

## **Validación del Software OpenFoam en Flujo Turbulento: Aplicación Artística del Movimiento Aleatorio**

**Saira F. Pineda Rondón**  
RGA Ingeniería y Proyectos C.A.

**Raúl E. González Acuña**  
RGA Ingeniería y Proyectos C.A.

### **INTRODUCCIÓN**

El trabajo realizado es una iniciativa innovadora en donde se mezcla la ciencia con el arte, con la finalidad de ampliar los límites artísticos contemporáneos. El concepto requiere del uso de herramientas computacionales que se emplean en el modelaje de fenómenos físicos de interés para la ingeniería y la ciencia, lo cual le da un carácter de originalidad al producto final desde la perspectiva de ambas ramas.

El proyecto de la obra de arte consiste en el diseño y construcción de una estructura que genere el movimiento aleatorio de partículas de peso despreciable suspendidas en el aire. Para evaluar la factibilidad técnica se realizará el análisis físico utilizando el software libre de simulación de flujo *OpenFoam*.

OpenFOAM® (*Open Field Operation and Manipulation*) es una herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional que pertenece a la rama de software libre. Es un paquete computacional producido por OpenCFD Ltd, el cual posee una amplia base de datos de diversas áreas de la ingeniería y las ciencias. OpenFOAM tiene un extenso rango de modelos para resolver flujo de fluidos complejos que involucran reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, dinámica de sólidos y electromagnetismo. Incluye herramientas para mallar, y para pre procesar los datos y post procesar los resultados.

Con respecto a los modelos de turbulencia que ofrece OpenFOAM se incluyen los modelos: RAS, LES, DES y DNS.

EL modelo RAS (*Reynolds-Average Simulation*) también conocido como RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) en el cual las ecuaciones de gobierno se resuelven de forma acoplada, es el modelo más utilizado para calcular flujo industrial.

El modelo LES (*Large Eddy Simulation*) resuelve las estructuras turbulentas en el flujo a través de las ecuaciones de gobierno. Las recirculaciones grandes son resueltas directamente, pero las recirculaciones de menor tamaño que el tamaño de los elementos son modeladas. Aunque es menos costoso computacionalmente que el modelo DNS, su costo es muy grande para la mayoría de las aplicaciones prácticas.

El modelo DES (*Detached Eddy Simulation*) es un método híbrido que simula las regiones cerca de la pared con el enfoque RAS y el flujo de fluido con el enfoque LES.

EL modelo DNS (*Direct Numerical Simulation*) resuelve todas las escalas de la turbulencia a través de las ecuaciones de Navier-Stokes numéricamente sin utilizar un modelo de turbulencia. Su costo computacional es muy extenso por lo cual no es práctico para simular flujos industriales.

Para este trabajo el modelo de turbulencia empleado es el modelo RAS, dentro de ese modelo se encuentran los modelos  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , y  $k-\omega$  SST. Específicamente se empleo el modelo  $k-\varepsilon$  al cual se le realizo un análisis de sensibilidad con las diferentes condiciones de borde que ofrece.

## MÓDELO FÍSICO

El proyecto consiste en la construcción de una estructura que genere el movimiento de partículas de peso despreciable confinadas dentro de un paralelepípedo de base rectangular de 5.8m x 4.6m y 3.8m de altura. Dentro del volumen físico se encuentran máquinas generadoras de energía para provocar el movimiento de partículas. Se consideraron los ventiladores como máquinas generadoras del movimiento aleatorio para una primera aproximación, y unas entradas de aire de forma vertical para aislar el dominio físico de su entorno.

## MÓDELO NUMÉRICO

El modelo numérico tiene un volumen de control en forma de un paralelepípedo de base rectangular de 5.8m x 4.6m y 3.8m de altura. La entrada de aire vertical ocurre por una abertura de 30 cm de profundidad alrededor del volumen rectangular. Esta entrada de aire es de forma axial para aislar el dominio.

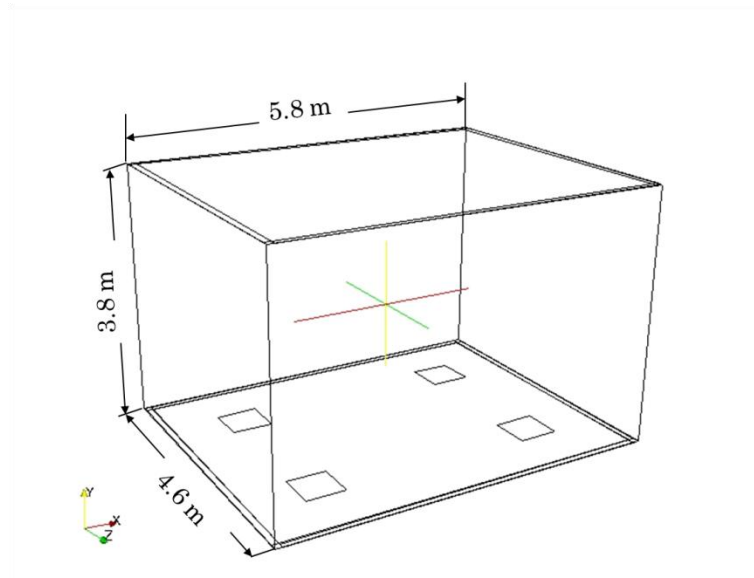


Figura 1. Modelo numérico representado en OpenFOAM

El dominio tiene otra entrada, producto del aire generador del movimiento. Para este caso se realizó un estudio de sensibilidad para garantizar que la entrada del dominio corresponda a la salida de aire de un ventilador. Se empleó data experimental a partir de un análisis del comportamiento cinemático de un ventilador para validar la condición de borde.

El software utilizado para simular el fenómeno físico fue OpenFOAM, el cual es un paquete computacional que engloba diferentes modelos, cada uno de ellos creados para resolver ecuaciones en derivadas parciales. El modelo utilizado para modelar el fenómeno fue pisoFoam, el cual resuelve en estado transitorio el flujo de un fluido incompresible.

Para las simulaciones en OpenFOAM el modelo de turbulencia utilizado fue el modelo de  $k$ - $\varepsilon$ . El software requiere conocer dichos valores como condición de entrada, por lo tanto se realizó un análisis de sensibilidad a los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  empleados en el simulador.

Para la selección de los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  se emplearon las siguientes relaciones.

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad \text{ecuación 1}$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad \text{ecuación 2}$$

$k$ : energía turbulenta cinética

$U$ : velocidad media del flujo

$I$ : intensidad de turbulencia

$\varepsilon$ : disipación de vortices turbulentos

$C_\mu$ : constante del modelo de turbulencia 0.09

$l$ : escala de longitud de turbulencia (longitud característica del dominio)

## **MALLA**

La malla empleada en el estudio se muestra en la Figura 1. Se realizó una validación de malla para garantizar la independencia de los resultados de la discretización espacial. La malla óptima tiene un total de 21444 elementos y 19006 nodos

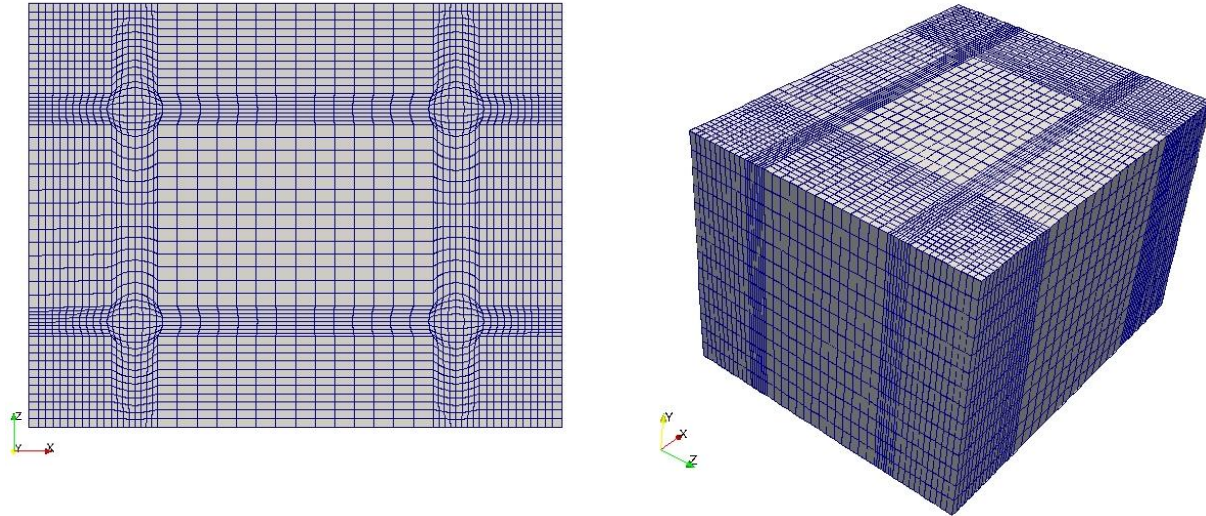


Figura 2. Malla óptima del dominio numérico. Izq. Malla vista desde abajo con el detalle del O-grid. Der. Malla global del dominio de cálculo

## METODOLOGÍA

La primera etapa del proyecto consiste en la selección de las condiciones de borde de acuerdo a las especificaciones del fenómeno físico. Luego de establecer las condiciones de borde se realizó un estudio concerniente al modelo de turbulencia.

### 1. Selección de las condiciones de borde

Para establecer las condiciones de borde se siguieron los criterios físicos de diseño, como son las dimensiones previamente citadas, el volumen numérico es un paralelepípedo sin paredes en el cual internamente tiene ventiladores que generen el movimiento del aire. Se realizó un estudio de sensibilidad de las condiciones de borde disponibles dentro de la herramienta numérica OpenFOAM para, luego, comparar los resultados obtenidos y encontrar aquellas condiciones que mejor representan el fenómeno físico a estudiar.

Las condiciones de borde empleadas en el modelo numérico se clasifican por zona, el dominio numérico se divide en 5 zonas como muestra la Figura 3. La zona Ventilador comprende ventilador 1 y ventilador 2.

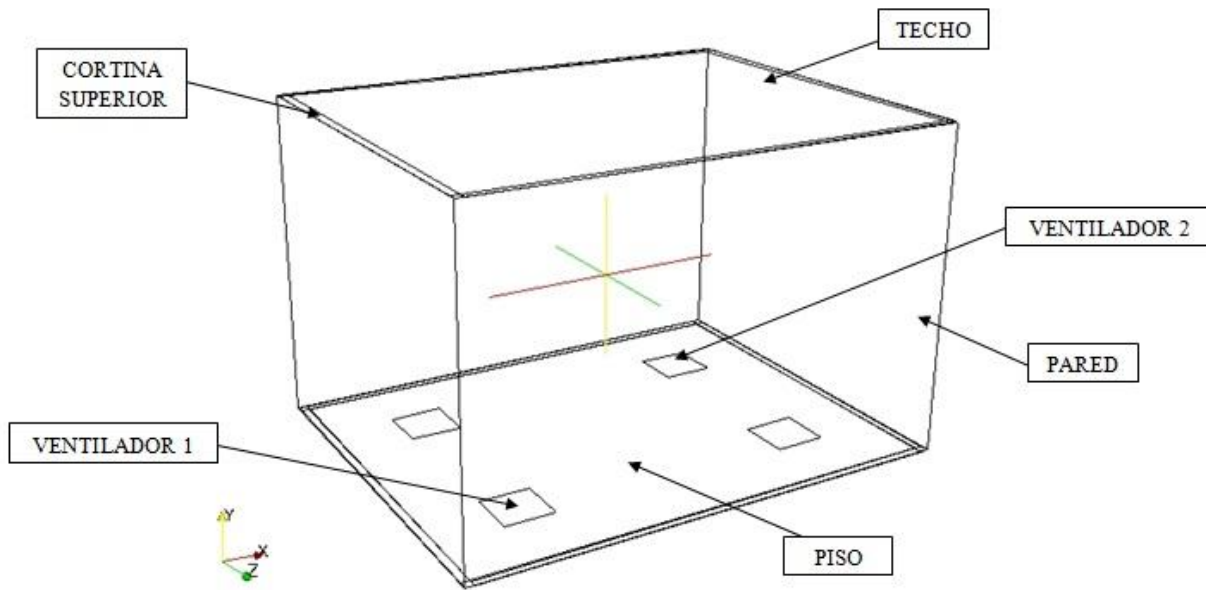


Figura 3. Condiciones de borde

El estudio con respecto al modelo de turbulencia se realizó en las regiones de condición de abierto “opening” y en las regiones de pared.

Tabla 1. Condiciones de Borde en OpenFOAM

Frontera	Condición de Borde	Características Adicionales
Piso	Pared	Sin rugosidad $V=0\text{m/s}$
Paredes	Abierto “Opening”	Presión de referencia=0 Pa
Techo	Abierto “Opening”	Presión de referencia=0 Pa
Entrada superior (cortina)	Entrada	Velocidad Axial = 5m/s
Entrada del ventilador	Entrada	Velocidad Axial = 5m/s

El modelo de turbulencia empleado  $k-\varepsilon$ , es un modelo de dos ecuaciones, es decir, incluye dos ecuaciones a las ecuaciones de transporte para representar las propiedades turbulentas del flujo. Esto permite considerar los efectos de convección y difusión de la energía turbulenta. La primera variable representa la energía cinética turbulenta,  $k$ . Mientras que  $\varepsilon$  representa la tasa de cambio de la disipación turbulenta.

El parámetro  $k$ , es la variable que determina la energía cinética turbulenta. Razón por la cual, se efectuó el análisis de sensibilidad sobre este parámetro. Se consideraron los siguientes valores para cada frontera, los cuales se calcularon de acuerdo a la ecuación 1 y 2, el valor de la tasa de cambio de la disipación turbulenta ( $\varepsilon$ ) depende de la energía cinética turbulenta ( $k$ ).

Tabla 2. Valores de  $k$  y  $\varepsilon$

Frontera	Condición de Borde	$k$	$\varepsilon$
Piso	Pared	Varia	<i>epsilonWallFunction</i>
Paredes	Abierto “Opening”	Varia	<i>turbulentMixingLengthDissipationRateInlet mixingLength 3</i>
Techo	Abierto “Opening”	Varia	<i>turbulentMixingLengthDissipationRateInlet mixingLength 3</i>
Entrada superior (cortina)	Entrada	<i>fixedValue</i> 0.09375	5.11935
Ventilador	Entrada	<i>fixedValue</i> 1.5	0.612372

La condición de borde *epsilonWallFunction*, es una función de pared utilizada para calcular el valor de la tasa de cambio de la disipación turbulenta,  $\varepsilon$ , considerando la pared cerca de la frontera. Por su lado, la condición de borde *turbulentMixingLengthDissipationRateInlet* permite calcular el valor de  $\varepsilon$ , considerando una longitud característica del dominio, en este caso se tomo esa longitud la altura del dominio 3m.

El análisis de sensibilidad en el modelo de turbulencia se realizo al variar el parametro  $k$ . En la Tabla 3 se muestran los distintos casos simulados con la finalidad de determinar cual es la condicion de borde y el valor de los parametros de la energía cinética turbulenta,  $k$ , y el valor de la tasa de cambio de la disipación turbulenta,  $\varepsilon$ , que modelan el flujo a la salida del ventilador.

Tabla 3. Distintas condiciones de bordes simuladas

	$k$				
	Piso	Paredes	Techo	Entrada superior	Ventilador
<b>CB1</b>	0.7618	0.443644	0.443644	0.09375	1.5
<b>CB2</b>	<i>kqRWallFunction</i>	0.023438	0.023438	0.09375	1.5
<b>CB3</b>	<i>kqRWallFunction</i>	<i>inletOutlet</i> <i>inletValue</i> 0.023438 <i>value</i> 0	<i>inletOutlet</i> <i>inletValue</i> 0.023438 <i>value</i> 0	0.09375	1.5
<b>CB4</b>	<i>kqRWallFunction</i>	<i>inletOutlet</i> <i>inletValue</i> 0.023438 <i>value</i> 0	<i>inletOutlet</i> <i>inletValue</i> 0.023438 <i>value</i> 0	0.09375	1.5
<b>CB5</b>	<i>kqRWallFunction</i>	0.023438	0.023438	0.09375	1.5

La condicion de borde *inletOutlet*, indica que dicha frontera permite la salida o entrada del flujo. El valor de la propiedad física cambia de acuerdo al sentido del flujo, si el flujo sale del dominio su valor es el indicado luego del comando *value*. Si el flujo entra al dominio, entonces, su valor es el indicado luego del comando *inletValue*.

La condición de borde *kqRWallFunction* es una función de pared, la cual es utilizada calcular el valor de la energía cinética turbulenta cerca de la pared. De esa forma, mejorar los resultados numéricos obtenidos cuando se emplea la condición de Newman nula en la pared, es decir, la derivada de la energía cinética turbulenta con respecto a la dirección perpendicular a la frontera es nula.

Luego de varias pruebas con las condiciones de borde del modelo de turbulencia  $k$ - $\varepsilon$  disponibles en OpenFOAM se obtuvo los siguientes resultados.

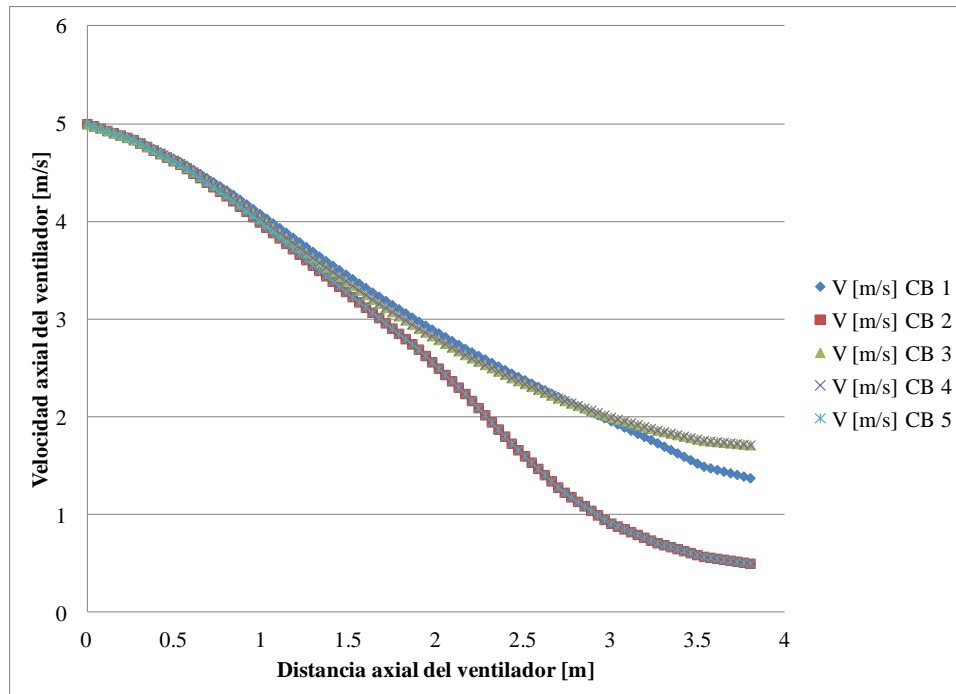


Figura 4. Resultados del estudio de sensibilidad en las condiciones de borde del modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  en OpenFOAM

La Figura 4 muestra la gráfica de velocidad axial a la salida del ventilador vs. distancia axial a la salida del ventilador. Se aprecia que la velocidad disminuye conforme aumenta la distancia axial. La diferencia es sustancial a partir de los 2 metros con respecto a la posición del ventilador. Esta diferencia se debe únicamente a los parámetros de turbulencia utilizados en las condiciones de borde, especialmente las condiciones de entrada y *opening*. Cabe mencionar que los resultados se presentan para un caso transitorio cuyo tiempo final es de 10s.

Para establecer cuáles son las condiciones de borde que modelan el comportamiento del flujo se compararon los resultados numéricos con la data experimental [1] para el caso de 120 s, tiempo en el cual se alcanzaba el estado estacionario. Consiguiendo que las condiciones de borde de acuerdo al caso 5 son las que mejor representan el comportamiento cinético del flujo a la salida del ventilador, como se observa en la Figura 5. El error cuadrático con respecto a los valores experimentales es 10%.

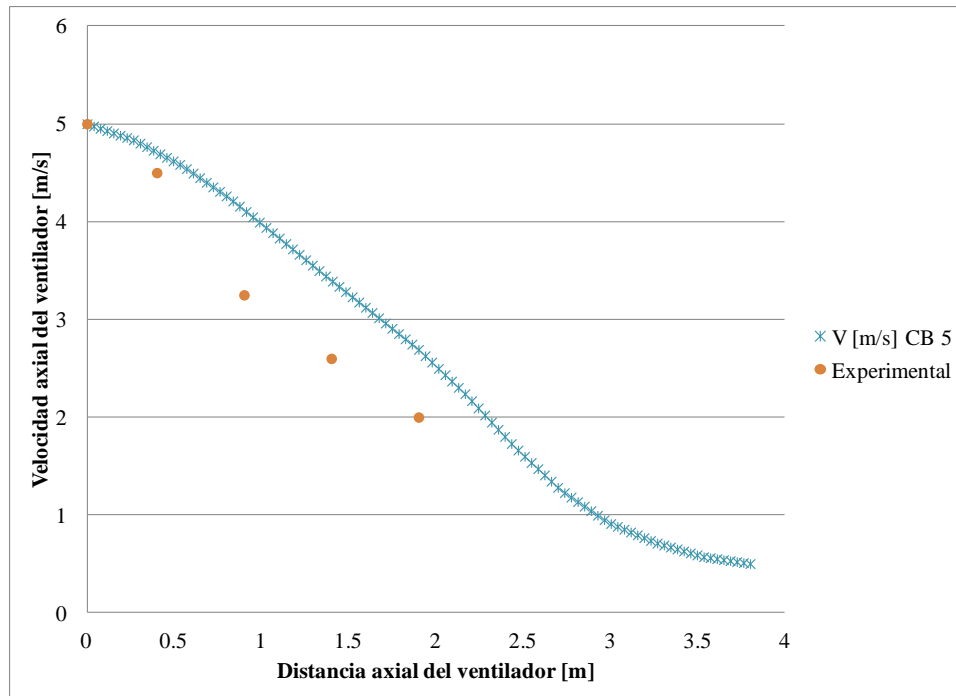


Figura 5. Comparación de los datos numéricos con los experimentales

## RESULTADOS

Una vez establecidas las condiciones de borde para modelar numéricamente el fenómeno físico se realizaron pruebas para garantizar el aislamiento del sistema, y así satisfacer la otra premisa asumida: el volumen físico debe contener al fluido y a las partículas.

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran los resultados para los tres casos analizados, el criterio de análisis establecido fue que la o las cortinas mantuvieran el flujo del fluido dentro del volumen de control.

Caso 1: Cortina superior, entrada de aire desde el tope superior para aislar el dominio.

Caso 2: Cortina inferior, entrada de aire desde la parte inferior para aislar el dominio.

Caso 3: Cortinas superior e inferior, entrada de aire por ambas fronteras.

Del análisis se determinó que el mejor caso para mantener el aire confinado en el volumen es el numero 3, el aire se mantiene dentro del dominio si se emplea una velocidad en la salida de la cortina de 10m/s. En el tercer caso, se plantea utilizar dos cortinas una superior y otra inferior, con estas cortinas es posible aislar el dominio del flujo, aunque se presentan recirculaciones en la frontera donde llegan ambos chorros de aire, aproximadamente en la mitad del dominio, estas recirculaciones pudiesen ayudar al movimiento aleatorio de las partículas internas, por lo que representan una contribución interesante al movimiento del flujo internamente.



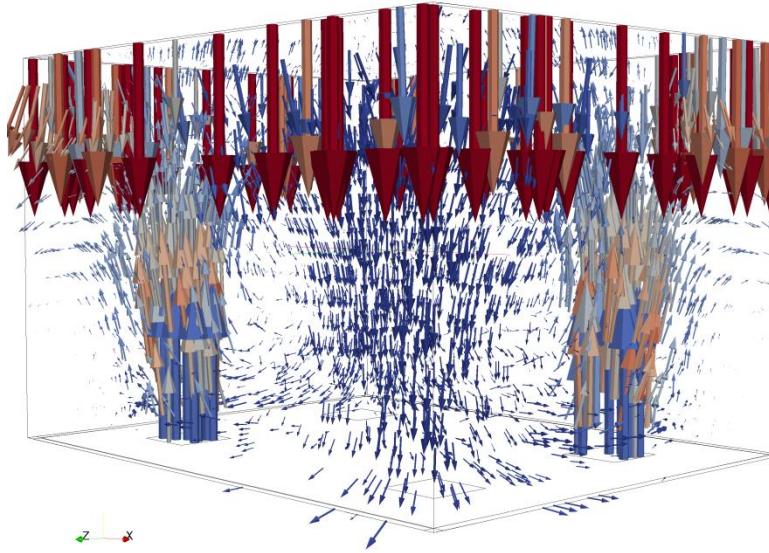


Figura 6. Vectores de corriente y líneas de velocidad. Caso 1: entrada de aire superior. 5m/s

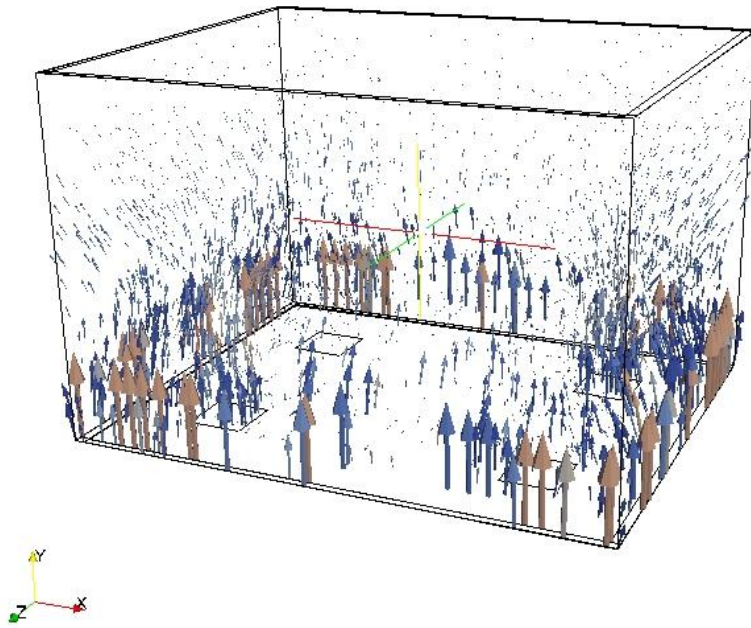


Figura 7. Vectores de corriente. Caso 2: entrada de aire inferior. 10m/s

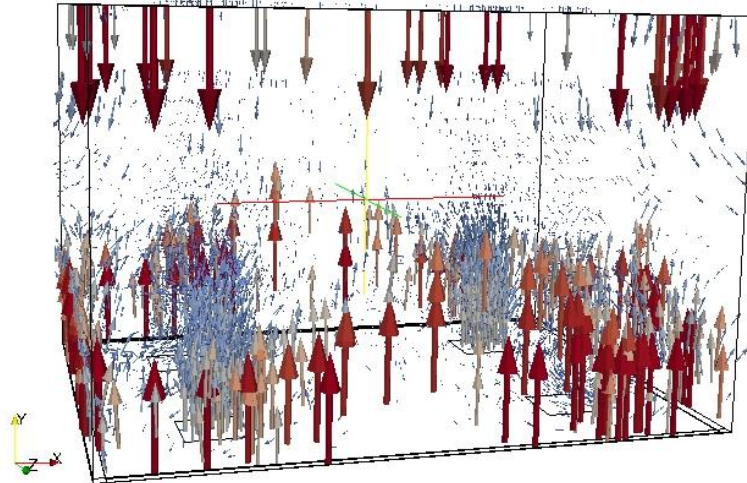


Figura 8. Vectores de corriente. Caso 3: entrada de aire superior e inferior

La siguiente fase es aumentar el detalle en el modelaje del flujo saliente del ventilador, considerar que la velocidad a la salida del ventilador no es axial. Para ello se realizaron pruebas considerando un vector de velocidades con componentes en sus tres direcciones, y pruebas considerando un subdominio rotacional. Aún las simulaciones concernientes a la segunda fase no son concluyentes.

## CONCLUSIONES

Se simuló computacionalmente el fenómeno físico utilizando el módulo numérico pisoFOAM del paquete computacional openFOAM para flujo turbulento y fluido incompresible en régimen transitorio. El software openFOAM representa el comportamiento cinético del flujo a la salida del ventilador.

Se realizó un estudio de sensibilidad de los parámetros turbulentos obteniendo aquellos valores particulares para cada frontera que mejor representan el comportamiento dinámico del flujo.

Se validó el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  para el comportamiento dinámico de flujo de fluido incompresible confinado, y generado por ventiladores.

Desde el punto de vista financiero, utilizar el software openFOAM representa una ventaja competitiva en costos. Por su condición de software libre, y su correcta y adecuada predicción en el comportamiento del flujo turbulento, monofásico e incompresible en régimen transitorio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] González Acuña, R. (2012) **“Caracterización y Optimización exergética de un colector solar de placa plana empleado en procesos de Desalinización Solar”**. Tesis de Maestría. Universidad Simón Bolívar. Venezuela