Análisis de la Implementación de un Filtro tipo Lecho de Arena para el Venteo de una Central Nuclear

Delfina Cuevas Vásquez y Eduardo Sáinz Mejía
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Gerencia de Ciencias Aplicadas
Departamento de Automatización e Instrumentación
delfy.cu@gmail.com; eduardo.sainz@inin.gob.mx

Javier Ortiz Villafuerte
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Gerencia de Ciencias Aplicadas
Departamento de Sistemas Nucleares
javier.ortiz@inin.gob.mx

Resumen

El venteo filtrado de la contención ha sido adoptado en países europeos para mitigar las consecuencias derivadas del exceso de presión de la contención durante un accidente severo. Cuando el venteo ha tenido lugar, los productos de fisión se liberan directamente al medio ambiente, a menos que se coloque un filtro en la trayectoria del mismo, por lo que se utilizan varios tipos de filtros para atrapar los productos de fisión. Los filtros de venteo de la contención instalados actualmente utilizan diferentes tecnologías de filtración que involucran más de un medio. Los que utilizan el agua como la primera etapa de filtración se llaman sistemas húmedos, están equipados con etapas adicionales para eliminar las gotas de agua y las emisiones de aerosoles finos, e incluso pueden además estar equipados con un elemento que contiene ciertos medios de absorción para la filtración de especies de yodo gaseoso. Otros diseños, basados en la filtración de lecho profundo como la etapa de retención principal, los llamados filtros secos, utilizan medios de filtración de fibra metálica, cerámica o arena para atrapar aerosoles.

El presente trabajo evalúa las características hidráulicas del filtro tipo lecho de arena diseñado por EDF como candidato a instalarse en la contención del BWR Mark II (tipo de contención primaria de la CNLV). La evaluación del filtro de lecho de arena se realizó utilizando el paquete de software de fuente abierta OpenFOAM. Se generaron modelos de cada zona del dispositivo de filtrado y mediante una serie cálculos paramétricos de mecánica de fluidos computacional se obtuvieron las características hidrodinámicas relevantes del dispositivo, tales como caídas de presión contra gasto másico y campos de presiones y velocidad ante diferentes condiciones de operación.

Por otra parte, se realizó la validación del modelo del filtro de lecho de arena al comparar los resultados de pruebas experimentales realizadas en una columna de arena del programa PITEAS (1985-1986) contra la simulación en OpenFOAM. Los resultados obtenidos son muy cercanos a los obtenidos experimentalmente.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el accidente nuclear de Chernobyl, las Centrales Nucleares Europeas han optado por instalar filtros en las tuberías de venteo de la Contención, cuya función es ayudar a mitigar las consecuencias de un accidente severo. En el caso de los Estados Unidos de América (USA, por sus siglas en inglés de United States of America), como resultado de evaluar las acciones regulatorias necesarias después del accidente de la central de Fukushima, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC, Nuclear Regulatory Commission) emitió la orden EA-13-109 de 2013 [1], en la cual se requiere la instalación de un sistema de venteo en el contenedor primario que debe mantenerse operable para mitigar las consecuencias de un accidente severo, a los reactores tipo BWR (Boiling Water Reactor) con contención primaria del tipo Mark I y Mark II. La orden provee dos fases de implantación. En la primera se debe instalar el venteo desde el pozo húmedo y en la segunda, o se instala el venteo desde el pozo seco o bien se demuestra que este último no es necesario. Y así, aunque explícitamente no se solicita la instalación de filtros, debe evaluarse la conveniencia de instalarlos, sobre todo en los posibles escenarios de venteo desde el pozo seco.

Los filtros de venteo de la contención instalados actualmente en centrales nucleares de Europa y Canadá, utilizan diferentes tecnologías de filtración que involucran más de un medio de filtrado. Los que utilizan el agua como la etapa de filtración se llaman sistemas húmedos, están equipados con etapas de filtrado adicionales para eliminar las gotas de agua y las emisiones de aerosoles finos, e incluso pueden estar equipados con ciertos medios de absorción para la filtración de especies de yodo gaseosos. Otros diseños, llamados filtros secos, se basan en la filtración de lecho profundo como etapa de retención principal y utilizan medios de filtración de fibra metálica, cerámica o arena para la filtración de aerosoles [2].

Un ejemplo comúnmente citado que ha demostrado la eficacia de la filtración granular de aerosoles es en la limpieza de los gases que arrastran partículas radioactivas en las plantas de procesamiento de combustible en Hanford, Washington, y en el río Savannah, Georgia, que utilizan filtros de arena para este fin. El medio de filtrado utilizado se compone de capas de gránulos gruesos (secciones de pre filtro) y son seguidas por capas de arena fina, dispuestas a lo largo de la dirección del flujo de gas en orden descendente del tamaño de partícula. Su vida útil parece estar limitada tan sólo por la integridad del material del filtro [3] y han sido diseñados e instalados por Electricidad de Francia (EDF, Électricité de France) en cada reactor de agua presurizada (PWR, Pressurized Water Reactor) en Francia, por lo cual es una opción considerada a evaluarse como candidato a instalarse en la contención de un BWR Mark II.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas de venteo filtrado de la contención (FCVS)

El concepto de Sistemas de Venteo Filtrado de la Contención (FVCS, Filtered Containment Venting System) surgió de los análisis de los resultados del informe WASH-1400 [4], el cual mostró que muchos de los accidentes de mayores consecuencias en las centrales nucleares implican el fallo de la contención causado por la sobre presurización [5]. Estos sistemas han sido instalados principalmente en las centrales nucleares de Europa y Canadá para la despresurización

controlada de la atmósfera de la contención en caso de un accidente severo [6]. Están diseñados para aliviar la presión interna de la contención mediante la apertura deliberada de dispositivos de alivio de presión, ya sea una válvula o disco de ruptura durante el curso de un accidente severo [7], en el que la mezcla de gas y vapor radiactivo de la contención se descarga en un sistema diseñado para eliminar los radionúclidos [6] a través de un sistema de filtrado.

Por otra parte, los FVCS son especialmente atractivos porque se pueden adaptar a las plantas en operación, ya que el sistema de filtrado podría ser alojado en un edificio independiente fuera de la contención y conectarse a ella a través de una línea de venteo [5].

Para los países en los que se emplea, los FCVS refuerzan la función de la contención nuclear como última barrera para la liberación de productos radiactivos al medio ambiente, reduciendo las consecuencias radiológicas de salud para el público, y de contaminación del suelo. Sin embargo, a pesar de que las liberaciones de radiactividad en el medio ambiente se evitarían en gran medida, el funcionamiento de FCVS durante un accidente aún requiere de instrucciones claras sobre cuándo iniciar el venteo, integrando las decisiones tomadas por las autoridades nacionales, y la coordinación con los servicios de emergencia dentro y fuera de sitio [2].

2.2. Filtro de lecho de arena

El filtro tipo lecho de arena evaluado en este trabajo fue diseñado por la empresa EDF. Es un tanque cilíndrico con aislamiento térmico fabricado en acero inoxidable 316L. Es un cilindro de eje vertical con los extremos superior e inferior toriesféricos. Se coloca en el techo de un edificio del reactor, y es común para 2 unidades individuales para PWR 900 MWe. Sus principales medidas son: diámetro interior 7.3 m, altura de 3.5 m, área de filtrado de 42 m^2, peso vacío 12 toneladas, peso operativo de 92 toneladas, el peso de la arena es de 65 toneladas. El lecho de arena se compone de una capa de arena gruesa de 0.8 m de espesor apoyada por una capa de arena fina de 0.2 m. El gas se distribuye homogéneamente a través del filtro por una malla Klevar que envuelve el lecho de arena. Después de pasar por lecho de arena, el gas se recoge mediante una red de filtros de acero inoxidable situados en la arena fina expandida y se transfiere a un colector rectangular toroide en la periferia del filtro. La Figura 1 muestra el esquema del filtro [2].

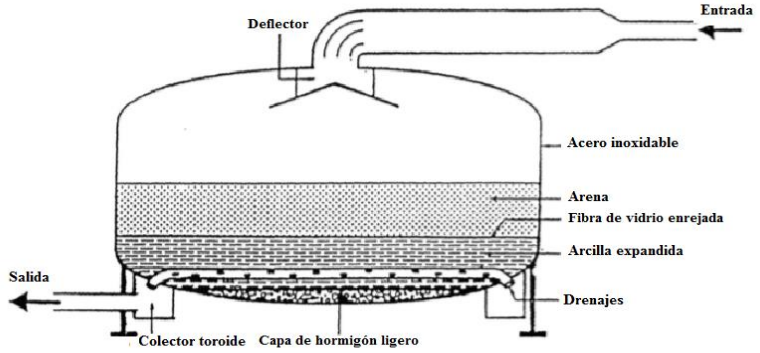

Figura 1. Esquema del filtro de lecho de arena

3. METODOLOGÍA

3.1. Simulación OpenFOAM del filtro tipo lecho de arena

La evaluación del filtro de lecho de arena se realizó usando un paquete de software de fuente abierta llamado OpenFOAM [8], el cuál es básicamente una biblioteca de C++ para personalizar y extender solucionadores numéricos de problemas de dinámica de fluidos. También se usó la interfaz gráfica del paquete SALOME para generar el modelo geométrico y la malla del filtro así como para la obtención de mapas de las variables de presión y velocidad del modelo analizado.

3.1.1 Modelo geométrico

El modelo geométrico del filtro de lecho de arena se generó con el módulo GEOM del paquete SALOME. La Figura 2 muestra el modelo geométrico generado.

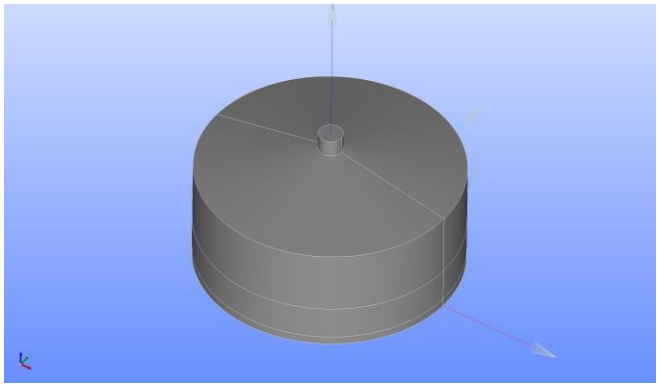

Figura 2. Modelo geométrico del filtro tipo lecho de arena

3.1.2 Generación de malla

La malla generada para el modelo geométrico es de tipo prisma con un algoritmo descrito en Tabla I y una hipótesis de 30 segmentos distribuidos equidistantemente en 1D.

Tabla I. Algoritmo de mallado

3D	2D	1D
Extrusion	Quadrangle	Wire Discretization (Regular)

La malla generada se muestra en la Figura 3 y sus características se encuentran en la Tabla II.

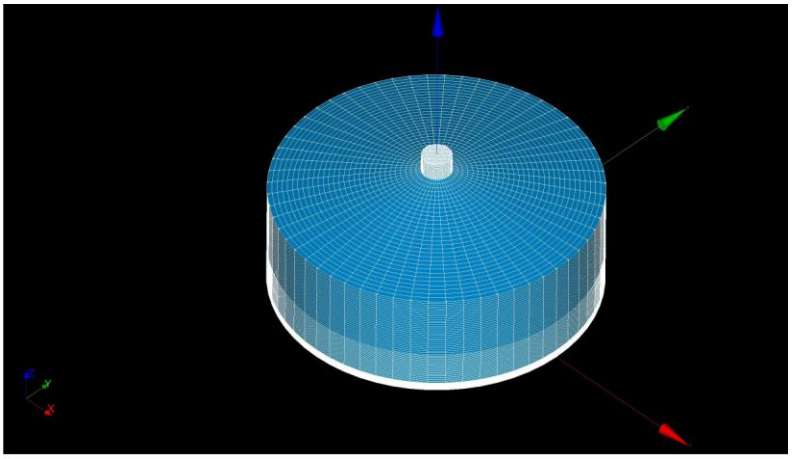

Figura 3. Malla tipo prisma para el filtro de lecho de arena

Tabla II. Información de la malla generada

NODOS	1D	2D	3D
111,740	660 líneas	8,508 triángulos y 9,000 cuadrángulos	212,700 prismas

3.1.3 Definición de grupos sobre la malla

Se definieron grupos de caras y volúmenes sobre la malla para imponer en ellos condiciones de frontera y propiedades termofísicas. Los grupos de caras son: "inlet" (a entrada del gas en el filtro), "outlet" (salida del filtro), "wall1" (pared de zona de arena fina), "wall2" (pared de la zona de arena gruesa) y "wall3" (pared de la zona vacía y domo). Los grupos de volúmenes que se definieron para las dos zonas porosas son: "arena-gruesa" y "arena-fina". En ellos se impondrán las propiedades características del medio poroso. La Figura 4 muestra los grupos definidas sobre la malla.

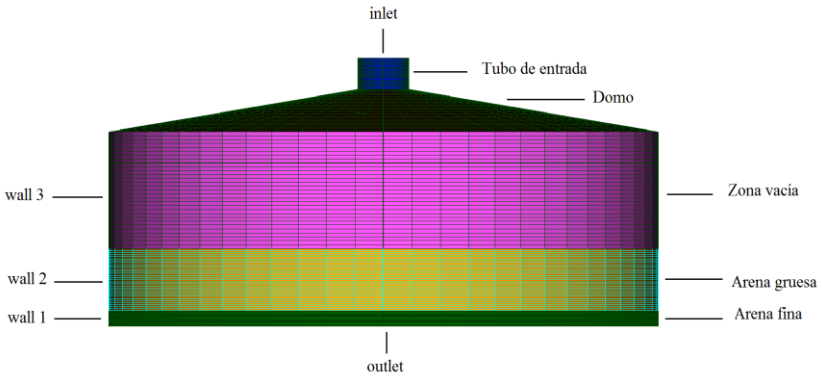

Figura 4. Grupos de caras y volúmenes.

3.1.4 Selección del solucionador OpenFOAM

Se evaluaron tres solucionadores de OpenFOAM dedicados al transporte de gases en medios porosos y se seleccionó el "rhoPorousMRFSimpleFoam", ya que con él se obtuvieron soluciones estables para la malla específica empleada para el filtro.

3.1.5 Estructura de archivos de un caso OpenFOAM

Un caso es como se denomina a un conjunto de carpetas y archivos que definen un problema específico y la forma en que se va a resolver. Para poder solucionar un fenómeno se deben de crear tres carpetas: "*constant"*, "*system"* y una carpeta inicial. Esta última no tiene por qué corresponder con el tiempo cero ya que el caso puede ser una parte de un proceso que se haya simulado previamente. La estructura de directorios para un caso OpenFOAM, se muestra en la Figura 5.

En el directorio *"system"* se incluyen todos los archivos relacionados con el proceso de solución. Contiene al menos los siguientes 3 archivos: "*controlDict", "fvSchemes" y "fvSolution".*

En el archivo *"controlDict"* es donde se establecen los parámetros de control de ejecución incluyendo el tiempo de inicio/final, el paso del tiempo e impresión de datos, así como los parámetros de salida de los datos; en "*fvSchemes"* se establecen los esquemas de discretización utilizados en la solución; y *"fvSolution"* determina que esquema de solucionador de ecuaciones se va a utilizar para cada una de las variables a calcular.

El directorio *"constant"*, contiene una descripción completa de la malla del caso en un subdirectorio llamado "*Polymesh"*, además cuenta con archivos que especifican las propiedades físicas de los materiales involucrados.

Los directorios de tiempo contienen los archivos individuales de datos para cada campo en particular. Los datos pueden ser los valores iniciales y condiciones de frontera que el usuario debe especificar para definir el problema; o bien, resultados previos de OpenFOAM. El nombre de cada directorio de tiempo se basa en el tiempo simulado en el que los datos se imprimen.

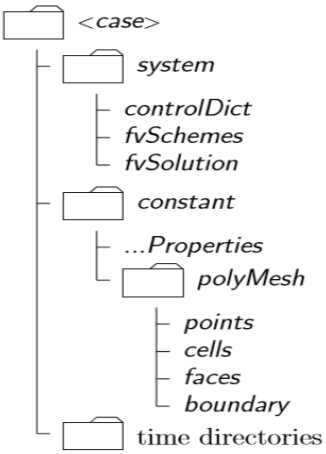

Figura 5. Estructura de archivos de un caso OpenFOAM

3.1.6 Generación de archivos de datos de entrada.

En los archivos de datos de entrada se definieron las siguientes condiciones de frontera para el gas de descarga, tomadas de la referencia [9]:

Presión: 101 325 Pa.
Temperatura: 413 K.
Gasto másico: 30 kg/s.

La composición de la mezcla considerada es de:

33% de aire.
29% de vapor de agua.
33% de CO_2
5% de CO.

Se realizó el cálculo de las propiedades termofísicas de la mezcla y se definieron en el archivo "*thermophysicalProperties".*

La caracterización del medio poroso quedó definida en el archivo "*porousZone"* con valores propuestos de permeabilidad de 2×10^{-10} m^2 para la zona de arena gruesa y 2×10^{-12} m^2 para la zona de arena fina.

3.1.7 Realización de cálculos OpenFOAM y exportación de resultados a SALOME

Con los datos anteriores y la malla propuesta, se realizaron cálculos con diferentes gastos másicos en la condición de frontera de entrada. Para cada caso se obtienen los mapas de presión y velocidad en las diferentes zonas del volumen del filtro. Se empleó un intervalo de valores de 5 a 40 kg/s en el gasto másico de entrada.

Es necesario exportar los resultados de OpenFOAM al paquete SALOME, que es en dónde se generaron mapas para las variables de presión, velocidad y temperatura de los modelos analizados.

4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se llevó a cabo un cálculo para un dispositivo experimental consistente en una columna de arena en la primera etapa, perteneciente al programa de investigación y desarrollo de los sistemas de filtración y venteo para la contención de reactores de agua presurizados (PWR), en los laboratorios del Centro de Estudios Nucleares de Cadarache (Programa PITEAS) [9]. El objetivo de este cálculo es comparar los resultados de los cálculos CFD con los resultados experimentales.

4.1 Descripción de las pruebas experimentales

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en una columna de arena de 80 cm de altura y 20 cm de diámetro. Para estas pruebas, los gases incondensables (CO y CO_2) del fluido de referencia fueron remplazados por aire, resultando en las siguientes características para la mezcla de gases usada para esta prueba:

- Temperatura: 140 ºC.
- Presión: ligeramente mayor que la presión atmosférica.
- Composición en peso: aire 68% y vapor 32%.

La velocidad del gas en el filtro granular fue uno de los parámetros de prueba, tomando valores alrededor del de referencia de 10 cm/s (pruebas a 7 cm/s y 14 cm/s).

Los aerosoles usados fueron compuestos de carbonato de cesio. Un estudio paramétrico de la influencia del diámetro medio de masa aerodinámica se llevó a cabo usando valores alrededor de 1 µm: 0.6, 0.8, 1.4, 1.5 µm.

Las pruebas, las cuales fueron de relativamente corta duración (1 hora), fueron conducidas bajo dos diferentes conjuntos de condiciones:

- Condiciones de equilibrio térmico (condiciones de operación en estado estacionario) para el filtro, es decir, el precalentamiento del filtro a la temperatura del gas incidente.
- Condiciones térmicas transitorias (condiciones de operación de transición), es decir, con el filtro a temperatura ambiente al comienzo de la prueba.

La arena usada fue de los pozos de arena Cattenom en Lorena, Francia. Fueron probados diferentes tamaños de partículas log-normal (forma de representar la distribución del tamaño de partículas en granulometría) obtenidas por cribado: 1.6, 1.2, 0.7, 0.5 mm. La desviación estándar fue menor que 2.

Un estudio paramétrico completo del coeficiente de purificación como una función del diámetro de los aerosoles, del tamaño de partícula de arena y de la velocidad de los gases en el filtro fue emprendido bajo condiciones de operación en estado estacionario. Las mediciones individuales bajo condiciones de operación en estado transitorio confirmaron los resultados obtenidos bajo condiciones de estado estacionario. Las caídas de presión medidas bajo cada conjunto de condiciones diferían solo ligeramente. No se observó ningún signo de atasco durante las pruebas; el contenido de aerosol registrado en la arena durante las pruebas alcanzaron 1,300 g/m^2 para la arena de 0.7 mm y 191 g/m^2 para la arena de 0.5 mm. La cantidad de aerosoles re-arrastrados y depositados por la acción del flujo de gas fue despreciable. Las pruebas se llevaron a cabo para 0.5 mm de arena con una carga inicial de 144 g/m^2 y una velocidad de 7 cm/s. La fracción liberada en una hora fue menor que 10^{-4}.

En base a estos resultados fue elegida una arena con tamaño de partícula lognormal correspondiente a una masa de diámetro medio de 0.6 mm y una desviación estándar menor que 2. Bajo estas condiciones, el coeficiente de purificación obtenido es considerablemente mayor

que 10 y la caída de presión para la velocidad de referencia, 10 cm/s, es menor que el límite de 100 mbar el cual ha sido impuesto [9].

4.2 Simulación con OpenFOAM del Experimento

Los cálculos realizados en OpenFOAM del experimento descrito anteriormente se limitan al estado estacionario y a los cálculos hidrodinámicos.

4.2.1 Modelo geométrico y generación de malla

El dispositivo experimental se modela como un cilindro recto de sección contante con las dimensiones indicadas en la sección anterior. La malla generada para este caso es tetragonal definida con el algoritmo NETGEN 1D-2D-3D y las hipótesis (parámetros) mostradas en la Tabla III.

Tabla III. Hipótesis de malla NETGEN 1D-2D-3D

Parámetro.	Valor
Tamaño Máximo	0.015
Tamaño Mínimo	0.0015
Finura	MODERADO

Así se generó una malla de 5131 nodos, 5938 triángulos y 20984 tetraedros. Se definieron 3 grupos de caras sobre la misma para imponer en ellos las condiciones de frontera tanto térmicas como mecánicas, estos fueron: “inlet”, “wall" y “outlet” en la entrada, pared y salida de la columna respectivamente. El medio poroso quedó definido en un grupo de volumen llamado *“porosityWall”.*

4.2.2 Generación de archivos de datos de entrada

La temperatura, presión y gasto másico se definieron en la carpeta cero del caso. Las propiedades termodinámicas (Calor específico *Cp* y Entalpía de fusión *Hf*) y de transporte (viscosidad μ y el número de Prandtl *Pr*) de la mezcla se calcularon y se establecieron en el archivo “*thermophysicalProperties”* dentro de la carpeta “*Constant”.*

El medio poroso se define en el archivo “*porousZone”* mediante un sistema de coordenadas y un valor de Darcy. El valor de Darcy es el inverso de la permeabilidad intrínseca. La permeabilidad intrínseca es una propiedad del medio poroso que mide la capacidad del medio para permitir el paso de los fluidos a través de él. Sus unidades están dadas en m^2.

La ecuación utilizada para calcular la permeabilidad intrínseca en esta prueba es la de Kozeny-Carman (KC) que relaciona la permeabilidad y la porosidad por:

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{\Psi_{CK}(1-\varepsilon)^2} \tag{1}$$

$$\Psi_{CK} = 180 \tag{2}$$

donde:

d = diámetro de la partícula.
ε = porosidad del medio.
K = permeabilidad intrínseca.
Ψ_{CK} =180 para lechos de partículas esféricas empacadas al azar.

Los valores de porosidad fueron estimados para los distintos tamaños de diámetro de arena.

4.2.3 Cálculos OpenFOAM y exportación de resultados a SALOME

La Tabla IV reporta los valores calculados para realizar las pruebas.

Tabla IV. Datos de las pruebas realizadas

Prueba	Diámetro de arena (mm)	Porosidad estimada (%)	Permeabilidad K (m^2)	Darcy $1/K$ (m^{-2})
1	0.5	0.39	2.214122548 E-10	4516461842
2	0.7	0.37	3.474142661 E-10	2878407992
3	1	0.343	5.193726976 E-10	1925399630
4	1.2	0.324	5.954312524 E-10	1679455010
5	1.5	0.296	6.540934917 E-10	1528833435
6	1.6	0.287	6.613541616 E-10	1512049153

Se generaron mapas de la variable de presión para todas las pruebas y se registraron los resultados obtenidos para compararlos con registrados en las pruebas experimentales.

5. RESULTADOS

5.1 Filtro de lecho de arena

5.1.1 Comportamiento de la presión en el dispositivo de filtrado.

En el filtro de lecho de arena se observa que la presión es prácticamente constante desde el tubo de entrada hasta la superficie de la arena (como se espera), ya que esta zona está vacía y no hay ningún medio físico que obstruya el flujo y considerando que la fricción en las paredes es despreciable. En la zona de arena gruesa se registró una caída de presión de 67 Pascales, en cambio en la zona de arena fina se obtuvo una mayor caída de presión de 646312 Pascales. Este comportamiento se observa en la gráfica de la Figura 6.

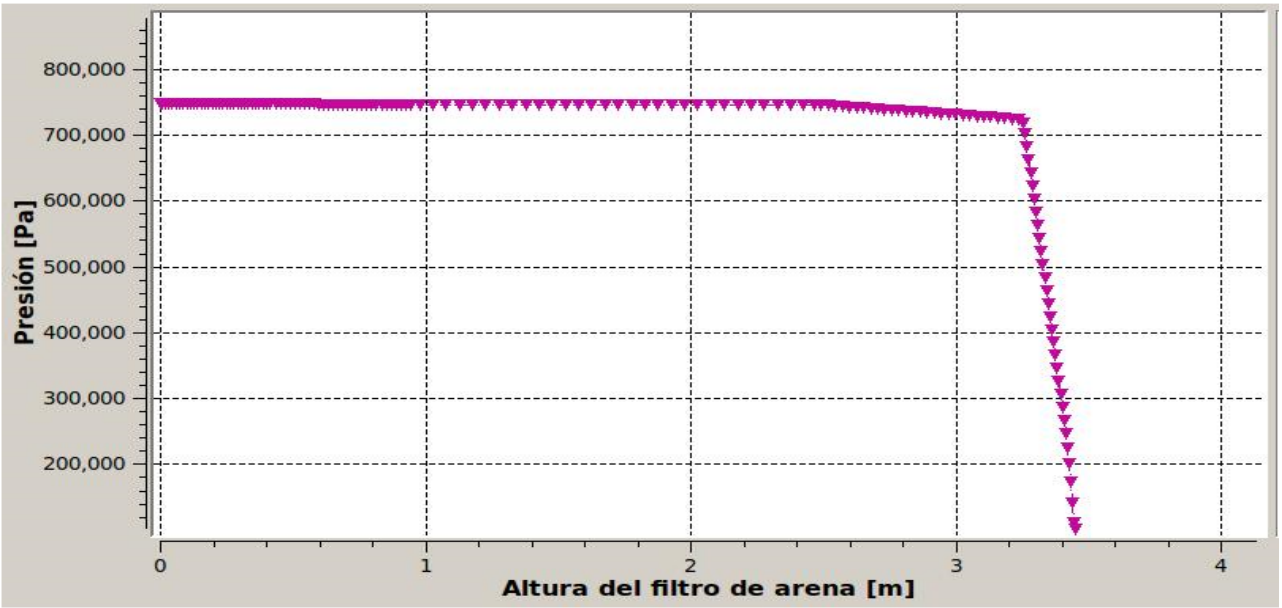

Figura 6 Gráfica de la caída de presión a través del filtro

5.1.2 Comportamiento de la velocidad a través del filtro

De acuerdo a la gráfica en la Figura 7, se observa que la velocidad crece en el tubo de entrada y luego decrece desde la entrada al domo del filtro hasta la superficie de la arena, de 49.5 a 0.87 m/s.

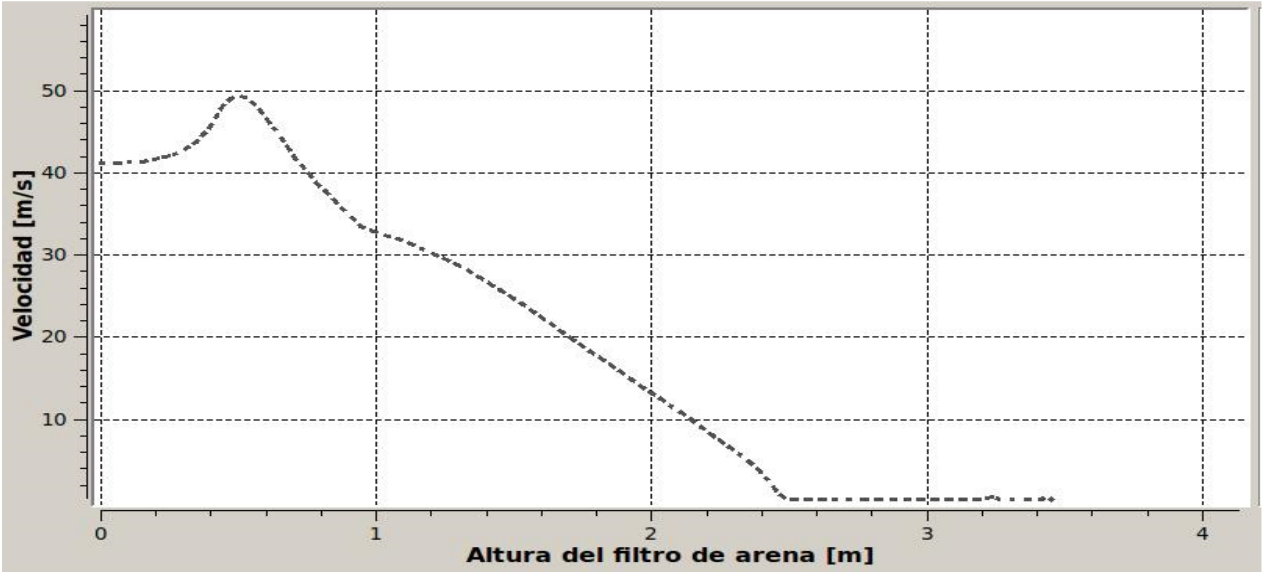

Figura 7. Velocidad a través del filtro

La Figura 8 muestra los patrones del flujo en el interior del filtro donde se observa que la descarga de gases se concentra en el centro generando patrones de turbulencia a los lados. Esto

es un indicativo de la potencial saturación del medio en esa zona con la consecuente disminución de la eficiencia de filtrado.

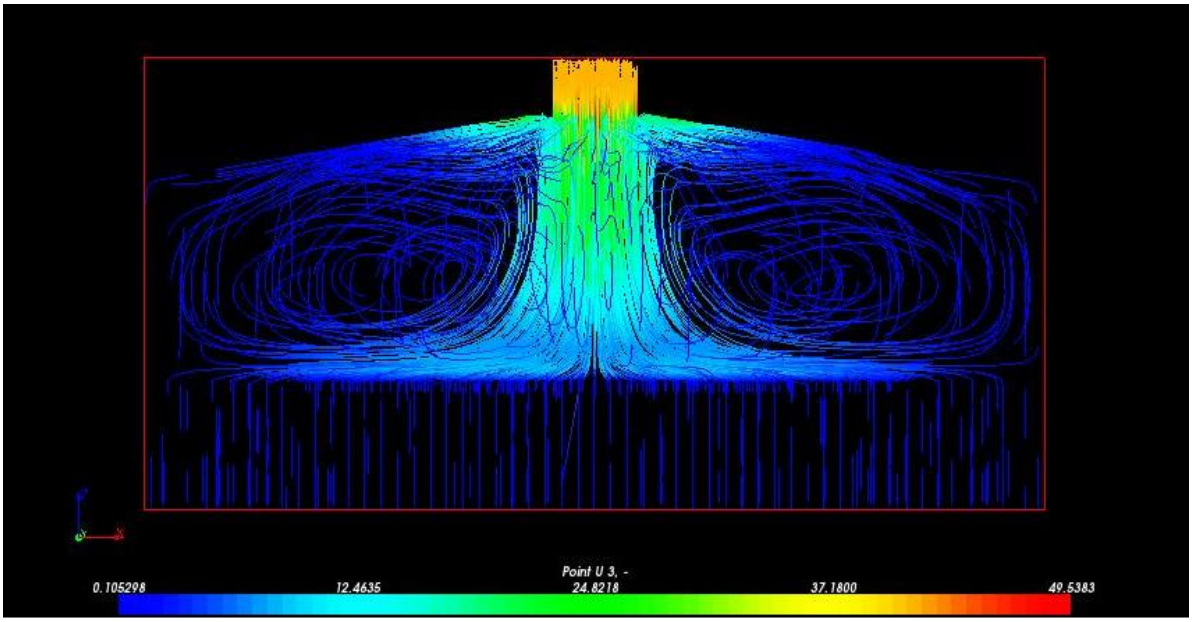

Figura 8. Líneas de flujo a través del filtro de arena

Debido a que la velocidad a la entrada al filtro de lecho de arena es alta y a que el flujo se concentra en la zona central, surge la necesidad de agregar un deflector para lograr una distribución homogénea del gas a través dela sección transversal del tanque y con ello evitar la erosión en la parte central de la superficie del lecho de arena, lo que disminuye la eficiencia de filtrado. La Figura 9 muestra los patrones de flujo en el domo y la zona vacía del filtro una vez que el deflector fue agregado.

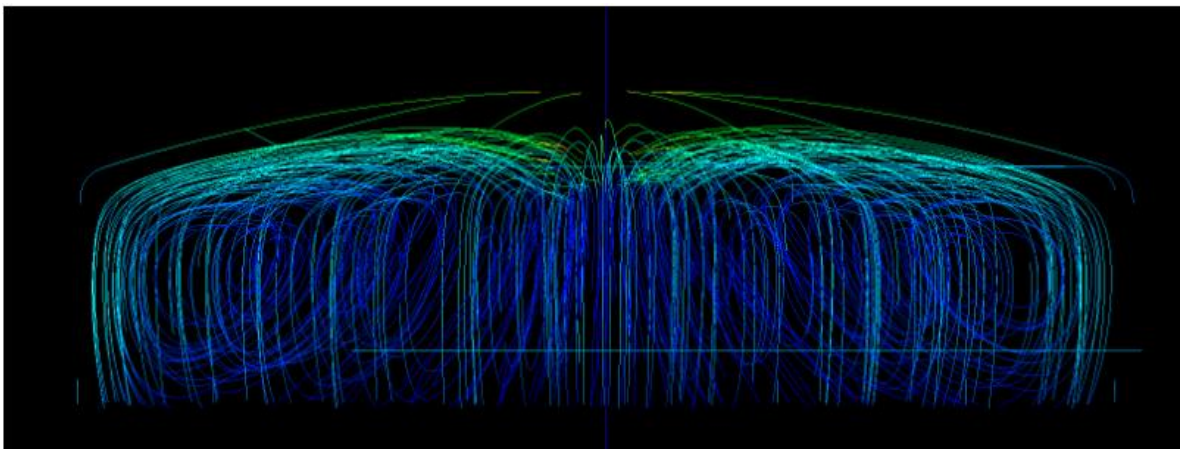

Figura 9. Líneas de flujo usando un deflector

5.1.3 Caída de presión contra gasto másico.

La Figura 10 muestra la tendencia lineal que hay entre la caída de presión contra diferentes gastos másicos ensayados. Se observa que la caída de presión es proporcional al gasto másico, ya que al aumentar la tasa de flujo de gas mayor es la resistencia al flujo que opone el lecho de arena.

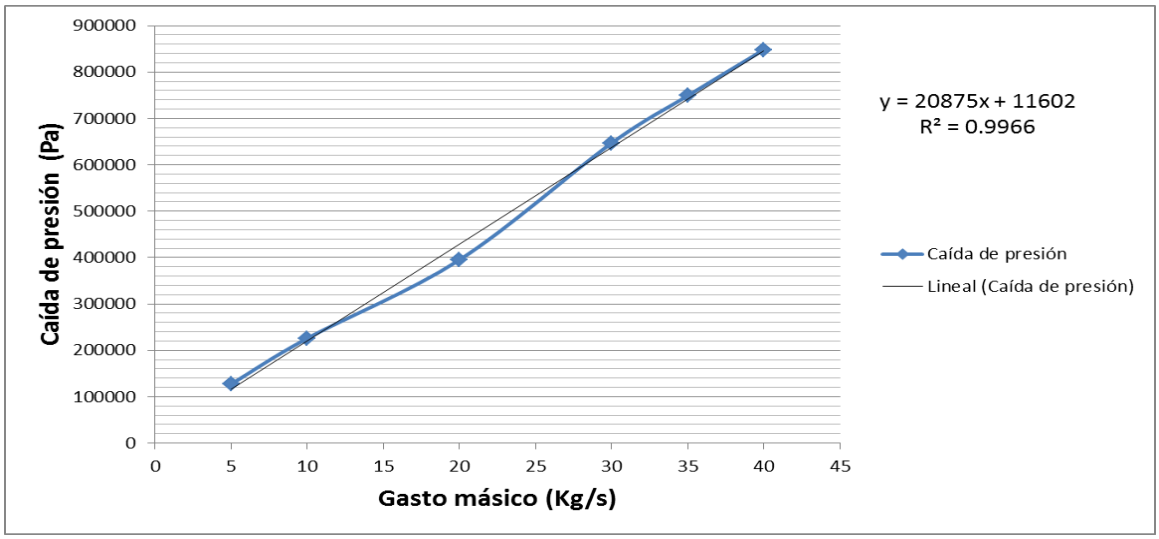

Figura 10. Caída de presión contra gasto másico

5.2 Comparación de modelo OpenFOAM con datos experimentales

La Figura 11 reporta la comparación de los resultados de las pruebas experimentales del programa PITEAS (1982-1986) con la simulación numérica. En ella se observa que los resultados obtenidos del son muy cercanos a los que se obtienen experimentalmente.

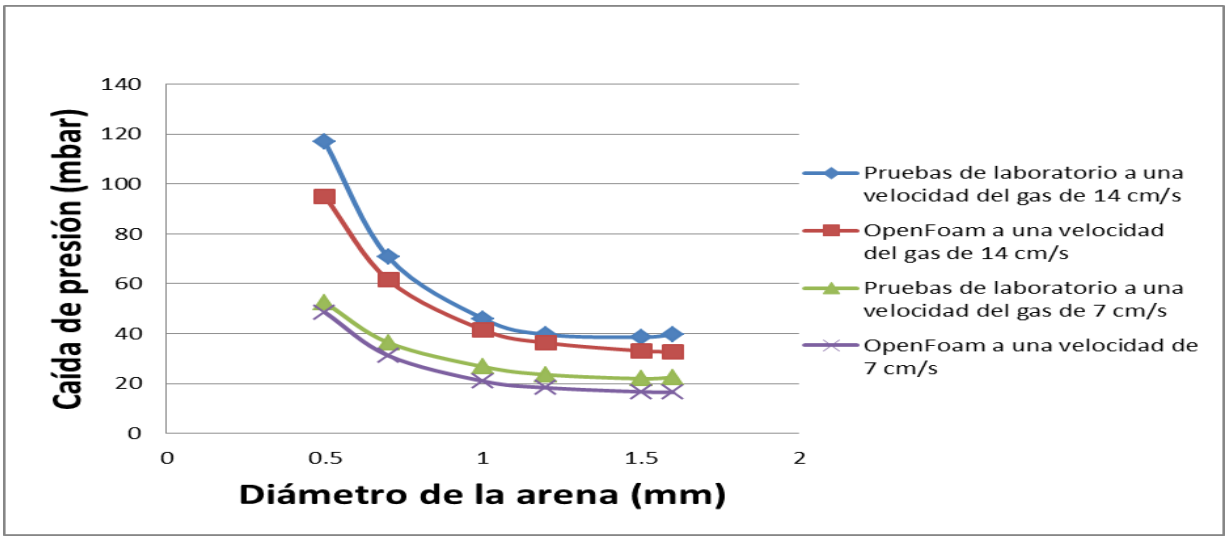

Figura 11. Comparación experimental contra la simulación OpenFOAM

6. CONCLUSIONES

La caída de presión en el dispositivo de filtrado se le atribuye principalmente al lecho de arena fina y en menor medida al lecho de arena gruesa.

Otro parámetro de diseño de vital importancia es el estudio de la velocidad del gas a la entrada del filtro. En este estudio se encontró que la velocidad a la entrada al filtro de lecho de arena es alta y que el flujo se concentra en la zona central, por lo que el uso del deflector en el filtro de lecho de arena evita que la descarga de gases se concentre en dicha zona, lo que podría mejorar la distribución del gas dentro del filtro.

En lo que concierne al análisis de la caída de presión contra gasto másico se puede destacar que la caída de presión ante diferentes tasas de flujo ensayados presenta una tendencia lineal, es decir, la caída de presión es proporcional al gasto másico.

Por otra parte, las comparaciones de datos experimentales muestran que el modelo de flujo con tratamiento de porosidad implícita, del solucionador OpenFOAM seleccionado, es adecuado para obtener las relaciones de gasto másico contra caída de presión del dispositivo de filtrado evaluado, ya que al graficar los diferentes diámetros de arena contra la caída de presión siguen la misma tendencia y los resultados son aproximados a los obtenidos experimentalmente.

Este tipo de diseño de filtrado tiene el potencial para usarse en contendores Mark II pues el equipo puede instalarse fuera ya del edificio del reactor, y conectarse a través del sistema de venteo que se tenga.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por la beca otorgada a través del proyecto CA-507. También, este trabajo se desarrolló como parte de los objetivos y entregables del proyecto del **Fondo Sectorial SENER-CONACYT Sustentabilidad Energética 213519** *Desarrollo de una metodología basada en licenciamiento aplicable para la evaluación de la seguridad de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde ante eventos más allá de las bases de diseño* (2014- 2018), de la Convocatoria para proyectos encaminados a atender demandas específicas en tecnologías no fósiles para la diversificación de fuentes primarias de energía 2013-04.

REFERENCIAS

1. United States Nuclear Regulatory Commission, “Issuance of Order to Modify Licenses with Regard to reliable Hardened Containment Vents Capable of Operation Under Severe Accident Conditions”, EA-13-109, June 6, 2013.
2. Working Group on Analysis and Management of Accidents (WGAMA), “*OECD/NEA/CSNI Status Report on Filtered Containment Venting*”, *OECD* (2014).
3. Chi Tien, *Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols*, Butterworths Publishers, Stoneham, USA (1989).

4. United States Nuclear Regulatory Commission, "Reactor safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants", WASH-1400, NUREG-75/014, October 1975.
5. Schechtman R. & Heising C.D., "Risk Assessment of the Benefical Impact of a Filtered Venting Containment System in a PWR with Large, Dry Containment", *Annals of Nuclear Energy*, **Vol. 23**, p. 641-661 (1996).
6. Song et al, "Overview of Containment Filtered Vent under Severe Accident Conditions at Wolsong NPP UNIT 1", *Nuclear Engineering and Technology*, **Vol. 45**, p. 597-604 (2013).
7. "Containment Research Overview", *The Second International Conference on Containment Desing and Operation*, Toronto, Ontario, Canada, October 14-17, (1990).
8. Open CFD Limited*, "OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide, Version 2.1.1",* OpenFOAM *(2012*).
9. Alain L'Homme, *"Accident Management in Nuclear Power Plants: Lecture 43.8.2 Containment Filtration and Venting Systems in France",* IAEA, Vienna, Austria (1989).