 10, donde se observa el flujo rotacional que se genera dentro del inyector.

6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se desarrolló un modelo computacional para el diseño y análisis de inyectores biswirl aplicados en propulsores aeroespaciales, enfocándose en el proceso de formación de los conos de inyección y su posterior intersección. La revisión de literatura permitió establecer el impacto cualitativo de los parámetros geométricos del inyector. Sin embargo, en términos cuantitativos no se encontró un acuerdo en las predicciones de coeficiente de descarga y ángulo

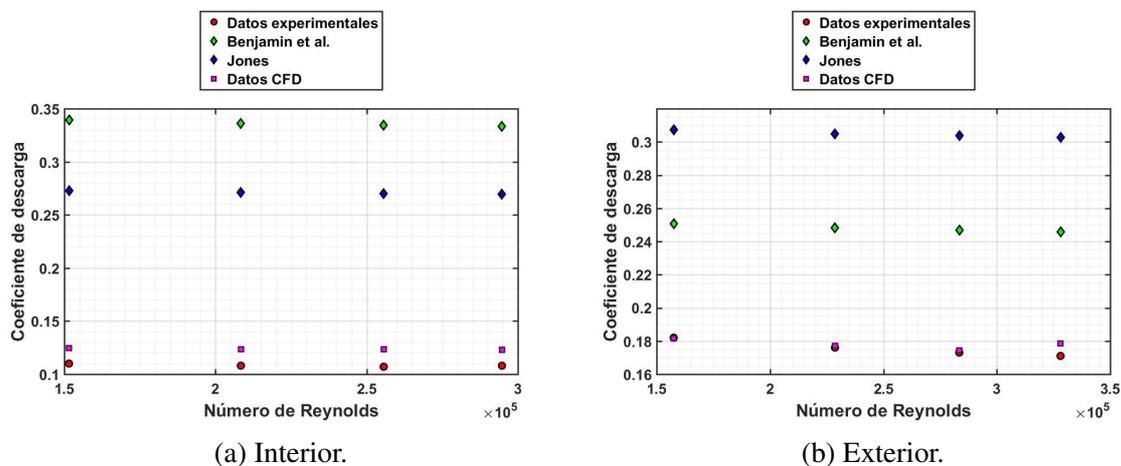


Figura 7: Coeficiente de descarga.

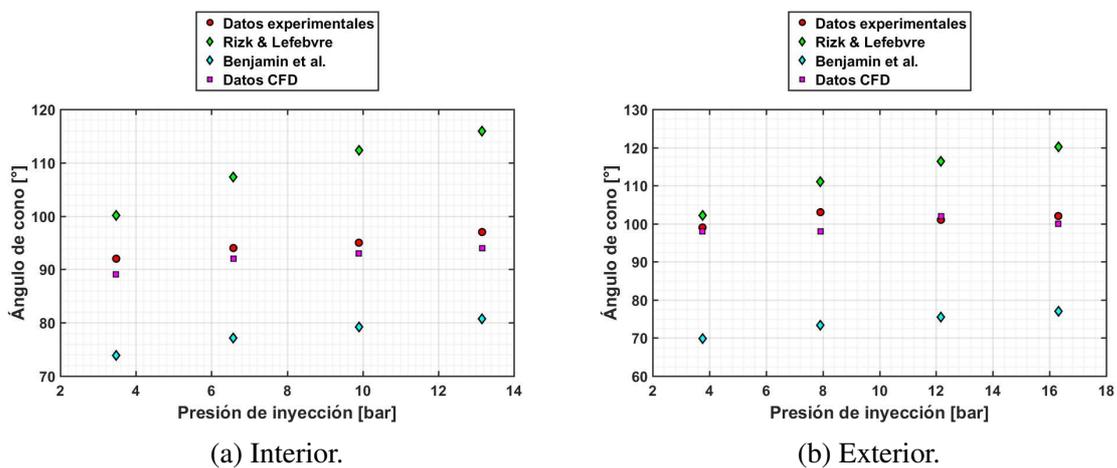


Figura 8: Ángulo de cono.

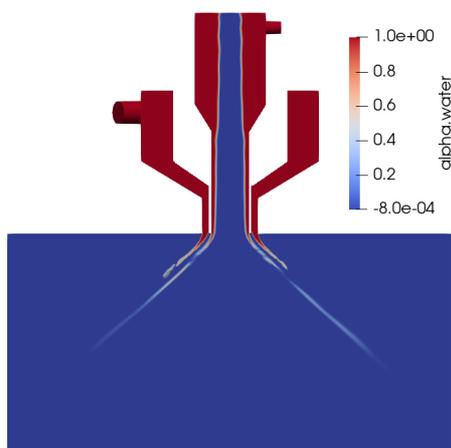


Figura 9: Campo de $\alpha.water$ para ambos inyectores

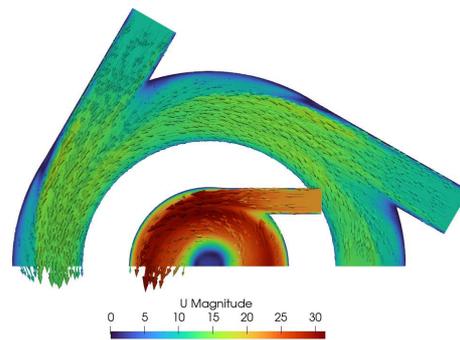


Figura 10: Campo de velocidad, en la sección media del inlet para ambos inyectores.

de inyección. Esto motivó el desarrollo de un modelo de mecánica de fluidos computacional que tuviera capacidad predictiva.

El modelo fue realizado con el método *Volume of Fluid*, implementado en OpenFOAM. Este requiere de la calibración del parámetro de amortiguación de turbulencia y su valor se determinó a partir de los resultados de mediciones realizadas en un banco de pruebas de inyectores. El proceso de calibración se consideró exitoso dado que se requirió un único valor del parámetro de turbulencia para ajustar los resultados experimentales. Por ende, se considera que el modelo desarrollado cuenta con capacidad predictiva y puede ser empleado para la optimización del inyector biswirl ensayado.

REFERENCIAS

- Amini G. Liquid flow in a simplex swirl nozzle. *International Journal of Multiphase Flow*, 79:225–235, 2016. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.09.004.
- Bazarov V., Hinckel J., y Villa Nova H. Cfd analysis of swirl atomizers. *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference amp; amp; Exhibit*, 2008. doi: 10.2514/6.2008-5229.
- Benjamin M., Mansour A., Samant U., Jha S., Liao Y., Harris T., y Jeng S. *Film thickness, droplet size measurements and correlations for large pressure-swirl atomizers*, volumen 78644. American Society of Mechanical Engineers, 1998.
- CFD Direct. The pimple algorithm. <https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/the-pimple-algorithm>, 2024. Accessed: 2024-07-10.
- da Silva Couto H., Lacava P.T., Bastos-Netto D., y Pimenta A.P. Experimental evaluation of a low pressure-swirl atomizer applied engineering design procedure. *Journal of Propulsion and Power*, 25(2):358–364, 2009. doi:10.2514/1.37018.
- Damian S.M. Description and utilization of interfoam multiphase solver. *International Center for Computational Methods in Engineering*, páginas 1–64, 2012.
- Frederix E., Mathur A., Dovizio D., Geurts B., y Komen E. Reynolds-averaged modeling of turbulence damping near a large-scale interface in two-phase flow. *Nuclear Engineering and Design*, 333:122–130, 2018.
- Ghorbanian K., Ashjaee M., Soltani M., Mesbahi M., y Morad M. Experimental flow visualization of single swirl spray pattern at various pressure drops. *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2003. doi:10.2514/6.2003-4758.
- Greenshields C. Interface capturing in openfoam. 2021.
- Heinrich M. y Schwarze R. 3d-coupling of volume-of-fluid and lagrangian particle tracking for spray atomization simulation in openfoam. *SoftwareX*, 11:100483, 2020. doi:10.1016/j.

- softx.2020.100483.
- Hutt J.J. *A study of design details of rocket engine swirl injection elements*. The Pennsylvania State University, 2000.
- Jeng S.M., Jog M.A., y Benjamin M.A. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle. *AIAA Journal*, 36(2):201–207, 1998. doi:10.2514/2.7502.
- Jones G.W. L. e. lynnjr and d. de f. whitman, the president as policymaker, temple university press, 1981, xiii and 351 pp., 19,95cloth(9.95 paper). *Journal of Public Policy*, 2(2):181–182, 1982. doi:10.1017/S0143814X00005493.
- Kalitzin G., Medic G., Iaccarino G., y Durbin P. Near-wall behavior of rans turbulence models and implications for wall functions. *Journal of Computational Physics*, 204(1):265–291, 2005.
- Kang Z., Wang Z.g., Li Q., y Cheng P. Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine. *Acta Astronautica*, 145:174–198, 2018. doi:10.1016/j.actaastro.2017.12.038.
- Ketabdari M.J. Free surface flow simulation using vof method. *Numerical Simulation - From Brain Imaging to Turbulent Flows*, 2016. doi:10.5772/64161.
- Kumar G.D. y Agarwal A.G. Design and numerical analysis of double-base swirl injector for ethanol/hydrogen-peroxide based liquid propellant rocket engine. Informe Técnico, SAE Technical Paper, 2024.
- Lee E.J., Oh S.Y., Kim H.Y., James S.C., y Yoon S.S. Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8):1475–1483, 2010. doi:10.1016/j.expthermflusci.2010.07.010.
- Li X.Y., Zhang Z.D., Qian H., y Cheng Q. Cfd numerical simulation of internal flow for electronic gasoline injector. *Applied Mechanics and Materials*, 97:745–751, 2011.
- Long M., Anderson W., y Humble R. Bicentrifugal swirl injector development for hydrogen peroxide and non-toxic hypergolic miscible fuels. *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference amp; amp; amp; Exhibit*, 2002. doi:10.2514/6.2002-4026.
- Prades L., Fabbri S., Dorado A.D., Gamisans X., Stoodley P., y Picioeanu C. Computational and experimental investigation of biofilm disruption dynamics induced by high-velocity gas jet impingement. *mBio*, 11(1), 2020. doi:10.1128/mbio.02813-19.
- Rashid M.S., Hamid A.H., Sheng O.C., y Ghaffar Z.A. Effect of inlet slot number on the spray cone angle and discharge coefficient of swirl atomizer. *Procedia Engineering*, 41:1781–1786, 2012. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.383.
- Rizk N. y Lefebvre A. Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 4(1-2):65–74, 1987.
- Sakman A.T., Jog M.A., Jeng S.M., y Benjamin M.A. Parametric study of simplex fuel nozzle internal flow and performance. *AIAA Journal*, 38(7):1214–1218, 2000. doi:10.2514/2.1090.
- White F.M. y Xue H. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education, 9th edición, 2021. ISBN 9781260258318.
- Xue J., Jog M., Jeng S.M., Steinthorsson E., y Benjamin M. Computational model to predict flow in simplex fuel atomizer. página 3710, 2002.
- Xue J., Jog M.A., Jeng S.M., Steinthorsson E., y Benjamin M.A. Effect of geometric parameters on simplex atomizer performance. *AIAA Journal*, 42(12):2408–2415, 2004. doi:10.2514/1.2983.
- Yang L.j., Fu Q., Zhang W., Du M.l., y Tong M.x. Atomization of gelled propellants from swirl injectors with leaf spring in swirl chamber. *Atomization and Sprays*, 21(11):949–969, 2011.

doi:10.1615/atomizspr.2012004646.

Yang L.j., Fu Q.f., Qu Y.y., Zhang W., Du M.l., y Xu B.r. Spray characteristics of gelled propellants in swirl injectors. *Fuel*, 97:253–261, 2012. doi:10.1016/j.fuel.2012.02.036.