

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MODELO MATEMÁTICO DE UN INYECTOR DE COMBUSTIBLE CENTRÍFUGO CÓNICO

Julio R. Ronceros Rivas, julio_8216@hotmail.com
Amilcar Porto Pimenta, amilcar@ita.br
Giuliano Gardolinski Venson, venson@ita.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica.
Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Praça Marechal Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias.
São José dos Campos, SP, Brasil. 12228-900

Resumen: *El propósito de este trabajo es comprender los aspectos relacionados a la simulación numérica aplicada al estudio del comportamiento del flujo interno en un inyector centrífugo cónico. Los resultados serán validados mediante datos obtenidos en ensayos experimentales y un modelo matemático elaborado a partir de referencias encontradas en la literatura, obteniendo con ayuda de hipótesis simplificadas, una solución en forma cerrada de los principales parámetros nominales de desempeño del inyector, tales como coeficiente de descarga y ángulo de cono de pulverización. En la simulación numérica fue empleado el código comercial de CFD Fluent® 6.3.26, donde las ecuaciones de gobierno son discretizadas mediante volúmenes finitos en estado permanente. La corrección de presiones fue hecha empleando el algoritmo SIMPLE, Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, y para la localización de la interfase entre el medio disperso y continuo fue empleado el modelo VOF, Volume of Fluid, teniendo en cuenta el modelo viscoso k-ε standard.*

Palabras Clave: *inyector cónico, flujo multifásico, número de Abramovich, número de Kliachko.*

NOMENCLATURA

F	área [m ²];
P	presión [kg/m.s ²];
W	velocidad [m/s];
C _d	coeficiente de descarga;
A	número de Abramovich;
A _E	número equivalente de Kliachko del inyector centrífugo cónico;
K	factor debido a la disminución de la cantidad de movimiento angular por efecto de la viscosidad;
F _p	área de sección transversal total de los canales de entrada, n.fp; [m ²];
r _a	radio de la región ocupada por el aire en la salida del inyector [m];
r _o	radio del orificio de salida del inyector [m];
\dot{m}	flujo másico total a través del inyector [kg/s];

Símbolos

α	semiángulo de spray;
β	ángulo de <i>swirl</i> ;
Δ	diferencial;
γ	ángulo de conicidad;
ψ	ángulo de hélice;
λ	coeficiente de Blasius;
θ	componente tangencial en coordenadas cilíndricas;
ϕ	coeficiente que relaciona el área del espesor del líquido con el área total del orificio del inyector a la salida
	$\phi = 1 - \frac{r_a^2}{r_o^2};$
μ	Viscosidad cinemática [m ² /s];

1. INTRODUCCION

En los inyectores centrífugos cónicos, el flujo de combustible que atraviesa el interior de éste, describe una trayectoria helicoidal, adquiriendo componentes de velocidad axial, radial y tangencial. Además de tener una forma característica de incidir sobre la superficie cónica de la cámara de *swirl*, evitando la formación de velocidades normales a las paredes del inyector, consiguiendo de esta manera disminuir las pérdidas de energía cinética, ventaja que permite al motor, operar sobre un grande rango de flujos máxicos, y así adaptarse a diversos regimenes de operación, sin sensible variación del ángulo del cono de *spray* o degradación del tamaño de gota. Un modelo matemático fue elaborado a partir de referencias encontradas en la literatura rusa, obteniendo los principales parámetros nominales de desempeño del inyector, tales como el coeficiente de descarga, diferencial de presión y ángulo de pulverización. Este trabajo se basó en los ángulos: “ ψ ” llamado de ángulo de hélice (Reddy & Mishra, 2008); y “ β ”, llamado ángulo de *swirl* (Hansen & Madsen, 2001); siendo empleados en este trabajo de manera estratégica en la ecuación de cantidad de movimiento angular, obteniéndose así, un modelo matemático aplicable también para otros tipos de inyectores centrífugos. Además, de contar con la utilización de la simulación numérica realizada con el código comercial CFD Fluent® 6.3.26; buscando a través de ésta, reducir los costos de proyecto, garantizando de esta forma una combustión completa del combustible y estabilidad de la combustión. Tales resultados matemáticos serán comparados con datos experimentales obtenidos de un inyector parecido a aquel empleado en el motor aeronáutico Pratt and Whitney JT8.

2. MODELO MATEMÁTICO

Los canales de entrada de este inyector están dispuestos de manera compleja, de tal modo de originar componentes de velocidad tangencial, axial e radial en la entrada de la cámara de vórtices o de *swirl*; estos canales de entrada presentan una geometría irregular en la sección de área transversal a lo largo de su eje. En la Fig. (1), podemos observar a la izquierda los principales parámetros de la cámara de vórtice, y a la derecha los parámetros de los canales de entrada del inyector.

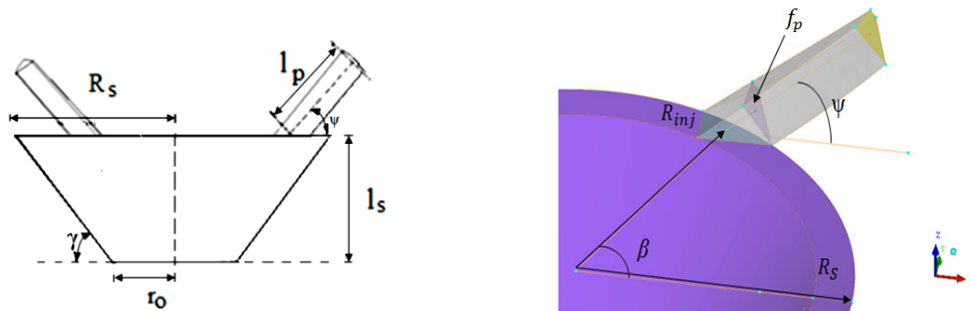


Figura 1. Visualización de la cámara de vórtice (izquierda) y Parámetros en los canales de entrada influyentes en el inyector del motor “JT8” (derecha).

Partiendo de la Fig. (1) tenemos la siguiente relación para las velocidades de entrada en el inyector centrífugo cónico (Kessaev & Kupatenkov, 1997).

$$W_{ent} = \frac{r_{in} \varphi}{\rho_L F_P} \quad (1)$$

Aplicando la ecuación de continuidad y de momento angular, respectivamente en las Eqs. (2) y (3) tendremos las relaciones a la salida del inyector (Souza, 2001), donde K, es el factor de pérdidas por viscosidad del líquido, provocando la disminución de la componente tangencial de la velocidad total a la salida del inyector y R_{inj} , es el radio de distribución de los centroides de los canales de entrada.

$$W_{e_{ra}} = \frac{r_{in} \varphi}{\rho_L \pi (r_o^2 - r_a^2)} \quad (2)$$

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

En la Eq. (4), tenemos la ecuación de Bernoulli (Lefebvre, 1989); donde ΔP , es la caída de presión en el inyector y ρ_L , es la densidad del líquido; luego de la ecuación es simplificado el término radial en el preciso momento que el líquido es expulsado del orificio de salida del inyector (Ronceros, 2009).

$$\Delta P = \rho_L \frac{W_{e_{ra}}^2}{2} + \rho_L \frac{W_{\theta_{ra}}^2}{2} \quad (4)$$

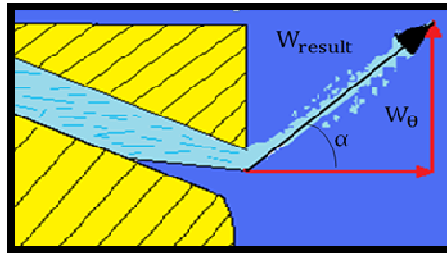


Figura 2. Vectores de velocidad a la salida del inyector y semiángulo de *spray*

Luego de la Fig. (2), podemos visualizar la salida del inyector, obteniendo el coeficiente de descarga y ángulo del cono de *spray*, respectivamente en las Eqs. (5) y (6); partiendo de la relación trigonométrica seno para calcular el ángulo del *spray*, $\text{sen}\alpha = \frac{W_{\theta}}{W_{\text{result}}}$; (Kessaev & Kupatenkov, 1997).

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

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

2.1. Consideraciones con Líquido Ideal (K = 1)

Del número de Abramovich, obtenemos el correspondiente para el inyector centrífugo cónico, A_c (Ronceros, 2009) indicada en la Eq. (7).

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

Luego de las Eqs. (5) y (6), considerando (K=1) se obtienen La ecuaciones (8) y (9) correspondientes al coeficiente de descarga y ángulo de *spray* en función de φ :

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

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

2.2. Consideraciones de Pérdidas por Efecto de la Viscosidad

Ahora consideraremos el efecto de la viscosidad del líquido (donde el factor K es diferente de la unidad), en esta sección será analizado el número de Reynolds, a través de la Eq. (10), donde es mencionado el parámetro equivalente de Kliachko, A_E (Khavkin, 2004).

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

$$Re = \frac{U_{ent} D_E}{\nu} \quad (11)$$

Donde: D_E : Diámetro equivalente de los canales de entrada; ν : Viscosidad cinemática del líquido; $\lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$: coeficiente de fricción de Blasius

Relacionando estos términos llegamos a los factores equivalentes influenciados por la viscosidad, los cuales se encuentran en función del coeficiente de “preenchimento equivalente”, φ_E :

$$C_{1E} = \sqrt{\frac{\varphi_E^3}{2 - \varphi_E}} \quad (12)$$

$$\text{sen}\alpha_E = \frac{2\sqrt{2}(1 - \varphi_E)}{(1 + \sqrt{1 - \varphi_E})\sqrt{2 - \varphi_E}} \quad (13)$$

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Con lo que respecta al pre-procesamiento fue utilizada la malla poliédrica, Fig. (3), de 40458 elementos y 187751 nodos, siendo el método de acoplamiento de presión y velocidad, el algoritmo SIMPLE, esta simulación fue hecha en estado permanente, asumiendo flujo turbulento (modelo k-epsilon), y para la captura de interfase liquido-gas; fue empleado el método VOF. Con lo que respecta a las condiciones de contorno, fue asumido un rango de flujos másicos, para las comparaciones con las caídas de presión, de los modelos matemáticos aquí propuestos, ya en las condiciones de pared, fue insertada la condición de no deslizamiento (no slip) y en lo referente a la salida, es 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 multi-fásicos, donde para representar la fracción volumétrica será empleado el término “α”.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho \phi)_m + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho u_i \phi)_m = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)_m + (\alpha S_\phi)_m + \sum_{n=1}^{N_p} c_{\phi, mn} (\phi_n - \phi_m) + \sum_{n=1}^{N_p} c_{\phi, mn} (\dot{m}_{mn} \phi_n - \dot{m}_{nm} \phi_m) \quad (14)$$

De la Eq. (14):

- φ: Escalar.
- α: Fracción volumétrica de fluido.
- ρ: Densidad
- u_i: Componente de velocidad en la dirección i.
- Γ_φ: Coeficiente de difusión para un escalar φ.
- S_φ: Terminio 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 volume, de fase m para fase n.

Las medidas geométricas consideradas en la creación de la malla del inyector son las siguientes:

- β: Ángulo de swirl (66°)
- ψ: Ángulo de hélice (34,25°)
- γ: Ángulo de conicidad (50°);
- f_p: Área de sección transversal del canal de entrada (0,136 mm²), donde F_p = f_p.n, es el área total de los canales de entrada y n, el número de canales (4);
- l_p: Longitud del canal de entrada (1,982 mm);
- l_s: Altura de la cámara de vórtice (2,4 mm);
- R_{inj}: Radio de distribución de los centroides de los canales de entrada (2,8483 mm);
- R_s: Radio de la cámara de swirl o de vórtice (3mm);
- r_o: Radio del orificio de salida del inyector (1 mm)

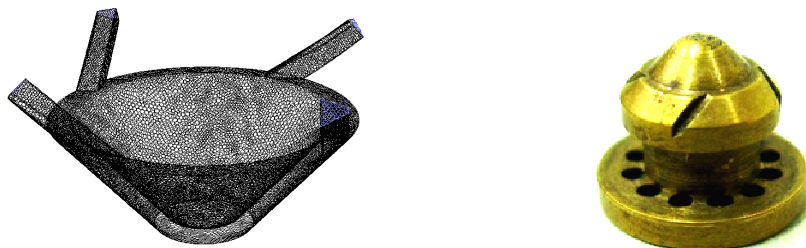


Figura 3. Malla poliédrica y circuito interno del inyector “JT8”.

4. ENSAYOS EXPERIMENTAL

Para las mediciones de flujo másico, diferencial de presión y coeficiente de descarga fue utilizado el banco de ensayos de inyectores del laboratorio de Ingeniería Aeronáutica del ITA, mostrado en la Fig. (4). Siendo el ángulo de abertura del *spray* obtenido a través fotografías digitales donde son trazadas dos líneas limítrofes al *spray* como referencia en la medición del ángulo de *spray*. Para el cálculo del coeficiente de descarga, es utilizada una balanza de precisión conectada al computador de control y un reservatorio graduado. El flujo másico es calculado a través de la variación de la masa en un intervalo de tiempo de 200s. Para la inyección del líquido es utilizado un reservatorio presurizado, donde la presión es controlada a través de un manómetro analógico, cuyo rango de medición es de 0 a 500kPa con incertidumbre de 5kPa. Para la inyección de aire es utilizada una línea de aire comprimido proveniente de un compresor externo al banco de ensayos, que también es controlada por medio de un regulador de presión.



Figura 4. Inyector Montado en el Banco de Ensayos de Inyectores

El líquido utilizado para simular el combustible es agua destilada. Donde los rangos de presión utilizados en los ensayos son de 100 a 600 kPa para la inyección del líquido. Las propiedades del agua son mostradas en la Tab. (1).

Tabla 1. Propiedades de Referencia del Líquido Utilizado

masa específica (kg/m ³)	992
tensión superficial (N.m)	0,075
viscosidad cinemática (m ² /s)	1,0282.10 ⁻⁶

5. RESULTADOS Y COMPARACIONES

A continuación en la Tab. (2), son mostrados los datos experimentales pertenecientes al artículo de Pimenta y Lima (2007), tales datos serán punto de comparación entre el modelo matemático del artículo anterior mencionado y el modelo actual propuesto.

Tabla 2. Parámetros nominales experimentales del inyector centrífugo JT8 (Pimenta e Lima, 2007)

Flujo de masa: \dot{m}_p	0,012 kg/s
Diferencial de presión: Δp	800000 Pa (8 bares)
Coefficiente de descarga: C_d	0,10 +/- 0,01
Ángulo de cono de spray: 2α	123 ° +/-1 °

En la Tab. (3), son mostrados los resultados correspondientes a los modelos matemáticos de Pimenta e Lima (2007), y de Ronceros (2009), bajo las consideraciones de líquido ideal ("sin pérdidas") y pérdidas por viscosidad, mostrando también los errores en porcentaje, con respecto a Tab. (2), donde se puede apreciar la reducción de errores, tanto para el coeficiente de descarga, así como para el ángulo de *spray* en -6% y -3.51 %, respectivamente.

Tabla 3. Resultados de los parámetros nominales del inyector "JT8" de Pimenta e Lima (2007) y Ronceros (2009).

Modelos y consideraciones.	Pimenta e Lima (2007)		Ronceros (2009)	
	Sin pérdidas	Con pérdidas	Sin pérdidas	Con pérdidas
Coefficiente de descarga, C_d	0,16	0,14	0,068	0,094
Ángulo de cono de spray, 2α	117 °	108°	125,49°	118,68°
Comparaciones de los modelos matemáticos y diferencias de errores en porcentaje				
Coefficiente de descarga, C_d	+60%	+40%	-32%	-6%
Ángulo de cono de spray, 2α	-4,87%	-12,195%	+2,024%	-3,51%

En la Fig. (5) se puede apreciar el comportamiento de la caída de presión en el inyector, donde se muestran los resultados satisfactorios en lo que se refiere al modelo turbulento $k-\epsilon$ y el modelo matemático presente (con consideración de pérdidas por viscosidad), con respecto a los datos experimentales, donde se puede visualizar que cuando aumenta el flujo másico, mayor es el número de Reynolds y la discrepancia entre los modelos mencionados.

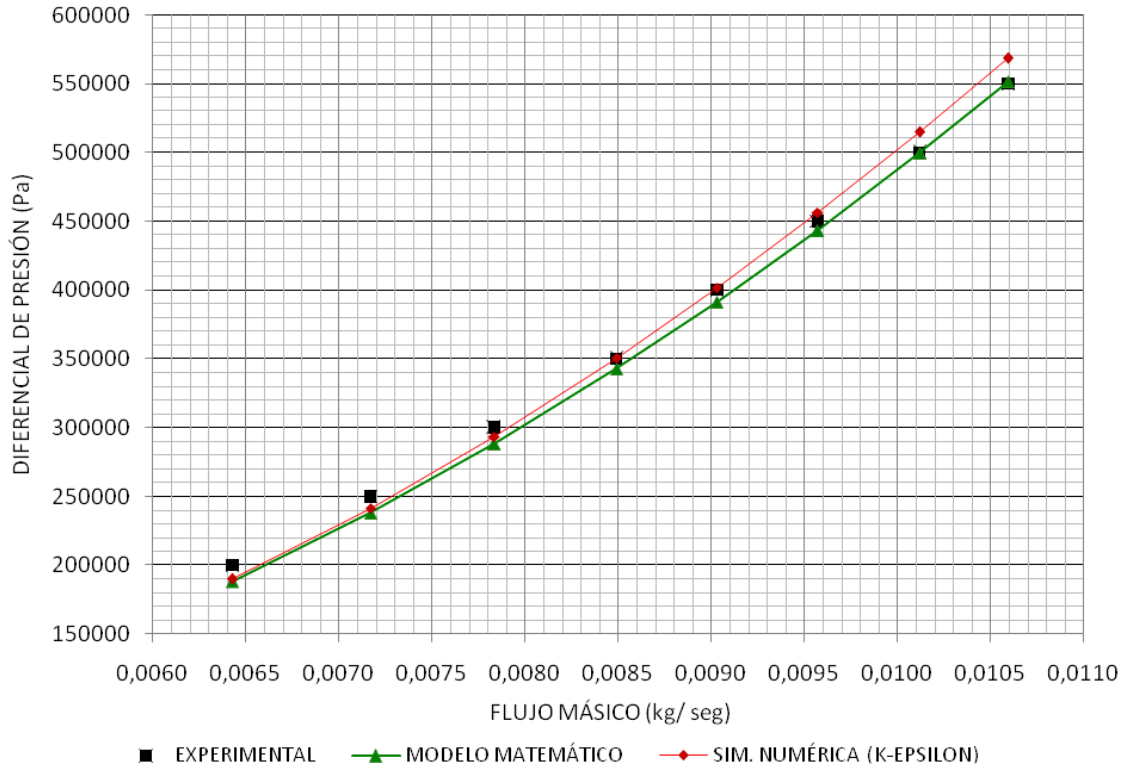


Figura 5. Comparación del flujo másico y diferencial.

En la Fig. (6), son mostrados: el contorno de presiones (lado izquierdo), donde se pueden visualizar las presiones estáticas a lo largo del mallado del circuito interno del inyector, donde podemos apreciar una caída de presión brusca al final de cada uno de los canales de entrada, debido a la expansión de sección de área encontrada por el fluido al salir del canal, este fenómeno ocasiona el aumento de la magnitud de la velocidad en tales puntos mencionados, tal hecho se puede apreciar al lado derecho de la Fig. (6), donde se distinguen los vectores en movimiento rotacional, conforme van dejando la cámara de *swirl*.

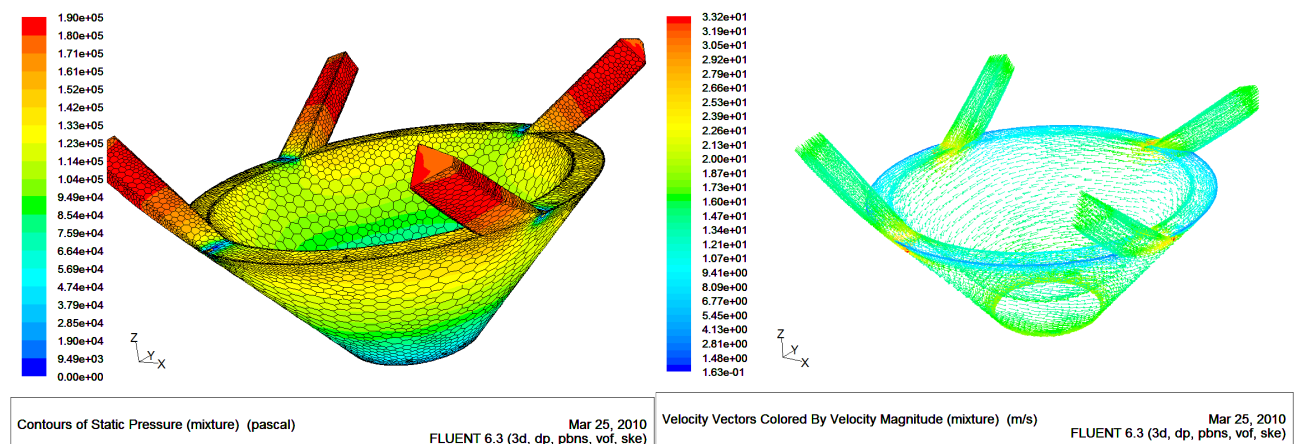


Figura 6. Visualización del contorno de presiones y del campo de velocidades (190 kPa).

En la Fig. (7), se puede apreciar la malla del inyector seccionada por dos planos perpendiculares entre sí (lado izquierdo), dando a mostrar el contorno de la fracción de volumen del agua y del aire, además en el lado derecho tenemos uno de los planos en posición frontal, pudiéndose apreciar la interfase entre el agua y el aire, así como el ángulo de spray; la sección de área azul que contiene al spray es una sección circular de ángulo de 120° , donde se puede percibir que el ángulo formado por el cono de pulverización es aproximadamente el mismo, la interfase entre el medio continuo y disperso es generada mediante el modelo VOF (Hirt & Nichols, 1981).

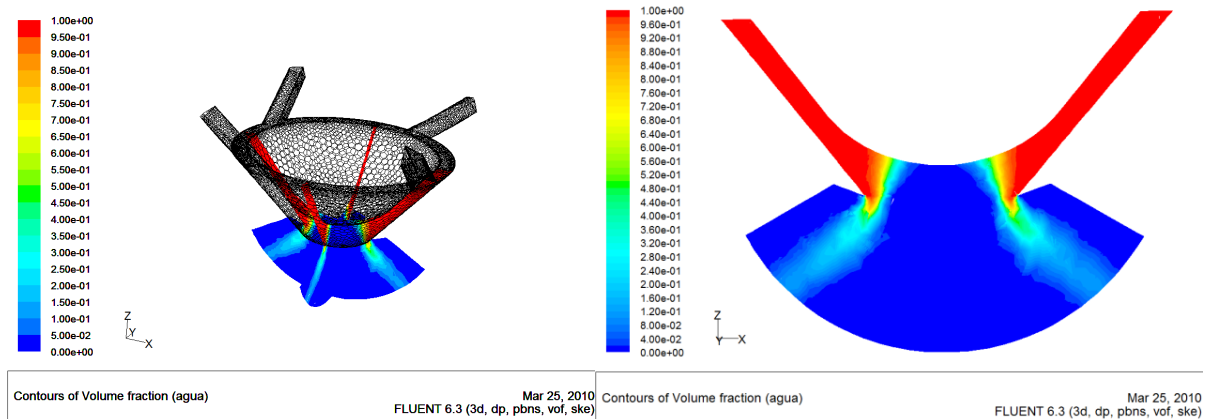


Figura 7. Visualización de la fracción volumétrica del agua y del aire, utilizando o método VOF. (200 kPa)

En lo que se refiere a los ángulos de abertura del spray, para la condición de inyección sin asistencia de aire, tenemos la Fig. (8), donde se percibe que no ocurre variación significativa del ángulo de abertura del spray con el aumento de la presión del líquido.

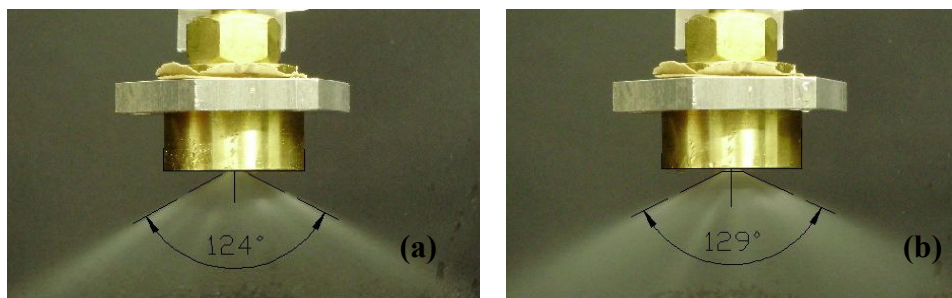


Figura 8. Ángulo de Abertura Experimental del Spray
(a) Presión de Líquido de 200kPa, (b) Presión de Líquido de 600kPa

6. CONCLUSIONES

Las comparaciones del modelo teórico matemático desarrollado en este trabajo, muestra mejoras con respecto al modelo de Pimenta y Lima (2007), no obstante, este modelo recurrió a ciertas simplificaciones como las negligencias de las pérdidas por expansión de los canales de entrada en las cercanías a la cámara de *swirl*, no obstante se recurrió a la simulación numérica, comprobando una vez más, la confianza y utilidad del modelo matemático presente; donde cabe señalar la importancia del factor “ $\cos\psi \cdot \text{sen}\beta$ ”, como un factor de corrección o de ajuste (Ronceros, 2009), en el empleo del número de Abramovich, respaldando así la utilización de este factor de forma general en las diversas clases de inyectores centrífugos (tangenciales, helicoidales y cónicos).

Los resultados experimentales fueron cuidadosamente medidos, estas medidas dieron confianza a los resultados de la simulación numérica y del modelo matemático, los cuales muestran una comparación aceptable, pues la coincidencia entre las curvas con respecto a la experimental, son sinónimo de aproximación para la comparación de otros parámetros, aun con las desventajas presentadas a lo largo de este trabajo, así como por ejemplo, refiriéndonos a la simulación numérica, en donde el modelo k-epsilon estándar, fue el más indicado a utilizar en estos casos de turbulencia, el cual no presenta un modelo de capa límite, que capture los fenómenos que se presentan en las cercanías de las paredes del atomizador, además también de carecer de un modelo de atomización, razón por la cual el estudio fue sometido exclusivamente al comportamiento del fluido interno en el inyector, quedando como sugerencia para estudios posteriores la creación de un tipo de malla estructurada, la cual nos dará más detalles en el estudio del comportamiento del fluido en este tipo de inyectores.

7. AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Combustión, Propulsión y Energía de la División de Ingeniería Aeronáutica del Instituto Tecnológico de Aeronáutica por el apoyo brindado en utilización de los diferentes equipos de mediciones.

8. REFERENCIAS

HANSEN, K.G., MADSEN, J., A computational and Experimental Study of the Internal Flow in a Scaled Pressure-Swirl Atomizer, M. S.c. Thesis, Aalborg Universitet Esbjerg, Esbjerg, 2001.

HIRT, C. W., NICHOLS, B. D., Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, vol 39, pp. 201-225, 1981.

KESSAEV, K., KUPATENKOV, 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 Chieger, pp. 155-199, 1989.

PATANKAR, S.V., Numerical Heat Transfer and Mass Transfer, New York: Hemisphere, 1980.

PIMENTA, A. P., LIMA, A. R., A ANALYTICAL MODEL FOR CONICAL INJECTOR FLOWS, 19th International Congresso of Mechanical Engineering COBEM, BRASILIA D.F., 2007.

REDDY, K. U., MISHRA, D. P., Studies on Spray Behavior of Pressure Swirl Atomizer in Transition Regime. JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 24 (1), pp. 74-80, 2008.

RONCEROS, 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.

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.

9. DERECHOS DE AUTOR

Los autores son los únicos responsables del contenido impreso de este trabajo.

NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR AN CONICAL CENTRIFUGAL FUEL INJECTOR

Abstract: *The purpose of this work is to understand the aspects related to the numerical simulation applied to study the behavior of the internal flow in a conical centrifugal injector, the results will be validated against data obtained from the experiments and a mathematical model developed from references found in the literature, obtained using simplifying assumptions, a closed solution, as the main nominal performance parameters of the injector, such as discharge coefficient and spray cone angle. In the numerical simulation was used the commercial CFD code Fluent® 6.3.26, where the governing equations are finite volume discretization through in a permanent state. The pressure correction was made using the SIMPLE algorithm, Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, and to localize the interface between dispersed and continuous medium model was used VOF, Volume of Fluid, into account the standard $k-\epsilon$ viscous model.*

Keywords: *conical fuel injector, multiphase flow, Abramovich number, Kliachko number.*