

ESTUDIO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE INYECTORES CENTRÍFUGOS

Julio R. Ronceros Rivas^a, Amilcar Porto Pimenta^a, Wilmer Jara Velásquez^b

^a *Instituto Tecnológico de Aeronáutica, División de Ingeniería Aeronáutica, Comando General de Tecnología Aeroespacial, Praça Marechal Eduardo Gomes 50, Vila Das Acacias, São José Dos Campos, São Paulo, Brasil, 12228-900, julio_8216@hotmail.com, amilcar@ita.br*

^b *Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Avenida Los Maestros s/n, Ica-Perú, .wjara1@hotmail.com.*

Palabras clave: Inyector centrífugo, modelo matemático, método VOF.

Resumen. Este trabajo muestra las técnicas y procedimientos de cálculo en el diseño de inyectores centrífugos empleados en cámaras de combustión de uso aeronáutico y aeroespacial; donde a través de criterios de simplificación en las ecuaciones de gobierno, se busca obtener un modelo matemático que relacione los principales parámetros de desempeño de este complejo dispositivo de gran importancia en la atomización de combustibles. Es importante resaltar que el presente trabajo muestra también la utilización de técnicas de mecánica de fluidos computacional CFD “Computational fluid dynamics”, siendo empleado el código comercial CFD Fluent en la simulación del comportamiento del flujo en el interior del inyector, cuya simulación se realizó en una malla estructurada tridimensional y empleando el método VOF “Volume of fluid” para la localización de la interface entre fluidos inmiscibles, el cual nos brindará una información más detallada en el análisis de los fenómenos físicos en cada punto del inyector. El presente modelo matemático será validado también a través de datos experimentales, buscando así la confianza en su aplicación en el diseño de inyectores con las características y parámetros de desempeño requeridos, teniendo en cuenta que del correcto funcionamiento de estos dispositivos de atomización, dependerá la eficiencia de todo el sistema.

NOMENCLATURA

F	Área [m^2]
P	Presión [$kg/m.s^2$]
U,W	Velocidad [m/s]
ρ	Masa específica [kg/m^3]
ν	Viscosidad cinemática [m^2/s]

SUBÍNDICES

a	Relativo al “air core”;
c	referente al inyector centrífugo cónico;
ent	entrada del inyector;
E	referente a la viscosidad del líquido o equivalencia;
inj	referente a los centroides de las secciones de área de los canales de entrada;
p	referente a los “pórticos” o canales de entrada;
r	componente radial;
sal	salida del inyector;
S	referente a la cámara de “swirl” o de vórtices.
θ	componente tangencial;
z	componente axial.

1 INTRODUCCIÓN

La atomización es de suma importancia en los motores de uso aeronáutico y aeroespacial, donde es usado con frecuencia el inyector “centrífugo”; el cual está basado en la conservación de movimiento angular y cuyo principio de funcionamiento consiste en comunicar un movimiento de rotación al fluido a través de un cierto número de canales, aumentando de esta forma la componente tangencial de velocidad, desde su entrada hasta su expulsión en forma de pequeñas gotas contenidas en una superficie aproximadamente cónica, denominada de “*spray*”, consiguiendo de esta manera, mayor superficie de quema del combustible.

La eficiencia de los inyectores está directamente relacionada con la combustión completa del combustible y la calidad de pulverización, medida de acuerdo al tamaño medio de gota y desvíos en torno a este promedio (uniformidad), los cuales dependen de la propiedad del combustible, configuración geométrica del inyector y de los parámetros nominales de éste, tales como el coeficiente de descarga, ángulo de “*spray*”, flujo másico, diferencial de presión y diámetro del “air core” (espacio aproximadamente cilíndrico de aire, formado en el interior de la cámara de *swirl* del inyector).

En los inyectores centrífugos existen ciertas diferencias según la geometría que presentan en sus canales de entrada, los cuales pueden ser clasificados como inyectores centrífugos cónicos, tangenciales y helicoidales (Rivas, 2009). Una muestra de inyector cónico es aquel utilizado en el motor aeronáutico “JT8” Pratt & Whitney, cuyo modelo matemático generó gran interés en su posible aplicación en otros inyectores centrífugos, mediante la variación de ciertos parámetros. Cabe mencionar que en este trabajo fue empleado también el inyector centrífugo de oxidante del motor cohete ruso RD-0109, cuya característica geométrica se basa en la posición tangencial de los canales de

entrada respecto al diámetro de la cámara de *swirl*, el cual fue estudiado experimentalmente en el trabajo de Souza, 2001; el inyector centrífugo de oxidante en conjunto con el inyector centrífugo de combustible conforman el inyector centrífugo bipropelente del motor cohete RD-0109, el cual será motivo de estudios posteriores.

2 MODELO MATEMÁTICO

Este modelo emplea la teoría de G. N. Abramovich, en complemento con la teoría de Kliachko (Khavkin, 2004), este modelo tuvo su aplicación en el estudio de un inyector centrífugo “cónico” (Rivas, 2009), denominado así por la distribución de sus canales de entrada sobre una superficie cónica, la cual es la superficie de la pared de cámara de vórtices, ver Figura 1.a. Este modelo se basó en los ángulos: “ ψ ”, llamado de ángulo de hélice (Reddy and Mishra, 2008), y “ β ”, llamado ángulo de *swirl* (Hansen and Madsen, 2001); la representación de estos ángulos es mostrada en la Figura 1.b, los cuales fueron ubicados estratégicamente para su inserción en la ecuación de cantidad de movimiento angular, obteniéndose así, un modelo matemático aplicable también en los inyectores centrífugos de entradas tangenciales.

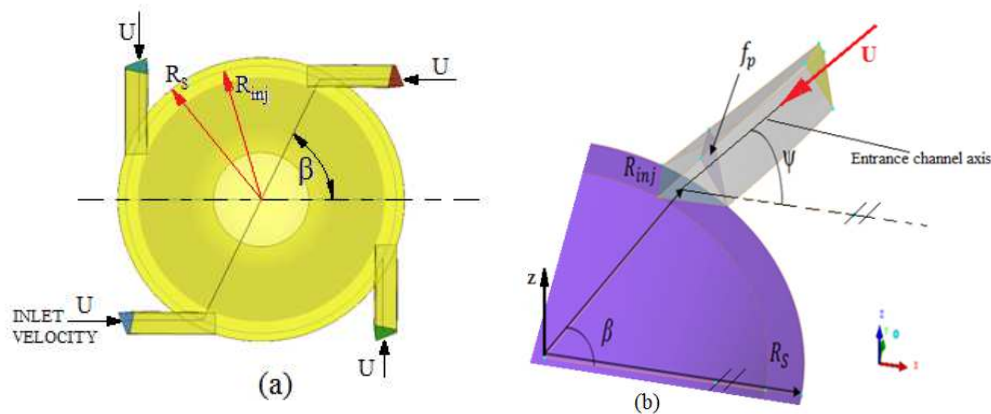


Figura 1. a) Vista de los canales de entrada y pared de cámara de vórtices; b) Visualización de los ángulos “ ψ ” y “ β ”; y área de sección transversal del canal de entrada, f_p .

De la Figura 1.b, podemos descomponer la velocidad de entrada, en función de los ángulos “ ψ ” y “ β ”, en las componentes: axial, radial y tangencial, mostradas a continuación en las ecuaciones (1.a), (1.b) y (1.c), respectivamente.

$$W_{z_{ent}} = U_{ent} \cdot \text{sen} \psi \quad (1.a)$$

$$W_{r_{ent}} = U_{ent} \cos \psi \cdot \cos \beta \quad (1.b)$$

$$W_{\theta_{ent}} = U_{ent} \cos \psi \cdot \text{sen} \beta \quad (1.c)$$

Además, considerando velocidad axial uniforme, (ver Ec. (2)); en la sección toroidal a la salida del inyector (Figura 2) y aplicando en esta región la ecuación de conservación de movimiento angular (véase Ec. (3)), tenemos la componente tangencial influenciada por el coeficiente de pérdidas debido a la viscosidad del líquido “K”

(Kessaev and Kupatenkov, 1997), donde R_{inj} , es la distancia del eje del inyector hasta el eje de uno de los canales de entrada; siendo r_o y r_a , los radios del orificio de salida y del “air core”, respectivamente; y ρ , la densidad del líquido (Rivas, 2009).

$$W_{z_{sal}} = \frac{\dot{m}}{\rho\pi(r_o^2 - r_a^2)} \quad (2)$$

$$KR_{inj}W_{\theta_{ent}} = r_{sal}W_{\theta_{sal}} \quad (3)$$

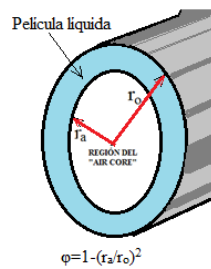


Figura 2. Visualización del filme líquido y de la región del “air core”.

Aplicando la ecuación de Bernoulli en “ r_a ”, (véase Ec. (4)), es negligenciada la componente radial en la interfase “líquido-aire” (Lefebvre, 1989); luego ordenando esta ecuación en forma conveniente, tenemos el coeficiente de descarga “ C_d ” (Ec. (5)). Además del semi-ángulo del “spray” (α), expresado mediante la función seno (Ec. (6)), donde ϕ , es el coeficiente que relaciona el área toroidal con el área total en la sección de salida del inyector, expresada por la relación ($\phi = 1 - (r_a/r_o)^2$), y siendo n , el número de canales de entrada.

$$\Delta P = \rho \frac{W_{z_{r_a}}^2}{2} + \rho \frac{W_{\theta_{r_a}}^2}{2} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\phi^2} + \frac{(AK \cos \psi \cdot \text{sen} \beta)^2}{1 - \phi}}} \quad (5)$$

$$\text{sen} \alpha = \frac{2AKC_d \cos \psi \cdot \text{sen} \beta}{1 + \sqrt{1 - \phi}} \quad (6)$$

2.1 Consideraciones asumiendo líquido ideal ($K=1$)

Es considerado el líquido ideal como incompresible, con movimiento permanente a lo largo de una línea de corriente, sin rozamiento y viscosidad nula ($K=1$). Luego el modo estable de operación del inyector acontece cuando el coeficiente de descarga es máximo (Souza, 2001), obteniéndose el número de Abramovich para un inyector centrífugo cónico “ A_c ” (ver Ec. (7)), coeficiente de descarga (Ec. (8)) y semi-ángulo de “spray” (Ec. (9)) en función de “ ϕ ”, (Rivas et al. 2010b, a).

$$A_c = \frac{\pi \cdot r_o R_{inj} \cos \psi \cdot \text{sen} \beta}{n \cdot f_p} = \frac{\sqrt{2}(1-\varphi)}{\varphi \sqrt{\varphi}} \quad (7)$$

$$C_d = \sqrt{\frac{\varphi^3}{2-\varphi}} \quad (8)$$

$$\text{sen} \alpha = \frac{2\sqrt{2}(1-\varphi)}{(1+\sqrt{1-\varphi})\sqrt{2-\varphi}} \quad (9)$$

2.2 Consideraciones asumiendo viscosidad del líquido.

El número equivalente de Kliachko, a diferencia del Número de Abramovich, considera las pérdidas por viscosidad del líquido, relacionado con el factor “K”, ($K=A_E/A_C$), este parámetro puede expresarse mediante la Ec. (10), donde es insertado el coeficiente de rozamiento de Blasius ($\lambda=0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$) y puede expresarse en función de “ φ_E ”, (coeficiente equivalente de “ φ ”, considerando la viscosidad del líquido).

$$A_E = \frac{A_c}{1 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\pi \cdot R_{inj}^2}{n \cdot f_p} - A_c \right)} = \frac{\sqrt{2}(1-\varphi_E)}{\varphi_E \sqrt{\varphi_E}} \quad (10)$$

Donde:

$$\text{Re} = \frac{U_{ent} \cdot D_E}{\nu}$$

D_E Diámetro equivalente de los canales de entrada,

ν : Viscosidad cinemática del líquido.

Relacionando estos términos se llega a obtener el coeficiente de descarga (Ec. (11)) y semi-ángulo de “spray” (Ec. (12)) equivalentes, en función de φ_E :

$$C_{dE} \cong \sqrt{\frac{\varphi_E^3}{2-\varphi_E}} \quad (11)$$

$$\text{sen} \alpha_E \cong \frac{2\sqrt{2}(1-\varphi_E)}{(1+\sqrt{1-\varphi_E})\sqrt{2-\varphi_E}} \quad (12)$$

3 SIMULACIÓN NUMÉRICA

La geometría del inyector de oxidante del motor RD-0109, presenta seis entradas tangenciales, siendo utilizada en este caso el tipo de malla estructurada para modelar el

circuito interno (Figura 3); la cual presenta un refinamiento en las paredes y mayor costo computacional para lograr la convergencia, y complejidad en la construcción del dominio computacional; sin embargo presenta la ventaja de una mejor visualización de la interfase líquido/gas, la cual facilita la medición del ángulo de spray y del espesor de la película líquida formada en la salida del inyector (Rivas et al, 2012). Esta malla contiene 644919 elementos y 661832 nodos. La malla estructurada que representa el circuito interno del inyector centrífugo cónico “JT8” contiene 632746 elementos y 657884 nodos (Figura 4).

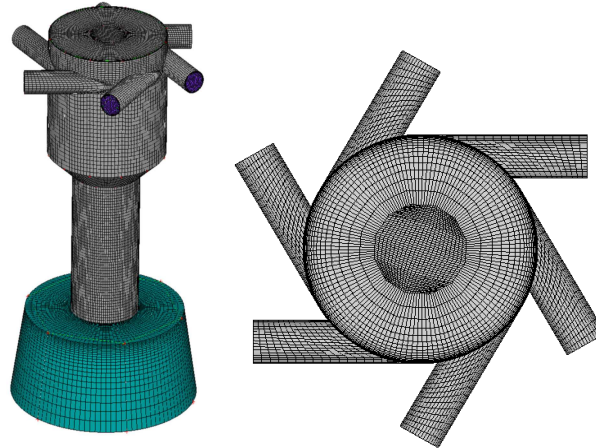


Figura 3. Malla estructurada del dominio del inyector centrífugo tangencial de oxidante del motor cohete RD- 0109, en vista de perspectiva (izquierda) y de planta (derecha).

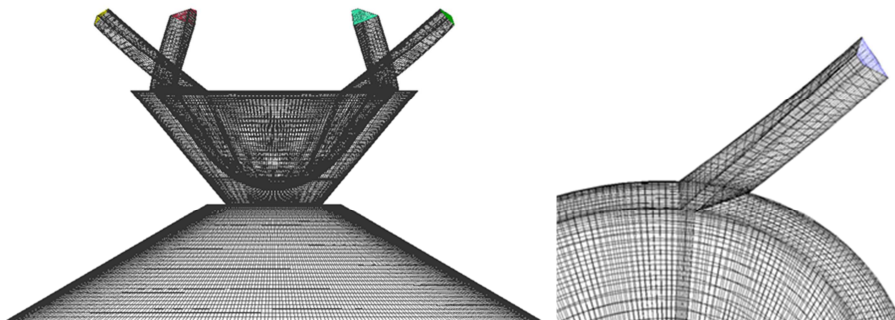


Figura 4. Izquierda, malla estructurada del dominio del inyector centrífugo cónico del motor “JT8” Pratt & Whitney, y a la derecha, vista de uno de los canales de entrada.

Las medidas geométricas consideradas en la creación de las mallas de los inyectores centrífugos son mostradas en el cuadro 1:

Principales medidas geométricas	Inyector de oxidante RD-0109	Inyector cónico “JT8”
Ángulo de swirl, β (°)	90	66
Ángulo de hélice, ψ (°)	0	34.25
Área de sección transversal del canal de entrada, f_p (mm ²)	2.27	0.136
Número de canales, n	6	4
Radio de distribución de los canales de entrada, R_{ini} (mm)	3.7	2.848
Radio de la cámara de swirl, R_s (mm)	4.5	3.0
Radio del orificio de salida, r_o (mm)	2.55	1.0

Cuadro 1: Medidas de los inyectores centrífugos “RD-0109” y “JT8”.

El software Comercial de CFD Fluent® 6.3.26, presenta modelos multifase del tipo Euler-Euler, de los cuales fue utilizado el modelo Volume of fluid (VOF) de [Hirt and Nichols \(1981\)](#); el cual considera que el volumen de una fase no puede ser ocupada por la otra, surgiendo así el concepto de fracción volumétrica de fase, siendo la suma de estas fracciones equivalente a la unidad; los fluidos incompresibles constituyen una de las aplicaciones más importantes y complejas de la Mecánica de fluidos, aun así cuando el fluido es isotérmico, las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento resultan independientes, empleándose diversos algoritmos de corrección llamados de acoplamiento de presión-velocidad; siendo utilizado en este trabajo, el método “Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) de [Patankar \(1980\)](#). En esta simulación fue empleado el modelo turbulento k-epsilon estándar en régimen permanente; en lo que respecta a las condiciones de pared, fue considerada la condición de no deslizamiento (no slip) y en la salida, fue asumida la presión atmosférica manométrica igual a cero. Las ecuaciones de gobierno utilizadas (continuidad, momento), así como para los escalares (fracción volumétrica, modelo k-ε) son derivadas de la ecuación general de transporte para fluidos multifásicos (Ec. (13)), donde para representar la fracción volumétrica será empleado el término “α”.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho\Phi)_m + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i\Phi)_m = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x_i})_m + (\alpha S_\Phi)_m + \sum_{n=1}^{N_p} c_{\Phi, mn}(\Phi_n - \Phi_m) + \sum_{n=1}^{N_p} c_{\Phi, mn}(\dot{m}_{mn}\Phi_n - \dot{m}_{nm}\Phi_m) \quad (13)$$

Donde:

- α: Fracción volumétrica de fluido.
- Φ: Escalar.
- ρ: Densidad
- u_i: Componente de velocidad en la dirección i.
- Γ_Φ: Coeficiente de difusión para un escalar Φ.
- S_Φ: Término fuente para un escalar Φ.
- N_p: Número total de fases.
- c_{Φ, mn}: Coeficiente de transferencia de masa entre las fases m e n.
- \dot{m}_{mn} : Variación de masa por unidad de volumen, de fase m para fase n.

4 RESULTADOS

A continuación serán mostrados los resultados obtenidos del modelo matemático (asumiendo pérdidas por viscosidad), de la simulación numérica (modelo turbulento k-

ε) y de datos experimentales, teniendo en cuenta los parámetros nominales de los inyectores centrífugos (cuadro 2); los líquidos de trabajo utilizados en los respectivos inyectores centrífugos son mostrados en el cuadro 3.

Parámetros nominales	Inyector de oxidante RD-0109	Inyector cónico "JT8"
Flujo másico, (kg/s)	0.173	0.010
Presión de inyección, ΔP (kPa)	440	500
Ángulo de pulverización, 2α (°)	80	125

Cuadro 2: Parámetros nominales de los inyectores centrífugos "RD-0109" (fuente: Souza, 2001) y "JT8" (fuente: Rivas 2009).

Propiedades del líquido utilizado	Inyector de oxidante RD-0109/agua	Inyector cónico "JT8"/agua destilada
Masa específica (kg/m ³)	998	992
Viscosidad cinemática (m ² /s)	$1,0282 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$

Cuadro 3: Propiedades físicas del agua y del agua destilada.

En la Figura 5, es mostrado el flujo másico en función del diferencial de presión para el inyector centrífugo tangencial, donde se puede observar una buena aproximación del modelo turbulento k- ε , con respecto a los datos experimentales conforme aumenta el flujo másico, y por ende el número de Reynolds. Sin embargo el modelo matemático sólo presenta resultados aproximados a los de la simulación numérica en lo que se refiere a su utilización para menores números de Reynolds.

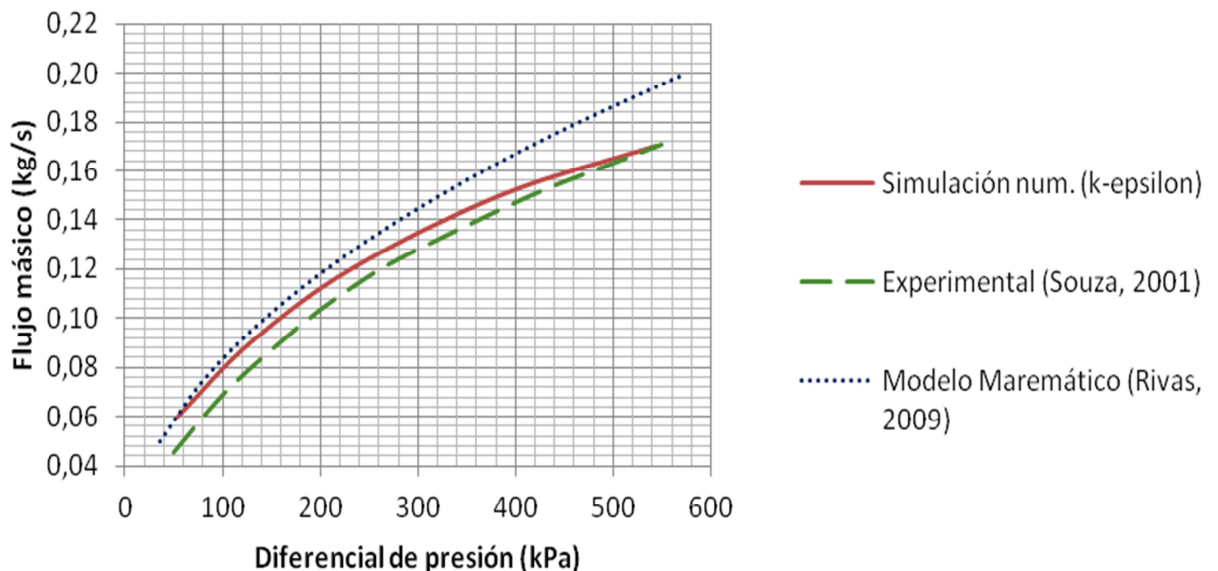


Figura 5. Comparación del diferencial de presión respecto al flujo másico, inyector de oxidante RD-0109.

En la Figura 6, es mostrado el flujo másico en función del diferencial de presión para el inyector centrífugo cónico, donde se puede observar una mejoría tanto del modelo matemático como de la simulación numérica (modelo turbulento k- ϵ), con respecto a los datos experimentales de Venson et al (2010).

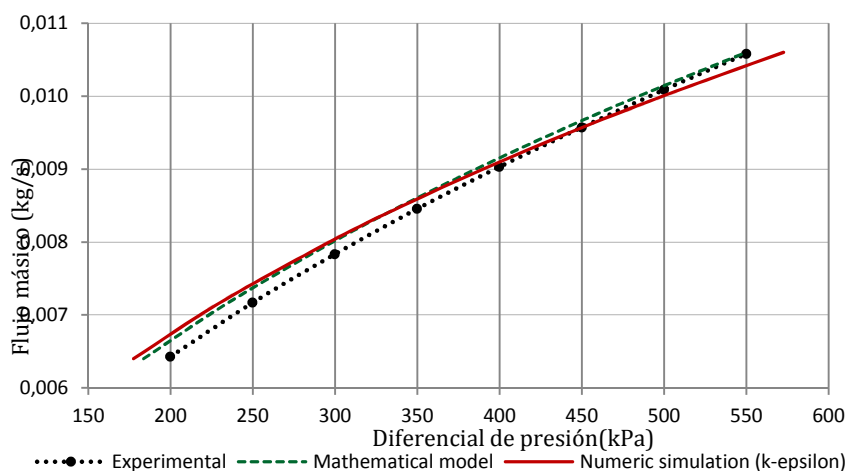


Figura 6. Comparación del diferencial de presión respecto al flujo másico (JT-8).

En la Figura 7, se muestra el inyector centrífugo RD-0109 en plano vertical y vista de planta donde se puede visualizar que la presión cae radialmente conforme el flujo se aproxima al eje del inyector, y que las pérdidas de presión no son tan significativas en los canales de entrada. Similarmente ocurren los mismos fenómenos en el inyector cónico “JT8” (Figura 8). Debido al “vacío” que existe en la región del “air core” en ambos inyectores, las partículas de aire son direccionadas hacia dentro del inyector, las cuales recirculan para luego ser arrastradas hacia afuera, teniendo lugar este fenómeno en la interfase líquido-aire, tal como se puede observar en las Figuras 9 y 10. (Vectores de color rojo representan al agua, en cuanto que los de azul, al aire).

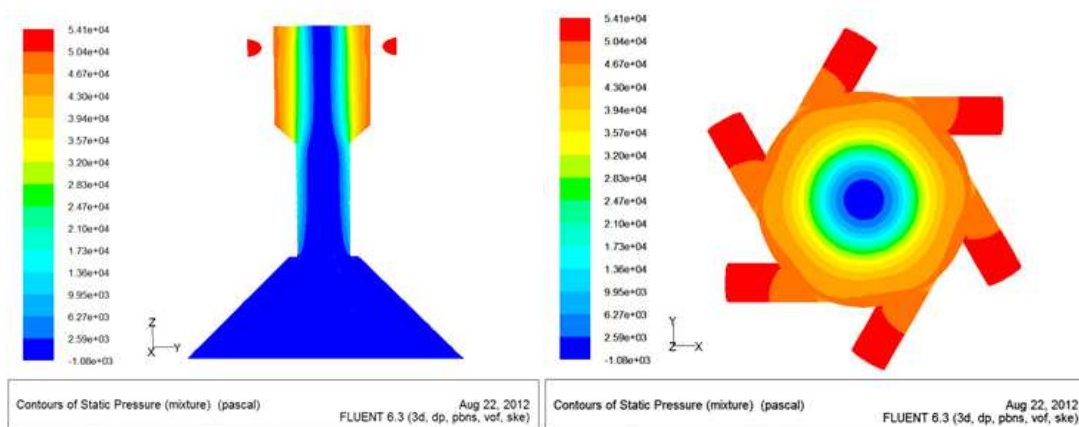


Figura 7. Caída de presión en el inyector RD-0109, modelo k- ϵ . ($m=0,06$ kg/s), A la derecha en plano vertical e izquierda en vista de planta.

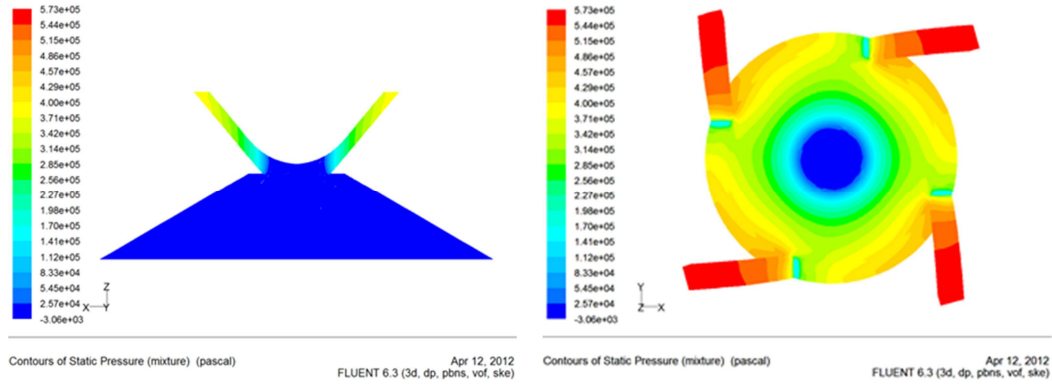


Figura 8. Caída de presión en el inyector JT8, modelo $k-\varepsilon$. ($m=0,0106$ kg/s), A la derecha en plano vertical e izquierda en vista de planta.

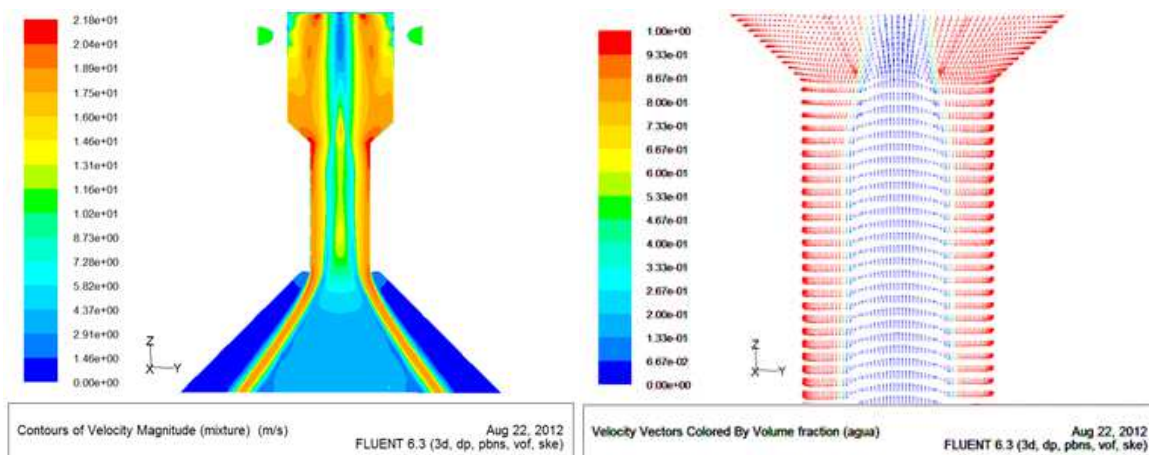


Figura 9. Izquierda, contorno del campo de velocidades; derecha, vectores de velocidad en la interfase agua/aire del inyector RD-0109 (modelo $k-\varepsilon$, $m=0,15$ kg/s).

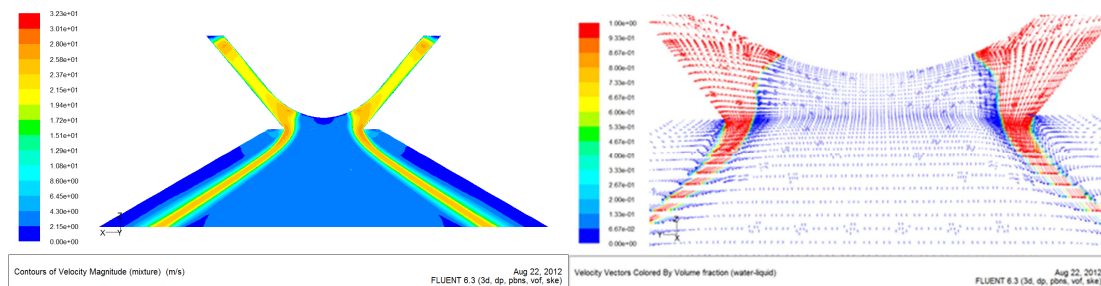


Figura 10. Izquierda, contorno del campo de velocidades; derecha, vectores de velocidad en la interfase agua/aire del inyector JT8 (modelo $k-\varepsilon$, $m=0,012$ kg/s).

En las Figuras 11 y 12, se visualizan las interfaces entre el líquido y el gas, la región del “air core” y del ángulo de spray, mediante el modelo VOF, notándose que el ángulo de spray crece conforme aumenta el flujo másico, en cuanto que el espesor de la película de líquido disminuye para valores del Número de Reynolds cada vez mayores. En el cuadro 4, son tabulados los valores del ángulo de spray y del espesor de la película líquida, siendo éste último medido en la sección del orificio de descarga del inyector.

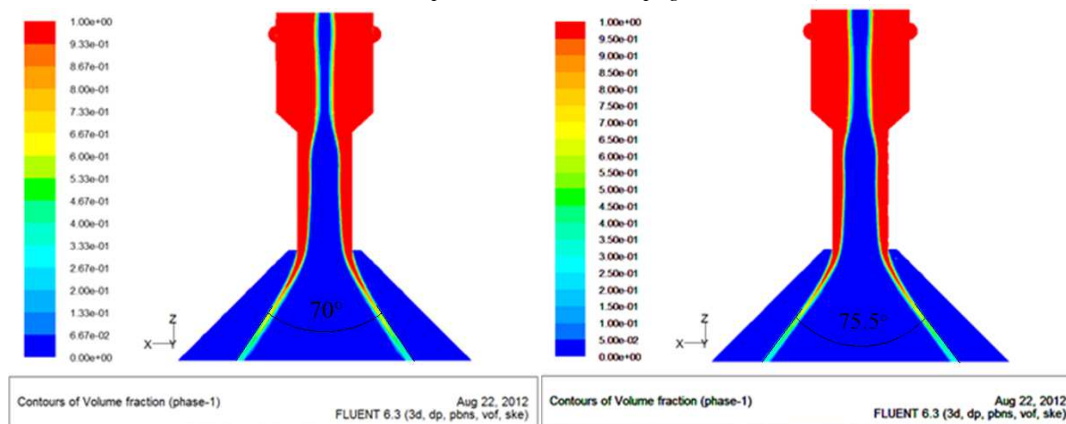


Figura 11. Visualización del ángulo de spray y espesura de la película líquida en el inyector RD-0109 empleando el modelo VOF, para $m=0.09$ kg/s (izquierda) y $m=0.17$ kg/s (derecha).

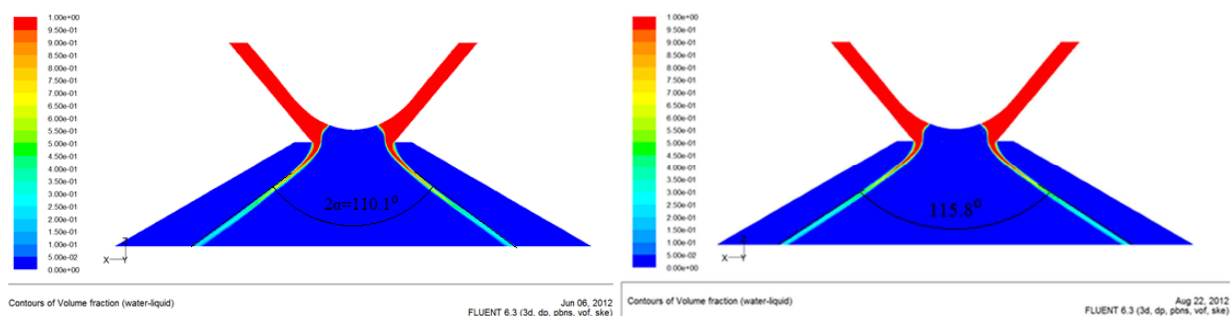


Figura 12. Visualización del ángulo de spray y espesura de la película líquida en el inyector JT 8, (modelo VOF), para $m=0.008$ kg/s (izquierda) y $m=0,0106$ kg/s (derecha).

Inyector centrífugo de oxidante RD-0109	Simulación numérica (k-e)		Modelo matemático presente	
	Ángulo de spray (°)	película líquida (mm)	Ángulo de spray (°)	película líquida (mm)
$m=0.09$ kg/s	70.0	0.83	79.84	0,769
$m=0.17$ kg/s	75.5	0.78	79.86	0,765
Inyector centrífugo cónico "JT8"	Simulación numérica (k-e)		Modelo matemático presente	
	Ángulo de spray (°)	película líquida (mm)	Ángulo de spray (°)	película líquida (mm)
$m=0.008$ kg/s	110.1	0.150	116.11	0.145
$m=0.0106$ kg/s	115.8	0.146	116.68	0.141

Cuadro 4. Comparación del espesor de la película líquida y del ángulo de spray.

5 CONCLUSIONES

Los resultados del modelo matemático desarrollado en este trabajo mostraron satisfacción y confianza en su utilización; resaltando la importancia del factor “ $\cos\psi \cdot \sin\beta$ ”, como un factor de corrección o de ajuste (Rivas, 2009). Siendo demostrado que el modelo se ajusta en los casos de inyectores centrífugos tangenciales y cónicos, garantizando obtener los parámetros de desempeño útiles en el diseño de inyectores centrífugos según el funcionamiento que se requiera.

La utilización de mallas estructuradas en la simulación numérica, proporciona un mejor entendimiento del comportamiento del flujo interno en el inyector centrífugo, mostrando una mejor visualización de los fenómenos que acontecen dentro y fuera del inyector, además de facilitar las mediciones del ángulo de spray y espesor de la película líquida con buenas aproximaciones utilizando el modelo VOF y el modelo de viscosidad turbulenta k- ϵ estándar, el cual es de gran utilidad en estos casos de turbulencia. La malla estructurada presenta claras ventajas en la localización de la interfase líquido/gas en comparación con la malla poliédrica, la cual fue utilizada en publicaciones anteriores (Rivas et al. 2010b, a).

Los datos obtenidos referentes al espesor de la película líquida y ángulo de *spray*, son datos iniciales importantes para el estudio de la atomización, siendo este tema la parte complementaria al estudio del comportamiento interno en el inyector expuesto en este trabajo.

6 AGRADECIMIENTOS

A la Institución CAPES, por el apoyo financiero brindado a través de todos estos años de estudio, permitiendo así que sea posible la elaboración de este trabajo.

7 REFERENCIAS

- Hansen, K.G., and Madsen, J., A computational and experimental study of the internal flow in a scaled pressure-swirl atomizer, M. S.c. Thesis, Aalborg Universitet Esbjerg, aEsbjerg, 2001.
- Hirt, C. W., and Nichols, B. D., Volume of fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, volume 39, pp. 201-225, 1981
- Kessaev, K., and Kupatnikov, V. D., Injectors design for liquid rocket engines, Apostila ministrada no Fundamental Course in Engine Design, São José dos Campos, SP: CTA/IAE/ASA-P, pp.31-49, 1997.
- Khavkin, Y. I., The theory and practice of swirl atomizers, NY, CRC Press, 2004.
- Lefebvre, A. H., Atomization and sprays, Indiana: Norman Chiegar, pp. 155-199, 1989.
- Patankar, S.V., Numerical heat transfer and mass transfer, New York: Hemisphere, 1980.
- Reddy, K. U., and Mishra, D. P., Studies on spray behavior of pressure swirl atomizer in transition regime, *Journal of Propulsion and Power*, Volume 24 (1), pp. 74-80, 2008.
- Rivas, J. R. R., Estudo e simulação numérica do escoamento no interior de um injetor centrífugo cônico, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil, 2009.
- Rivas, J. R., Pimenta, A. P., and Venson, G. G., Simulación numérica y validación experimental de un modelo matemático de un inyector de combustible centrífugo

cónico, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM, Paraíba, Brasil, 2010a.

Rivas, J. R., Pimenta, A. P., and Rivas G. R., Simulación numérica y modelo matemático de un inyector de combustible de uso aeronáutico, IX Congreso argentino de Mecánica Computacional, Buenos Aires, Argentina, 29: 5043-5054, 2010b.

Rivas, J. R., Pimenta, A. P., Rivas G. R., and Velásquez, W. J., Modelo Matemático y simulación numérica del comportamiento del flujo interno en un inyector de motor cohete a propelente líquido, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM, São Luis de Maranhão, Brasil, 2012.

Souza, J.R.P., Estudo de um injetor centrífugo bipropelente utilizado em motor foguete a propelente líquido, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil, 2001.

Venson, G.G., Pimenta A.P., Aristizabal J., Caracterização experimental de um injetor de combustível líquido do tipo cônico assistido por ar, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM, Paraíba, Brasil, 2010.