

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA Y MODELO MATEMÁTICO DE UN INYECTOR DE COMBUSTIBLE DE USO AERONÁUTICO**

**Julio R. Ronceros Rivas, Amilcar Porto Pimenta, Gustavo A. Ronceros Rivas**

*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, gustavo@ita.br.*

**Palabras Clave:** Flujo Multifásico, Análisis Computacional, Inyector Centrífugo.

**Resumen.** El propósito de este trabajo es comprender el comportamiento del flujo interno y principales parámetros de desempeño de un inyector centrífugo de uso aeronáutico, empleándose para su estudio un modelo matemático elaborado a partir de referencias encontradas en la literatura; obteniendo con ayuda de hipótesis de simplificación, una solución en forma cerrada de los principales parámetros nominales de desempeño del inyector, tales como coeficiente de descarga, presión de inyección y ángulo de pulverización "spray", cuyos resultados serán validados mediante datos obtenidos de ensayos experimentales y de la aplicación de la simulación numérica, siendo empleado para esta última: el código comercial de mecánica de fluidos computacional 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 para flujos multifásicos VOF "Volume of fluid", teniendo en cuenta el modelo viscoso laminar y turbulento  $\kappa$ -epsilon. Todas estas aplicaciones utilizadas para la validación de los resultados de este trabajo, demostrarán la confianza del modelo matemático elaborado, consiguiendo de esta forma su aplicación en el diseño de inyectores centrífugos con las características y parámetros de desempeño requeridos.

## NOMENCLATURA

F	Área [m <sup>2</sup> ]
P	Presión [kg/m.s <sup>2</sup> ]
U,W	Velocidad [m/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.
$\theta$	componente tangencial;
z	componente axial.

## 1 INTRODUCCIÓN

La atomización es un proceso de aplicación en diversas áreas tales como agricultura, combustión, procesos industriales, medicina, perfumería, etc. Este proceso es de suma importancia en los motores de uso aeronáutico y aeroespacial, en los cuales es usado frecuentemente el inyector "centrífugo", basado en la conservación de movimiento angular; su principio de funcionamiento consiste en comunicar a través de un cierto número de canales, un movimiento de rotación al fluido en su interior, aumentando de esta forma el aumento de la componente tangencial de velocidad desde su entrada hasta su expulsión en forma de pequeñas gotas contenidas en una superficie aproximadamente cónica, denominada como "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 gaseoso formado en el interior de la cámara de vórtice del inyector). Cabe resaltar

que para cada tipo de inyector centrífugo (tangencial, helicoidal y cónico), existe un modelo matemático respectivo; razón por la cual este trabajo se basó en la elaboración de un solo modelo para su aplicación en forma general y aproximada en los diferentes tipos de inyectores centrífugos mencionados.

## 2 MODELO MATEMÁTICO

Este modelo matemático consiste de dos etapas: la primera, influenciada por la teoría de flujo ideal de G. N. Abramovich, y la segunda etapa, donde se consideran las pérdidas por viscosidad, donde es aplicada la teoría de Kliachko (Khavkin, 2004). Estas teorías serán complementadas en el estudio de un inyector centrífugo "cónico", denominado así por la distribución de sus canales de entrada sobre la prolongación de la superficie cónica que contiene a la pared de cámara de vórtices (ver Figura 1.a). Este modelo está en función de los ángulos: " $\psi$ ", llamado de ángulo de hélice (Reddy and Mishra, 2008), y " $\beta$ ", 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 facilitar la descomposición de la velocidad de entrada en función de coordenadas cilíndricas, logrando de esta forma obtener las componentes tangenciales que serán inseridas en la ecuación de cantidad de movimiento angular (Rivas, 2009). La representación de la velocidad de entrada en función de coordenadas cilíndricas es representada por las ecuaciones (1.a), (1.b) y (1.c), respectivamente.

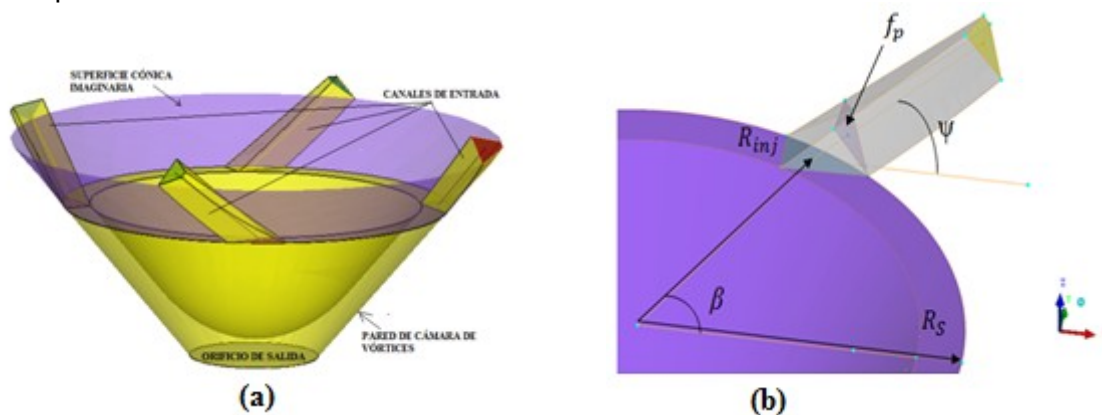


Figura 1:a) Vista de los canales de entrada y pared de cámara de vórtice; b) Visualización de los ángulos " $\psi$ " y " $\beta$ " (contenidos en un plano vertical y horizontal, respectivamente); y área de sección transversal del canal de entrada,  $f_p$  (plano normal al eje del canal de entrada).

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

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

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

Alrededor de la región del "air core", existe una película de líquido de área toroidal (Figura 1.), donde la velocidad axial es considerada uniforme, aplicándose la ecuación de continuidad en dicha sección de salida (Ec. (2)). La ecuación de conservación de movimiento angular también es aplicada en esta sección, con la finalidad de relacionar las componentes tangenciales de entrada y de salida del inyector (véase Ec. (3)), donde la componente tangencial es influenciada por el coeficiente de pérdidas debido a la viscosidad del líquido "K" (Kessaev and Kupatenkov, 1997).

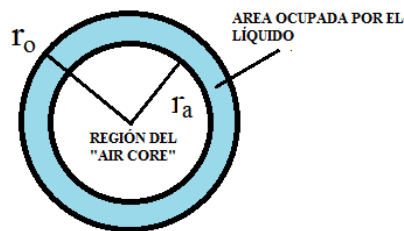


Figura 2: Visualización del área ocupada por el líquido y de la región del "air core".

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

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

Aplicando la ecuación de Bernoulli en "r<sub>a</sub>", (véase Ec. (4)), donde es despreciada la componente radial en la interfase "líquido-aire" (Lefebvre, 1989); luego ordenando esta ecuación en forma conveniente, tenemos el coeficiente de descarga "C<sub>d</sub>" (Ec. (5)). Además del semi-ángulo del "spray" (α), expresado mediante la función seno (Ec. (6)).

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

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

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

Donde:

α: semiángulo del cono de spray.

A número de Abramovich para inyector centrífugo tangencial,  $A = \pi r_o R_{inj} / F_p$ ;

C<sub>d</sub>: coeficiente de descarga;

$\Delta P$ : diferencial de presión  
 $\varphi$ : coeficiente que relaciona el área de la película líquida con el área total del orificio de salida,  $\varphi=1-(r_a/r_o)^2$ ;  
 $\rho$ : densidad del líquido;  
 $m$ : flujo másico total en el inyector;  
 $r_a$ : radio del espacio gaseoso "air core";  
 $r_o$ : radio del orificio de salida del inyector;  
 $R_{inj}$ : distancia del centro del inyector al eje del canal de entrada del inyector (Figura. 2).

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

Es considerado el líquido ideal e 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 "Ac" (ver Ec. (7)), coeficiente de descarga (Ec. (8)) y semi-ángulo de "spray" (Ec. (9)) en función de " $\varphi$ ", (Rivas, 2009).

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

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

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

## 2.2 Consideraciones asumiendo viscosidad del líquido.

El número equivalente de Kliachko " $A_E$ " (Ec. (10)), a diferencia del Número de Abramovich, considera las pérdidas por viscosidad del líquido, y está relacionado con el factor "K" ( $K=A_E/A_C$ ), y el coeficiente de rozamiento de Blasius ( $\lambda=0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$ ). Este número de Kliachko puede expresarse en función de " $\varphi_E$ ", (coeficiente equivalente a " $\varphi$ ", considerando esta vez la viscosidad del líquido).

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

Donde:

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

$D_E$ : Diámetro equivalente de los canales de entrada,  $D_E = \sqrt{\frac{4n \cdot f_p}{\pi}}$ ;

$F_p$ : área total de las secciones normales a los ejes de los canales de entrada,  $F_p = n \cdot f_p$ ;

$\nu$ : Viscosidad cinemática del líquido;

$n$ : número de canales de entrada.

Relacionando estos términos se llega a obtener el coeficiente de descarga (Ec. (11)) y semi-ángulo de "spray" (Ec. (12)) equivalentes, en función de  $\varphi_E$ :

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

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

### 3 SIMULACIÓN NUMÉRICA

La geometría del inyector utilizado en este trabajo presenta irregularidades en sus superficies internas (Figura 3.a), siendo por tal motivo, el empleo del tipo de malla no estructurada, siendo utilizada en este caso el tipo de malla poliédrica para modelar el circuito interno de este inyector (Figura 3.b); la cual presenta la ventaja de precisar menor tiempo para su construcción y flexibilidad de adaptación en geometrías irregulares, además de presentar menor tiempo de convergencia, esta malla contiene 40458 elementos y 187751 nodos.

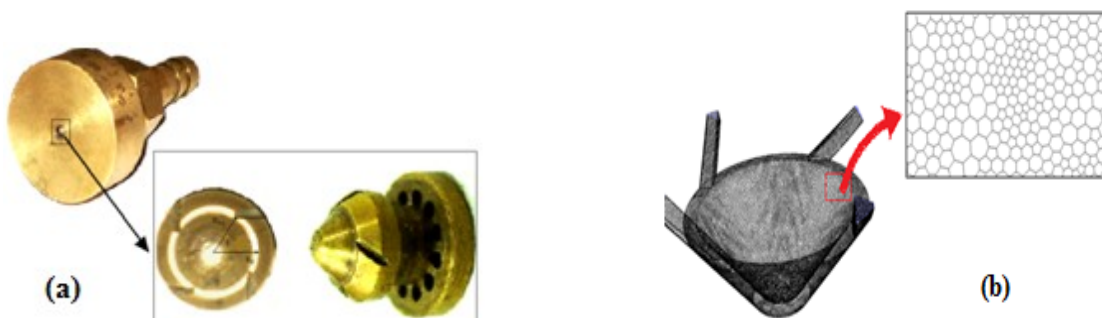


Figura 3: a) Cuerpo de inyección, mostrando el circuito interno alojado en su interior en vista de planta y de perfil; b) Malla poliédrica del circuito interno mostrando la ampliación de una cierta sección de su dominio.

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

- $\beta$ : ángulo de swirl (66°)
- $\psi$ : ángulo de hélice (34,25°)
- $\gamma$ : ángulo de cono de la pared de cámara de vórtice (50°);
- $f_p$ : área de sección transversal del canal de entrada (0,136 mm<sup>2</sup>), donde  $F_p = f_p \cdot n$ , 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 (1mm).

El software Comercial de CFD Fluent® 6.3.26, presenta modelos multifase del tipo Euler-Euler, de los cuales fue utilizado el modelo VOF "Volume of fluid" (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 SIMPLE "Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations" (Patankar, 1980). En esta simulación fue empleado el modelo laminar y 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- $\epsilon$ ) son derivadas de la ecuación general de transporte para fluidos multifásicos (Ec. (13)), donde para representar la fracción volumétrica será empleado el término " $\alpha$ ".

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho \phi)_m + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho u_i \phi)_m &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)_m + (\alpha S_\phi)_m + \sum_{n=1}^{N_p} c_{\phi, mn} (\phi_n - \phi_m) \\ &+ \sum_{n=1}^{N_p} c_{\phi, mn} \left( \dot{m}_{mn} \phi_n - \dot{m}_{mn} \phi_m \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Donde:

- $\alpha$ : Fracción volumétrica de fluido.

- $\phi$ : Escalar.  
 $\rho$ : Densidad  
 $u_i$ : Componente de velocidad en la dirección i.  
 $\Gamma_\phi$ : Coeficiente de difusión para un escalar  $\phi$ .  
 $S_\phi$ : Término fuente para un escalar  $\phi$ .  
 $N_p$ : Número total de fases.  
 $C_{\phi,mn}$ : 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 son mostrados los resultados obtenidos del modelo matemático (asumiendo pérdidas por viscosidad), de la simulación numérica (modelo laminar y turbulento  $k-\epsilon$ ) y datos experimentales, donde fue considerado como fluido de ensayo, el agua destilada, cuyas propiedades son mostradas en el cuadro 1:

Masa específica (kg/m <sup>3</sup> )	992
Tensión superficial (N.m)	0.075
Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)	1,0282*10 <sup>-6</sup>

Cuadro1: Propiedades físicas del agua.

En la [Figura 4](#), es graficado el diferencial de presión en función del flujo másico, donde se puede observar una buena aproximación del modelo matemático y del modelo turbulento  $k-\epsilon$ , con respecto a los datos experimentales (Rivas et al, 2010); cabe resaltar que lo mismo no acontece con el modelo laminar, el cual presenta variaciones cada vez mayores, conforme aumenta el flujo másico, y por ende el número de Reynolds. En la [Figura 5](#), son mostrados los resultados de los coeficientes de descarga en función del diferencial de presión, donde los datos experimentales presentan una variación constante de +/- 0,01; mostrando nuevamente aproximaciones aceptables: el modelo  $k-\epsilon$ , y el modelo matemático actual (asumiendo pérdidas).



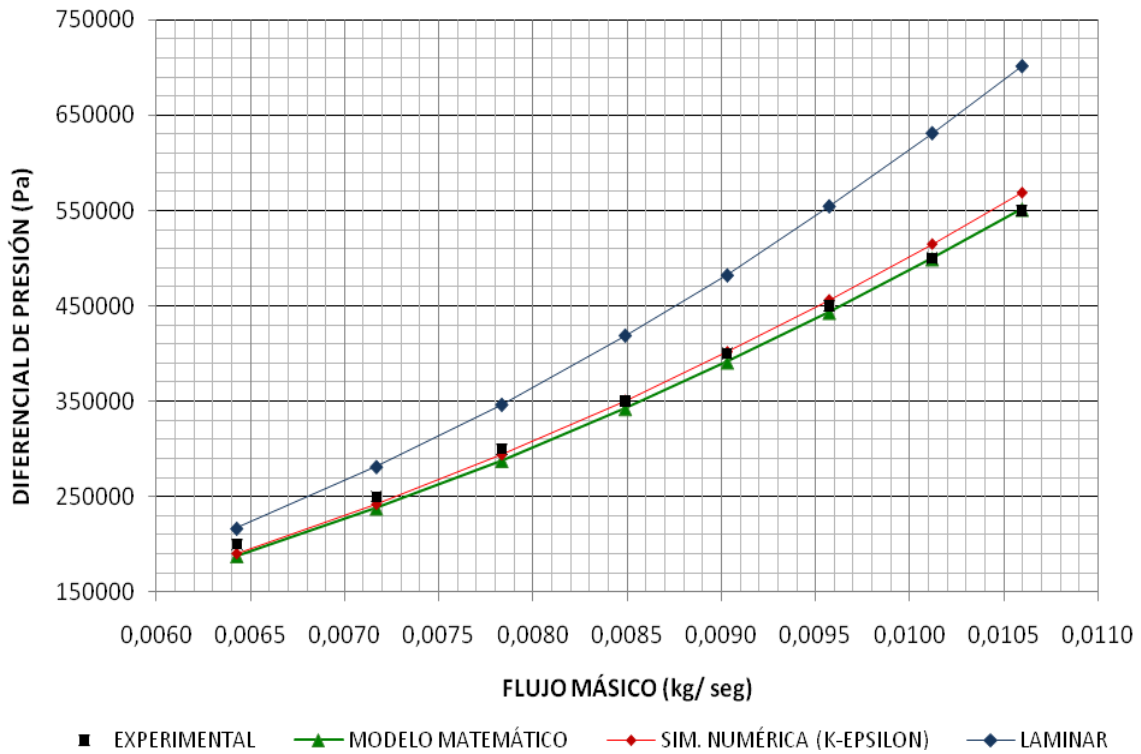


Figura 4: Comparación del diferencial de presión respecto al flujo mássico

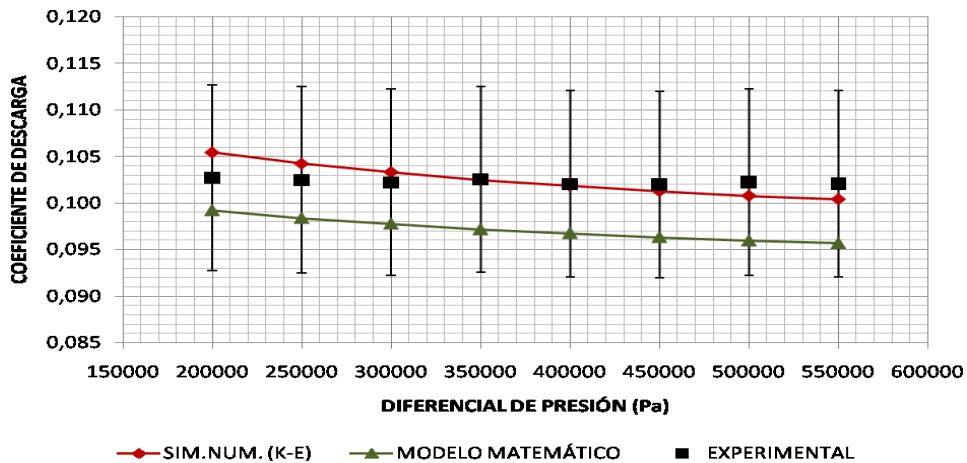


Figura 5: Comparación del coeficiente de descarga respecto al diferencial de presión.

A continuación será analizado el comportamiento del flujo en el interior del inyector, donde se tomará como ejemplo el caso para presión de inyección igual a 500 kPa, pudiéndose apreciar la caída de presión cuando el flujo ingresa a la cámara de vórtice (Figura 6), provocando la aceleración de las partículas cuando el flujo abandona los canales de entrada (Figura 7).

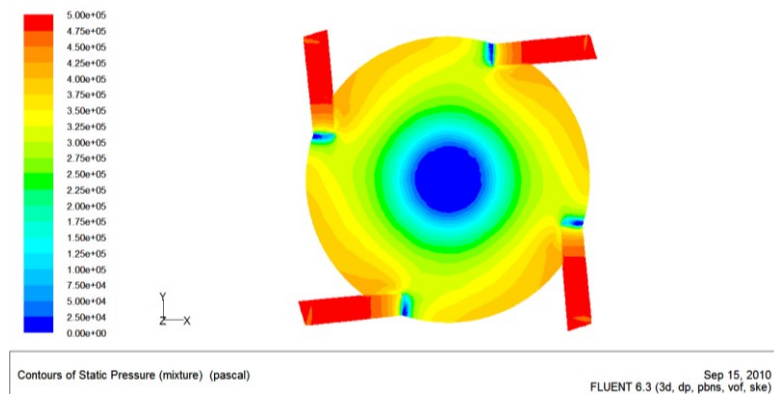


Figura 6: Caída de presión en el interior del inyector, asumiendo modelo  $k-\epsilon$ . (500 kPa)

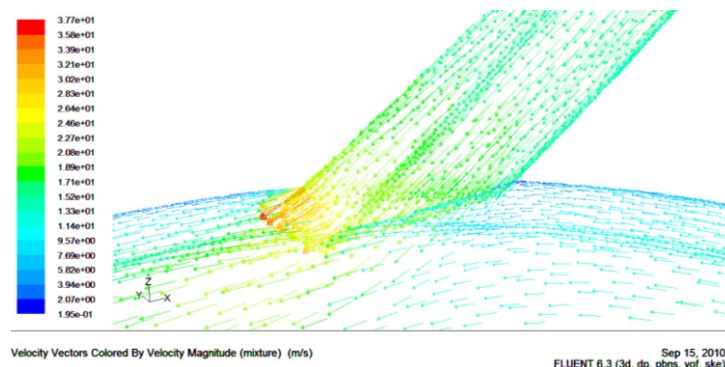


Figura 7: Visualización de los vectores de velocidad en el interior de un canal de entrada, asumiendo modelo  $k-\epsilon$  (500 kPa).

En la Figura 8, se puede visualizar la interfase líquido-aire, mediante el modelo VOF, además se puede apreciar la región del "air core" y del ángulo de spray de aproximadamente  $120^\circ$  (medida del ángulo de diseño del inyector centrífugo cónico).

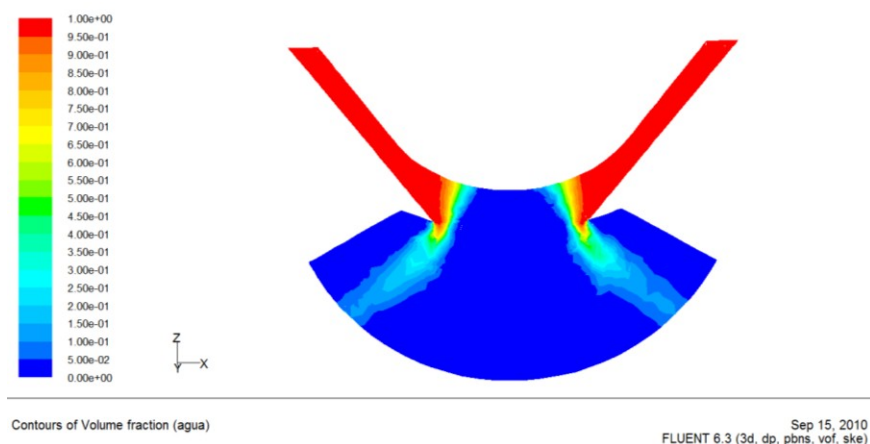


Figura 8: Visualización de la fracción volumétrica de agua (color rojo) y del aire (color azul), y de la interfase líquido-aire, empleando el modelo VOF (500 kPa,  $k-\epsilon$ ).

En la Figura 9, se pueden apreciar las respectivas fotografías de los ángulos de abertura del spray para 200 kPa y 600 kPa, donde se percibe que no ocurre variación significativa del ángulo de abertura del spray con el aumento de la presión del líquido.

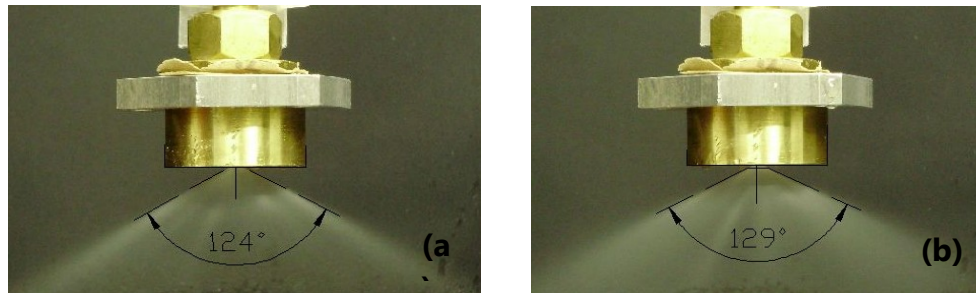


Figura 9: Ángulo de Abertura del spray  
(a) Presión de Líquido de 200kPa, (b) Presión de Líquido de 600kPa

## 5 CONCLUSIONES

Los resultados del presente modelo matemático mostraron confianza y razonable aproximación, a pesar de que el modelo desarrollado recurrió a ciertas simplificaciones, tales como las pérdidas por expansión en las cercanías a la cámara de *Swirl*. Por otro lado, cabe señalar la importancia del factor " $\cos\psi \cdot \text{sen}\beta$ " como factor de corrección o de ajuste (Rivas, 2009) en el número de Abramovich y su aplicación de forma general en las diversas clases de inyectores centrífugos (tangenciales, helicoidales y cónicos).

Los resultados de la simulación numérica fueron comparados con el presente modelo matemático y datos experimentales, en donde se observa que el modelo  $k$ - $\epsilon$  estándar, presenta una buena aproximación con los datos experimentales, (el cual no presenta modelo de capa límite, y modelo de atomización), razón por la cual el estudio fue sometido exclusivamente al comportamiento del fluido interno del inyector, quedando como sugerencia para estudios posteriores la utilización de algún tipo de malla (estructurada), otros tipos de modelos  $k$ - $\epsilon$  (RNG, *Realizable*, etc.) y otros modelos más sofisticados, tales como RSM (*Reynolds Stress Model*), que nos dé más detalles en el estudio del comportamiento del fluido e atomización en este tipo de inyectores.

## 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, Esbjerg, 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 Chieger, 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, Brasil, 2010.

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.