

## ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA CÁMARA DE MEZCLADO DE UNA “JET PUMP”

Patruno, L.E.<sup>a,b</sup> – Delmastro, D.F.<sup>a,b</sup> – Masson, V.P.<sup>b,c</sup> – Mateos, D.<sup>a</sup> – Eckardt, S.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Grupo. Termohidráulica, Centro Atómico Bariloche, Bariloche, Argentina,  
<http://www.cab.cnea.gov.ar>

<sup>b</sup> Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche

<sup>c</sup> Comisión Nacional de investigaciones científica, CONICET

**Palabras clave:** Jet pumps, CAREM-25, circuito hidráulico experimental, CFD.

### Resumen:

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar un sistema de refrigeración asistida para reactores de tipo integrados. La motivación es obtener una mayor potencia térmica para el reactor integrado CAREM actualmente diseñado con un sistema de refrigeración por convección natural. Para ello se evalúa la inserción de bombas del tipo jet (jet pump) para generar una convección asistida pero sin alterar características del CAREM.

Con un código CFD se modeló una posible cámara de mezclado para el CAREM y se obtuvo la simulación del campo de presiones (hidrostática, hidrodinámica y total) y el campo de velocidades tanto en la dirección radial como axial. Se obtuvo que la presión estática es esencialmente uniforme en la dirección radial (a pesar de la diferencia de velocidades entre el fluido inyectado y el fluido arrastrado) y que la escasa diferencia se uniformiza a los 10 cm. El campo de velocidades por su parte varía más lentamente, obteniendo perfiles radiales con formas parabólicas. Con este programa también se estimó la longitud de mezclado en la cámara, resultando estar en los 2 m.

Para validar experimentalmente los resultados obtenidos con el programa numérico, y utilizando los recursos ya disponibles en nuestro laboratorio, se diseñó un circuito hidráulico experimental de la cámara. Con este circuito se realizaron mediciones de presión estática a lo largo de la cámara midiendo con un método de niveles de agua. También se obtuvieron valores de velocidad en la dirección axial utilizando un tubo Pitot.

Se compararon los resultados numéricos con los experimentales, observándose concordancia cualitativa entre la simulación numérica y las mediciones, pero gran diferencia en las longitudes de mezclado.

## 1 INTRODUCCIÓN

El reactor CAREM-25 es un reactor integrado con refrigeración por convección natural (Delmastro, 2000). La motivación de este trabajo es evaluar la convección asistida por bombas del tipo jet (Béer, 1972; Kudirka, 1974) para obtener una mayor potencia térmica en el reactor CAREM-25, sin alterar las características que hacen a CAREM un proyecto único y tentador a distintos niveles. Una bomba del tipo jet permite acelerar el flujo másico de refrigerante con poca demanda de fluido del recipiente de presión (en inglés RPV). Es conveniente mantener la menor cantidad de fluido afuera del RPV para evitar accidentes de pérdida de refrigerante (en inglés LOCA) (IAEA-TECDOC-1391, 2004), además de respetar los máximos diámetros permitidos para la acometida al RPV (Lahey, 1977).

En este trabajo se evalúa la cámara de mezclado con un código CFD que permite simular de forma cualitativa el campo de presiones (hidrostática, hidrodinámica y total) y el campo de velocidades. Con esto se predicen comportamientos generales, tales como la producción de recirculaciones, perfil de presión estático no plano a la salida del inyector y homogeneización de las velocidades en la cámara de mezclado.

Se realiza el diseño de un circuito hidráulico para verificar características de funcionamiento del mezclador de la bomba jet. La construcción se realiza con materiales y mano de obra del grupo de Termohidráulica, de forma de contrastar los resultados numéricos con mediciones experimentales. Los resultados experimentales se utilizan para evaluar la efectividad de los cálculos numéricos. Por lo tanto este trabajo cubre aspectos numéricos y experimentales.

## 2 JET PUMPS

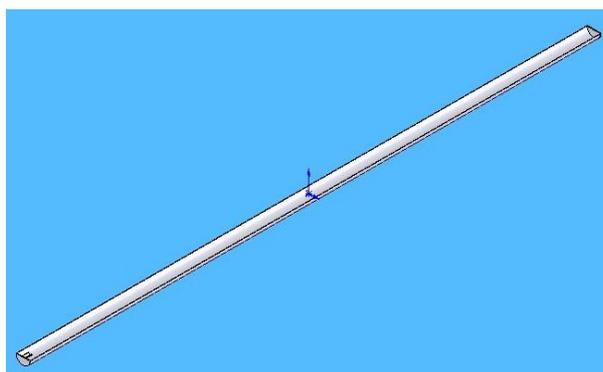
Se puede hacer una desagregación de una jet pump en tres sub-circuitos hidráulicos (Kudirka, 1974): uno de inyección, donde se ubica una bomba centrífuga que alimenta una boquilla de inyección de caudal a alta velocidad, uno de impulsión, en donde la boquilla o inyector arrastra fluido de un sub-circuito sin bomba, y finalmente uno de mezclado, donde se homogeneizan las velocidades para dar un perfil turbulento. En ésta última zona de mezclado se agrega un difusor para transformar la velocidad del fluido en presión estática.

Dado el reducido espacio disponible en el reactor CAREM-25 para la colocación de jet pumps, en este trabajo nos concentramos en el estudio de la longitud de la zona de mezclado.

## 3 CONFIGURACIÓN DEL CÓDIGO CFD

### 3.1 Configuración geométrica

Para la simulación numérica de la zona de mezclado se optó por trabajar con un código de Computer Fluid Dynamics (CFD). En este caso se utilizó el código de cálculo COSMOS FloWorks 2004. El mallado del sistema fue realizado en el software SolidWorks 2004. La configuración geométrica considerada consiste en un inyector y una cámara de mezclado compuesta por un tubo de 57,4 mm de diámetro y 2,5 m de largo (ver Figura 1). Luego se impusieron las condiciones de contorno del sistema.



**Figura 1:** Esquema de la cámara de mezclado

### 3.2 Valores de entrada

Para las condiciones de contorno (BC) se probaron diferentes métodos: ingresos de caudales máscicos y de velocidades. Se encontró que el software requiere más tiempo de cálculo cuando las BC son máscicas, por lo que se optó por definir un tipo de fluido, una temperatura de trabajo, una presión y aplicar dos tipos de BC. A la entrada se definió la BC como velocidades del flujo y a la salida como presión estática ya que es un parámetro fácilmente mensurable. En la Tabla 1 pueden verse las condiciones de contorno elegidas para la simulación.

Parámetro	Valor
Análisis tipo	Interno
Fluido	Agua
Presión	101,325 kPa
Temperatura	293,2 K
Campo de velocidad	Sin campo
Condición de flujos	Laminar y/o turbulento
Velocidad entrante del flujo arrastrado (BC IN)	1,69166 m/s
Condición	Completamente desarrollada
Velocidad entrante del flujo inyectado (BC IN)	17,4619 m/s
Condición	Completamente desarrollada
Presión de salida (BC OUT)	Ambiente
Mallado inicial	Grado 6

**Tabla 1:** Condiciones de contorno impuestas sobre la simulación numérica

Dado que el flujo se encontraba completamente desarrollada, se ejecutó el código CFD con distintas longitudes de la cámara de mezclado para comprobar que la condición de contorno

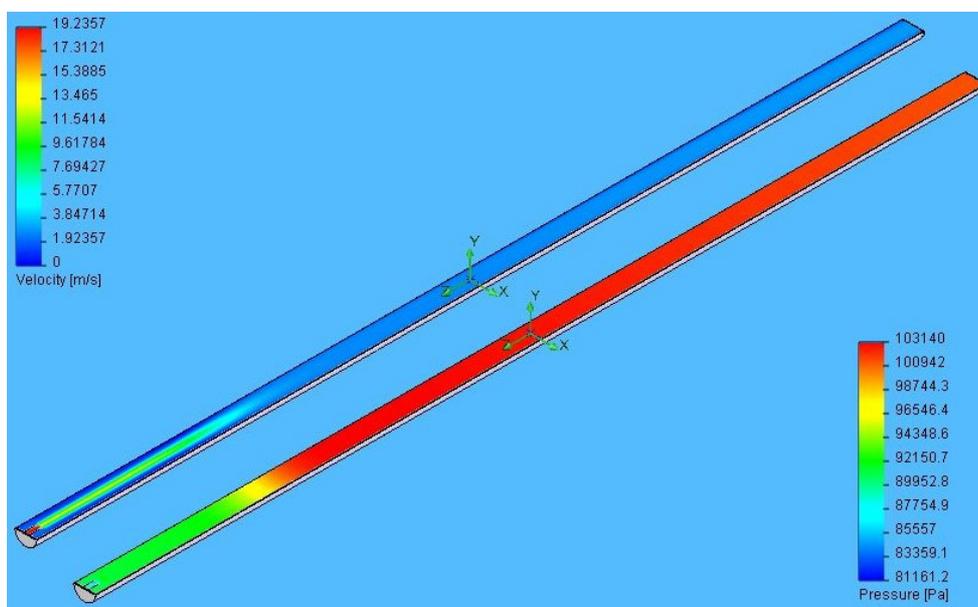
de presión a la salida no afectara los cálculos.

El mallado fue generado por el mismo software, utilizando 82420 celdas con un volumen variable. Se utilizó mayor resolución en la zona del inyector, y menor en posiciones alejadas del mismo. Los volúmenes de las celdas varían entre  $5 \times 10^{-2}$  y  $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ .

El modelo de turbulencia usado por el programa es el conocido como k-e y los parámetros utilizados son los estándares del programa ( $k = 1 \text{ J/kg}$  y  $e = 1 \text{ W/kg}$ ).

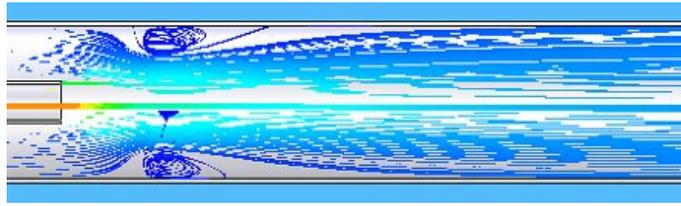
#### 4 RESULTADOS NUMÉRICOS

En la Fig. 2 pueden verse los campos de presión y de velocidad en función del radio y la posición axial para un caudal de inyección de  $17.46 \text{ m/s}$  y las BC indicadas en la sección anterior. En el campo de velocidad se puede identificar claramente la región del inyector, donde se encuentra la máxima velocidad, y como ésta se uniformiza a medida que se avanza en la dirección axial. En cuanto a la presión, se observa que el perfil es básicamente constante en la dirección radial.



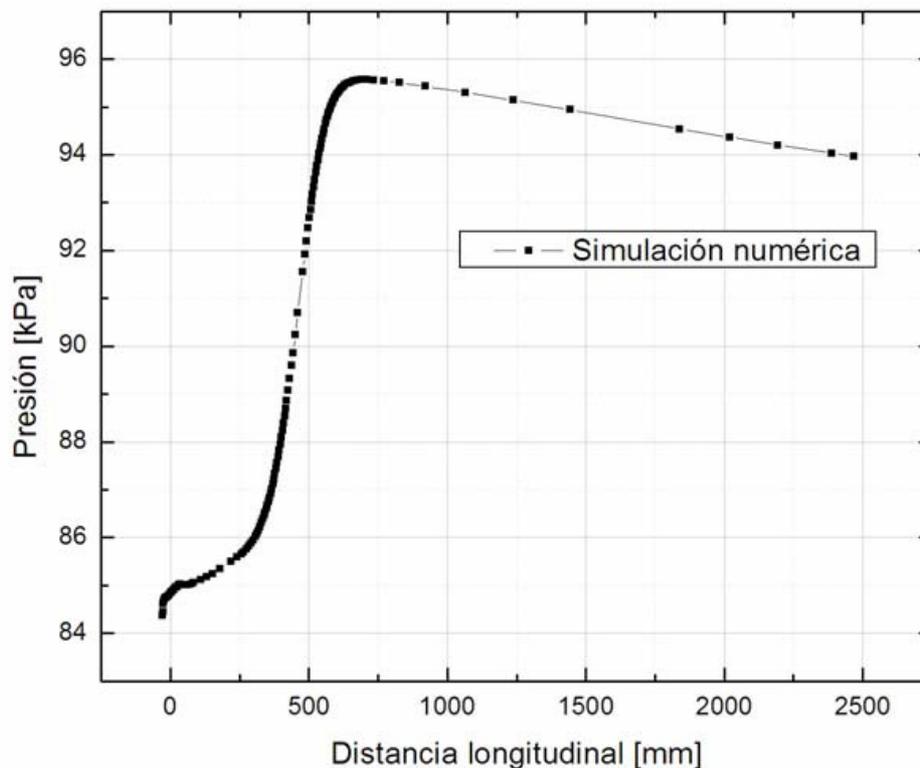
**Figura 2:** Campo de velocidad y presión dentro de la cámara de mezclado

El primer análisis que se hace en la simulación es identificar las líneas de corriente en la zona del inyector. Como muestra la Figura 3, las líneas de corriente provenientes de la zona impulsada tienen una pequeña deflexión hacia el inyector, evidenciando una presión, o fuerza, de arrastre que es efectivamente el motor de la jet pump. En la zona un poco más alejada del inyector podemos ver un anillo de vorticidad que fuerza una disminución en el área efectiva de pasaje del fluido. Finalmente se ve una lenta recuperación de este diámetro, mostrando la apertura del jet. La gráfica es puramente ilustrativa para mostrar el efecto de la presión sobre las líneas de corriente.



**Figura 3:** Líneas de corriente en la zona de inyector

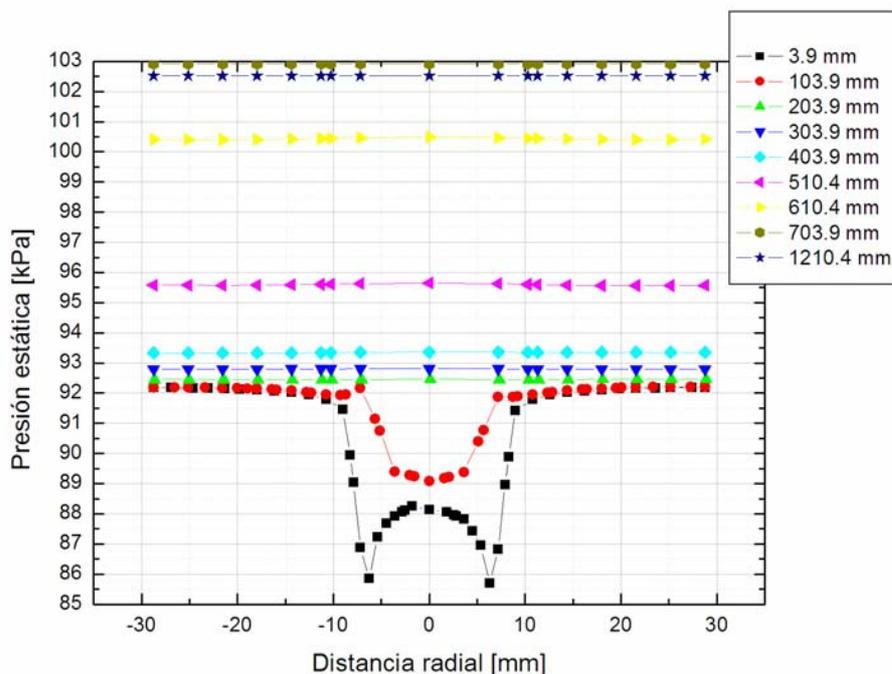
En la **Figura 4** se muestra la presión estática a lo largo de la cámara de mezclado para una posición radial muy cercana a la pared de la cámara. Se puede observar en la gráfica cómo el fluido comienza con una presión baja (velocidad alta), luego hay un aumento en la presión debido a la deceleración de fluido inyectado y arrastre del impulsado y luego del máximo valor se evidencia la pérdida de carga por fricción. Según este código de cálculo y con las condiciones detalladas en la Tabla 1, la máxima presión se alcanza a los 660 mm a partir de la boca del inyector, y la ganancia de presión estática (definida como la presión a la salida menos la correspondiente a la entrada) es de 9,13617 kPa (0,93 m). La ubicación radial de la línea sobre la cual se dibuja este perfil es casi irrelevante, debido a que la distribución de presión resulta uniforme en la coordenada radial, salvo muy cerca del inyector. Esto se puede observar rápidamente en la Fig. 5.



**Figura 4:** Presión estática a lo largo de la cámara de mezclado

Para comprobar numéricamente el perfil de presión estática a la salida del inyector, podemos graficar la presión en cortes radiales a distintas longitudes. Esto se muestra en la **Figura 5**. Como primer resultado vemos que el perfil no es plano cerca del inyector. Entre las zona impulsada e inyectada hay una diferencia de 4 kPa para la salida del inyector. También

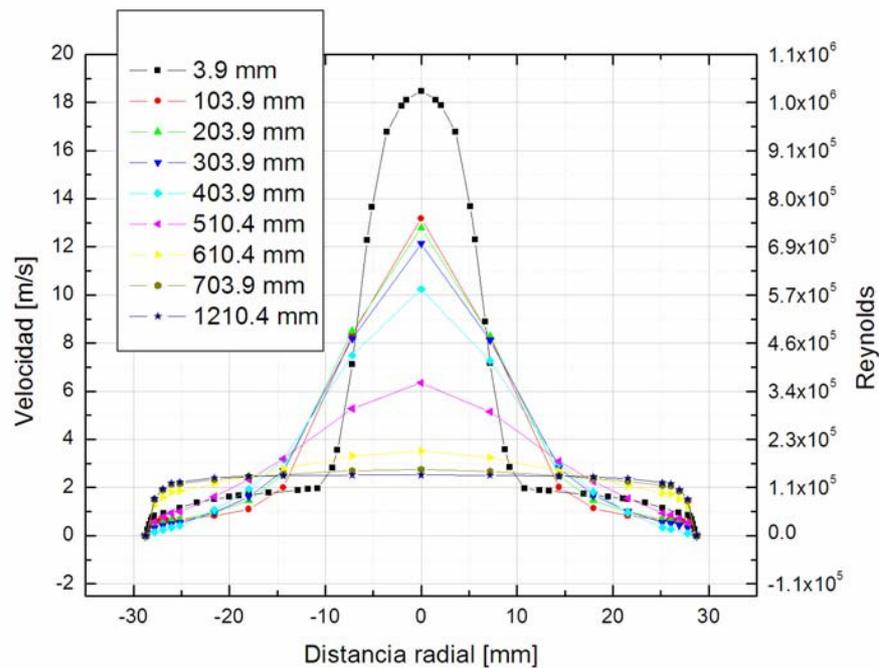
comprobamos que ésta diferencia se torna nula para posiciones más alejadas.



**Figura 5:** Presión estática en cortes radiales a distintas distancias del inyector

A su vez puede analizarse el perfil de velocidades (en módulo, tomando las contribuciones de todas las componentes) en función de la coordenada radial. En la Figura 6 se muestra la velocidad para distintas posiciones axiales. Estos valores son tomados de forma de poder compararlos con datos experimentales.

Como se puede apreciar en la Figura 6, el perfil de velocidades a la salida del inyector es notablemente no uniforme, mostrando una alta velocidad en el centro (para  $r = 0$ ) en donde está ubicado el inyector, y velocidades muy bajas para coordenadas circundantes, en donde está ubicado el fluido arrastrado. A medida que se avanza en la longitud de la cámara de mezclado se puede comenzar a observar un proceso de suavizado, o desarrollo, en el perfil de velocidad, esto se debe a que los fluidos inyectados e impulsado comienzan gradualmente a intercambiar momento hasta que sus velocidades se igualan. La posición longitudinal a la cual el perfil de velocidades se puede considerar completamente desarrollado se define como la longitud de mezclado, o longitud necesaria de la cámara de mezclado, en este caso, resulta ser de 610,4 mm.

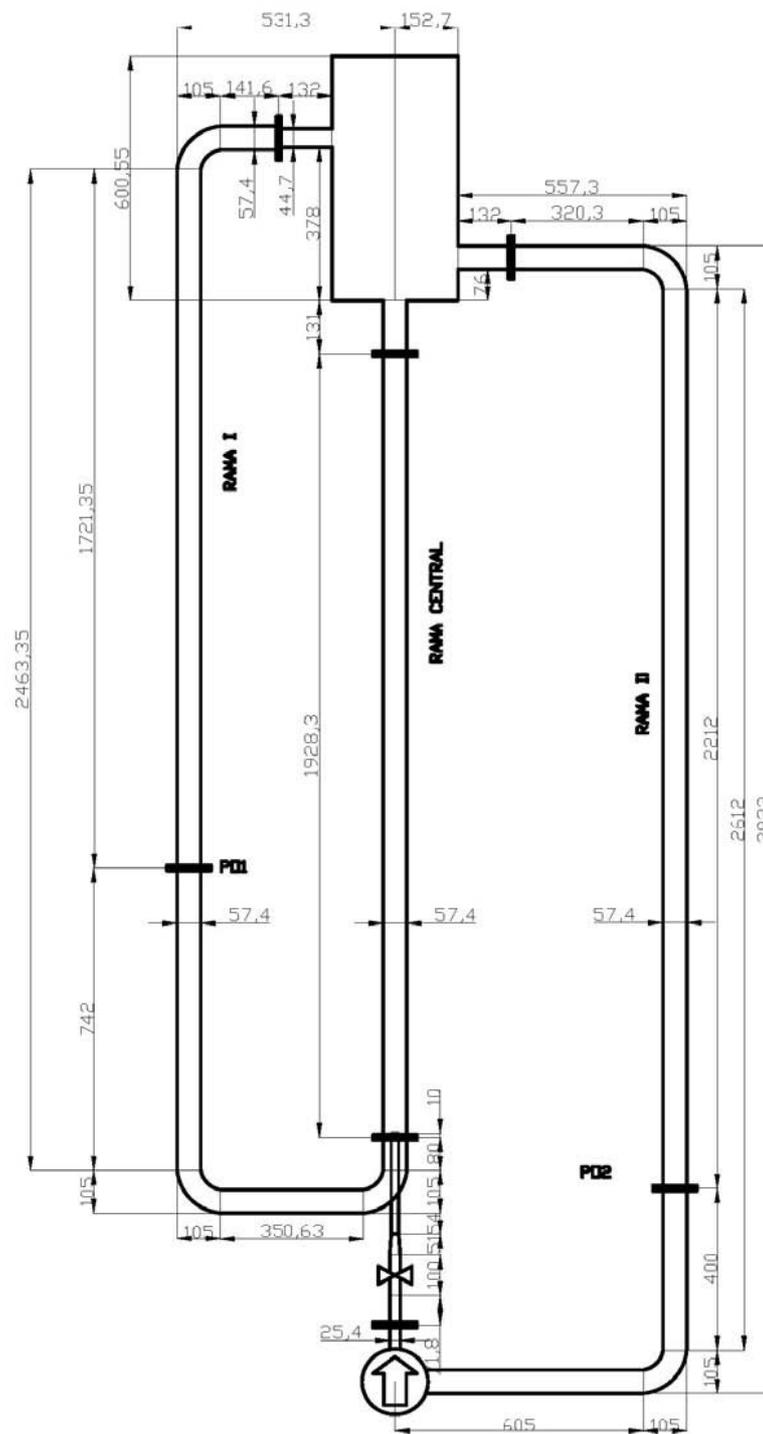


**Figura 6:** Perfil radial de velocidades para distintas longitudes en la cámara de mezclado

## 5 SETUP EXPERIMENTAL

En la Figura 7 se muestra el esquema del circuito hidráulico empleado en el presente trabajo. En la “Rama Central” ó cámara de mezclado se realizaron una serie de perforaciones que permiten extraer señales de presión. Con éstas se midió el perfil de presiones hidrostáticas en diferentes posiciones axiales. Por otra parte las ramas de inyección y succión poseen placas orificios para medir los respectivos caudales.

Las velocidades axiales se midieron mediante la instrumentación de un tubo Pitot con columnas de agua y DP cells, de acuerdo al rango de medición. Con esto solo se tiene una medición de la componente axial (longitudinal) del campo de velocidades axiales, no siendo adecuado para la medición de las componentes radiales y las axiales de sentido opuesto al considerado.



**Figura 7:** Plano del circuito hidráulico experimental

## 6 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

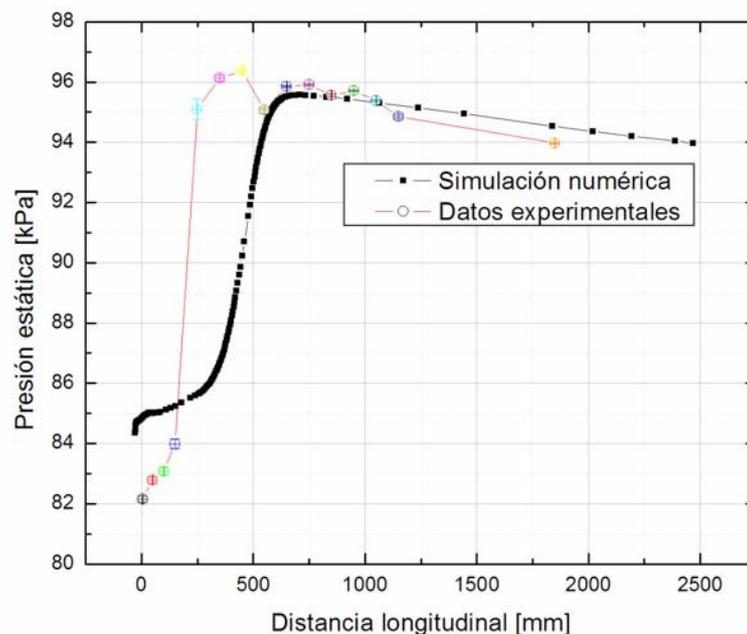
En esta sección se presentan gráficas comparativas entre lo simulado numéricamente y las mediciones en el circuito experimental.

## 6.1 Perfiles de presión estática

En la Figura 8 se muestran los perfiles de presión estática obtenidos numérica y experimentalmente. Como se puede observar, la forma de los perfiles es básicamente la misma en ambos casos, pero hay un desplazamiento considerable entre los dos resultados.

Teniendo la distancia de desarrollo como el punto en donde se alcanza la mayor presión estática, vemos que el método numérico predice una longitud de mezclado mucho mayor a la real. Las causas de dicho resultado pueden ser diversas, pero entre ellas suponemos que una de las más importante es la producción de vorticidad. La vorticidad es un parámetro que influye de forma decisiva en el mezclado y en la zona de salida del jet los gradientes de velocidades son muy altos dificultando la convergencia numérica. Por otra parte, en cuanto al método numérico, es difícil conocer a priori los parámetros de turbulencia para el modelo  $k-\epsilon$ , por lo que se utilizaron los estándares del programa que posiblemente estén subestimados.

También es notable el valor de la presión cerca del inyector, mostrando los experimentos un valor mucho más bajo que la simulación numérica. Esto puede deberse, en cierta medida, a que el código CFD presenta poca convergencia numérica en zonas donde hay un alto gradiente de velocidades.



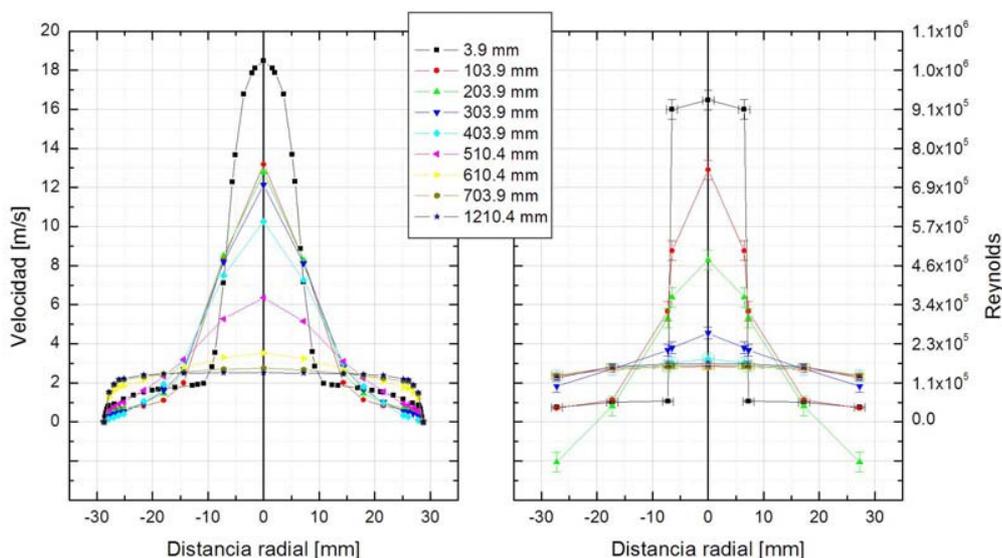
**Figura 8:** Perfil axial de presión estática, comparación numérico-experimental

## 6.2 Velocidad axial

El perfil radial medido concuerda con el simulado numéricamente en las primeras posiciones longitudinales. Como podemos ver en la **Figura 9** hay una región intermedia a partir de los 20 cm del inyector en donde los resultados muestran una diferencia apreciable. Esto se puede atribuir a los vórtices detectados con el Pitot mediante la presencia de presiones dinámicas negativas.

Esta vorticidad ayuda al intercambio de momento entre el caudal inyectado a alta velocidad y el impulsado, disminuyendo las distancias requeridas. Cuando la simulación muestra un mezclado completo (a una distancia mayor), los perfiles vuelven a coincidir. Hay que tener presente que la comparación mostrada en la **Figura 9** es entre módulo total de velocidad

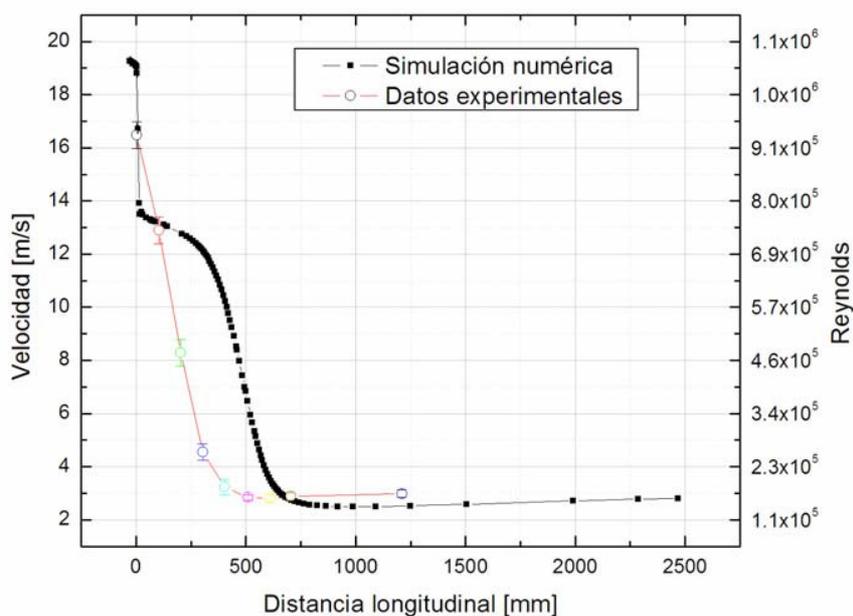
(numérico) y componente axial de velocidad (experimental), los cuales deben diferir por conservación de la masa, pero son comparables debido a que las diferencias son muy pequeñas.



**Figura 9:** Perfil de velocidades axiales a distintas longitudes desde la boca del inyector

### 6.3 Velocidad axial en la posición central

En la **Figura 10** se muestra la comparación entre los resultados numéricos y experimentales de la velocidad central de la jet pump a lo largo de la coordenada longitudinal. Los dos primeros puntos coinciden en ambos enfoques, luego vemos una gran diferencia debida a la vorticidad medida pero no simulada en el código CFD. Lejos de la zona de vorticidad se vuelve a evidenciar una buena coincidencia entre lo numérico y lo experimental.



**Figura 10:** Velocidad axial para la posición central en la cámara de mezclado

## 7 CONCLUSIONES

Se utilizó un código CFD para estudiar el mezclado en una jet pump.

Se diseñó un circuito hidráulico experimental con una jet pump para poder medir y caracterizar parámetros como presión hidrostática, perfiles de velocidad y longitud de mezclado. Los resultados experimentales se compararon con valores simulados numéricamente.

El cálculo numérico de la longitud de mezclado difiere de las mediciones experimentales en un 70 %. Las distancias de desarrollo son mucho más grandes que las experimentales, y estimamos que esto se debe a que el modelo no predice la vorticidad observada experimentalmente a los 20 cm del inyector y que ayuda al mezclado de los dos jets. Suponemos que esta diferencia está causada en gran parte por una subestimación en los parámetros de turbulencia en el modelo  $k-\epsilon$ , por lo que un trabajo a futuro sería la modificación de estos parámetros para obtener una mayor concordancia con los resultados experimentales.

Por otra parte, comprobamos que el software CFD no simula de manera correcta los campos de velocidad con altos gradientes, mostrando poca convergencia en la ecuación de la conservación de la masa.

## 8 REFERENCIAS

- J.M. Beér, N.A. Chigier, Combustion Aerodynamics, *Halsted Press Division, John Wiley & Sons*, 1972.
- Robert D. Blevins, Applied Fluid Dynamics Handbook, *Krieger Publishing Company*, Malabar, Florida 1992.
- Delmastro, D., Thermal-hydraulic aspects of CAREM reactor, *IAEA TCM on Natural Circulation Data and Methods for Innovative Nuclear Power Plant Design*, Viena, Austria, 2000.
- IAEA TECDOC 1203, Thermohydraulics relationships for advanced water cooled reactors.
- IAEC TECDOC 1391, Status of advanced light water reactors design, Mayo 2004 -.
- A.A. Kudirka and D.M. Gluntz, Development of Jet Pumps for Boiling Water - Reactor Recirculation Systems, *Journal of Engineering for Power*, 1974.
- R.T. Lahey Jr. and F.J. Moody, The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor, Published by ANS, 1977.
- Claudio Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Ediciones del Castillo S.A, 1986.
- Frank M. White, Fluid Mechanics, *MacGraw-Hill Book, Company* - 1979.
- Frank M. White, Viscous Fluid Flow - Second Edition, *McGraw Hill Inc.*, 1991.
- Frederick J. Moody, Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics, *John Wiley and Sons*.
- Programa de dibujo SolidWorks y código CFD COSMOS FloWorks, 2004.